

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СОНЯЧНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою
програмою «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Сонячна теплоенергетика: лабораторний практикум. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: Ю.П. Вишневська, О.В. Козачук / КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 2,43 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 53 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від 02 червня 2023 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенергетехніки та автоматики (протокол № 8 від 27 лютого 2023 р.)

Електронне мережне навчальне видання

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

СОНЯЧНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Вишневська Юлія Павлівна*, канд. техн. наук, ст. викладач кафедри відновлюваних джерел енергії, ФЕА

Козачук Оксана Володимирівна, асистент кафедри відновлюваних джерел енергії, ФЕА

Відповідальний редактор: *Будько Василь Іванович*, докт. техн. наук, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії, ФЕА

Рецензент: *Пушкарь Микола Васильович*, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, ФЕА

© Ю.П. Вишневська, О.В. Козачук
©КПІ ім Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

Загальні рекомендації до лабораторних робіт.....	4
Лабораторна робота № 1 Дослідження коефіцієнта корисної дії та температури рівноваги сонячного колектора.....	7
Лабораторна робота № 2 Розрахунок параметрів затінення сонячних колекторів.....	24
Лабораторна робота № 3 Дослідження режимів роботи та ефективності плаского сонячного колектора	30
Лабораторна робота № 4 Визначення акумулюючої здатності сонячного ставка.....	46
Список літератури.....	53

ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Мета виконання даного циклу лабораторних робіт – закріплення теоретичних знань з дисципліни «Сонячна теплоенергетика» з метою формування уявлення студентів про:

- потенціал сонячної енергетики в різних кліматичних зонах;
- способи використання енергії сонячної радіації;
- сучасні та перспективні конструкції систем сонячного теплопостачання та опалення;
- принципи проектування комбінованих та комплексних енергосистем;
- методи аналізу та оцінювання теплової ефективності теплотехнічного обладнання.

Задачі циклу: ознайомити студентів з способами використання сонячної енергії та методами підвищення ефективності геліоенергетичних установок; сформувані вміння та навички організації і проведення випробувань та вимірювань, реєстрації, аналізу і оцінки одержаних результатів.

Процес виконання лабораторної роботи включає самостійну підготовку до роботи, підготовку протоколу на лабораторну роботу, допуск до виконання лабораторної роботи, проведення експериментальних досліджень відповідно до методики, обробку результатів, формулювання висновків, оформлення звіту та захист виконаної лабораторної роботи.

При підготовці до роботи студенти зобов'язані заздалегідь ознайомитися з методикою виконання роботи, вивчити необхідні теоретичні відомості, виконати в письмовому вигляді протокол лабораторної роботи та завдання на самостійну роботу і підготувати відповіді на контрольні запитання. В результаті підготовки студенти повинні розуміти мету роботи, її задачі, знати фізичний зміст явищ, що досліджуються, принцип роботи обладнання і засоби вимірювання, методику розрахунків та характер очікуваних результатів. Особливу увагу слід звернути на знання термінології, без якої неможливе чітке засвоєння навчального матеріалу. Якість теоретичної підготовки та виконання самостійного завдання контролює викладач на початку заняття. *Студенти,*

підготовка яких не відповідає викладеним вимогам, до виконання лабораторної роботи не допускаються.

Під час лабораторної роботи студенти, за необхідності, повинні підготувати устаткування до роботи при відключеному живленні. Після перевірки рівня підготовки студентів, готовності устаткування і правильності з'єднань викладач дає дозвіл на вмикання устаткування і виконання роботи. Викладач постійно контролює хід роботи і правильність отриманих результатів.

Рукописний звіт про роботу повинен містити мету роботи; завдання, короткі теоретичні відомості, основні визначення, принципову чи структурну схему установки; алгоритм та формули для чисельних розрахунків; умови дослідження, використане обладнання та прилади, параметри схеми і т.п.; результати досліджень у вигляді таблиць та графіків; аналіз результатів; загальні *висновки* по роботі *мають базуватись на аналізі виявлених в роботі закономірностей, зв'язків між різними фізичними величинами, містити порівняння отриманих результатів з теоретичними та табличними, а також рекомендації щодо практичного використання одержаних результатів*, короткий конспект з питань, які входять до завдання на самостійну підготовку. Використання обчислювальної техніки при оформленні звіту допускається тільки за узгодженням з викладачем.

Текст звіту слід оформити на аркушах формату А4. Графіки мають бути побудовані на міліметрівці в раціонально вибраному масштабі (або з використанням відповідних графічних редакторів), з чітко нанесеними експериментальними точками та правильністю апроксимації експериментальних даних.

Рисунки, таблиці, графіки, схеми слід виконувати у відповідності з ЄСКД, а умовні позначення у відповідності з державними стандартами та нормативною документацією, прирівнюючи звіт з лабораторної роботи до звіту з науково-дослідної роботи.

При обробці експериментальних даних та формулюванні висновків слід аналізувати фізичну суть закономірностей, що спостерігаються, та можливість їх використання в інженерній роботі за спеціальністю. В процесі розрахунків потрібно використовувати міжнародну систему одиниць і контролювати правильність результатів за порядком величин. Студенти повинні вміти пояснити одержані результати та обґрунтувати свої висновки при захисті лабораторної роботи.

Зміст висновків повинен бути узгоджений з метою роботи і завданнями на проведення окремих досліджень. У висновках необхідно описати об'єкт, методи, устаткування та прилади, які були використані в роботі, охарактеризувати можливі похибки експериментальних даних, сформулювати й пояснити на основі теоретичних відомостей основні закономірності, виявлені при проведенні досліджень, навести відповіді на питання, поставлені у методичних вказівках при формулюванні завдання на самостійну роботу та порядку виконання окремих досліджень, дати рекомендації з практичного використання досліджених приладів і отриманих результатів.

При захисті лабораторної роботи студенти повинні знати визначення основних понять, явищ, фізичних величин та технічних параметрів пристроїв, які досліджуються у даній роботі; фізичні основи відповідних явищ та закономірності впливу зовнішніх факторів на їх перебіг; перелік найбільш характерних технічних параметрів досліджуваних пристроїв та процесів, порядок їх величин; основні фактори, які впливають на характеристики і параметри матеріалів, а також закономірності цих впливів; можливості практичного використання досліджених приладів та ефектів.

Інструктаж з техніки безпеки студенти повинні пройти на першому занятті. Інструктаж проводить викладач або відповідальний за техніку безпеки при роботі в даній лабораторії. Після ознайомлення з інструкцією кожний студент повинен зареєструватися у контрольному журналі чи листі проведення інструктажу з техніки безпеки.

Лабораторна робота №1

Дослідження коефіцієнта корисної дії та температури рівноваги сонячного колектора

Мета та основні завдання роботи

Мета роботи – поглибити теоретичні знання та одержати практичні навички експериментальних досліджень з сонячної теплоенергетики.

Завданням роботи є визначення к.к.д. та температури рівноваги плоского вертикального сонячного колектора, а також знаходження на основі досліджень коефіцієнта теплових втрат колектора.

Теоретичні відомості

Системи сонячного теплопостачання поділяються на пасивні та активні. Системами *пасивного* сонячного теплопостачання є системи, в яких конструкційні елементи споруд використовуються в ролі теплоприймачів сонячної енергії. Тоді як системи *активного* сонячного теплопостачання використовують спеціалізовані установки, зокрема на основі сонячних колекторів, де відбувається поглинання сонячної радіації, перетворення її в теплову енергію, і передача теплової енергії теплоносію. У якості теплоносія можуть застосовуватися рідина (вода, розчини солей) або газ (повітря). *Комбіновані системи* сонячного теплопостачання поєднують в конструкції елементи пасивного і активного сонячного теплопостачання.

Пасивна система сонячного опалення – це енергетична система, в якій процеси приймання, накопичення та використання сонячної енергії для опалення здійснюються природним шляхом в архітектурно-будівельних елементах будівлі. У пасивних системах використовується безпосереднє нагрівання будівельних елементів за рахунок теплоти, що надходить від прямої сонячної радіації, а акумулювання сонячного тепла відбувається у масивних конструкціях будівель. Використання таких систем потребує значних капітальних витрат на етапі проектування та будівництва, однак дає змогу значно (до 30-40%) скоротити потребу в опаленні з використанням традиційних джерел енергії. Залежно від розташування компонентів, розрізняють системи з

прямим тепло надходженням, системи з непрямим теплонадходженням та ізольовані системи.

Активні системи базуються на використанні спеціалізованих пристроїв, які перетворюють падаюче сонячне випромінювання у теплову енергію. Одним з основних компонентів сонячної нагрівальної установки даного типу є **сонячний колектор**, де відбувається поглинання сонячної радіації, перетворення її в теплову енергію і передача теплової енергії теплоносію, яка потім використовується для обігріву будівель, гарячого водопостачання, виробництва електроенергії, сушки сільськогосподарської продукції та ін.

За типом теплоносія, колектори поділяються на *повітряні* і *рідинні*. В залежності від температури теплоносія, яка може бути досягнута на виході колектора, вони також поділяються на *низькотемпературні*, *середньотемпературні* і *високотемпературні*. У повітряних колекторах в якості теплоносія використовується повітря, а в рідинних – вода, незамерзаючі суміші (наприклад, гліколь), а також спеціальні розчини солей, які можуть нагріватися до температур вище 500° С.

Сонячні колектори можуть бути обладнані системою орієнтування за Сонцем, однак на практиці, переважна більшість колекторів встановлена стаціонарно. Кут нахилу колектора геліосистеми до горизонту доцільно приймати рівним широті місцевості (Україна розташована між 44°23' та 52°22' північної широти); допустиме відхилення складає +5, –10°.

Типи сонячних колекторів. За конструктивним виконанням, сонячні колектори можна розділити на чотири основні типи:

- *незасклений сонячний колектор (абсорбер);*
- *плоский сонячний колектор;*
- *вакуумний сонячний колектор;*
- *фокусуючий сонячний колектор.*

Плоскі колектори – найпоширеніший тип сонячних колекторів, що використовуються в побутових водонагрівальних і опалювальних системах (рис. 1.1).



Рис. 1.1 – Загальний вигляд плоского сонячного колектора

Світлопрозоре покриття (скління) є прозорим для сонячного випромінювання, але непрозорим для інфрачервоного. Сонячне випромінювання проходить через світлопрозоре покриття і поглинається *абсорбером* (рис. 1.2), за рахунок чого він нагрівається. Нагрітий абсорбер стає джерелом інфрачервоного випромінювання, однак завдяки властивостям скління, велика частина енергії залишається всередині колектора і поглинається теплоносієм. Крім того, скління запобігає прямому теплообміну абсорбера з атмосферним повітрям, що дозволяє знизити конвекційні тепловтрати. Скління може бути прозорим або матовим. У плоских колекторах зазвичай використовується матове скло з низьким вмістом заліза, яке пропускає значну частину сонячного світла, що надходить на колектор. Дно і бічні стінки колектора покривають теплоізоляційним матеріалом, що також знижує теплові втрати. Розрізняють рідинні і повітряні плоскі колектори. Коефіцієнт корисної дії високопродуктивних плоских сонячних колекторів досягає 65%.

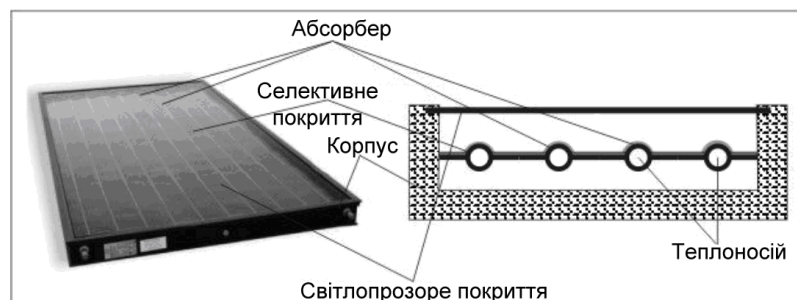


Рис. 1.2 – Будова плоского сонячного колектора

Однією з можливих схем реалізації системи сонячного теплопостачання на основі сонячних колекторів є *інтегрований колектор* ("ємнісний" або "термосифонний колектор"), який поєднує колектор з теплоакумлюючим баком, в якому нагрівається і зберігається невелика порція води (рис. 1.3). Такі колектори можуть використовуватися самостійно, або для попереднього нагрівання води, яка потім нагрівається до потрібної температури в традиційних установках, наприклад, в газових колонках. Термосифонний колектор представляє систему з природною циркуляцією теплоносія і не включає елементи з рухомими частинами (насоси), що дає змогу мінімізувати потребу у техобслуговуванні і експлуатаційні витрати.



Рис. 1.3 – Інтегрований сонячний колектор

Трубчасті вакуумні колектори відрізняються використанням вакууму для теплоізоляції абсорбера, що дає змогу досягти більш високої температури теплоносія. Основним компонентом вакуумного колектора є скляна трубка, що знаходиться всередині іншої скляної трубки, простір між якими ізолювано вакуумом (для коаксіальних трубок) – тиск може досягати 0,1 Па і підтримуватися більше 100 років. У більшості випадків, зовнішній діаметр трубки складає 2-5 см, а внутрішній 1-2 см, селективне покриття нанесено на зовнішню поверхню внутрішньої трубки. Вакуумні колектори складаються з декількох рядів паралельних скляних трубок та можуть бути модульними, що

дає змогу змінювати кількість елементів у відповідності до реальної потреби (рис. 1.4).

Сонячна радіація проходить крізь зовнішню скляну трубку, потрапляє на трубку-поглинач, де перетворюється в теплоту, яка передається теплоносію, що протікає по трубці. Нагріта рідина циркулює через теплообмінник і віддає теплоту воді, що міститься в баку-накопичувачі. Вакуум в скляній трубці забезпечує високу якість теплоізоляції абсорбера, що знижує втрати теплоти. Зовнішня скляна трубка також захищає поглинач і тепловідвідну трубку від несприятливих зовнішніх впливів. Така конструкція дає змогу досягти робочих характеристик, що перевершують будь-який інший вид сонячного колектора. Температура нагрівання в таких колекторах може перевищувати 200 °С.



Рис. 1.4 – Трубчатий вакуумний колектор

Співвідношення між виробленням теплоти від геліоколекторних установок і потребою в енергії.

Геліоколекторні установки для гарячого водопостачання (ГВП).

Використання сонячної енергії для прямого нагрівання води характеризується високою ефективністю: у той час, як масові фотоелектричні системи мають ефективність близько 15%, сонячні теплові системи досягають ККД 50–90%. Потреба в тепловій енергії для гарячого водопостачання у літню пору року може майже повністю забезпечуватися геліоустановкою.

Співвідношення між виробленням енергії геліоколекторною установкою і річною потребою в тепловій енергії для ГВП показано на рисунку 1.5. Як видно з рис. 1.5, при проектуванні систем цілорічного гарячого водопостачання, необхідно передбачити можливість покриття потреби у тепловій енергії за рахунок традиційних джерел у зимовий період та на випадок тривалих періодів погіршення погодних умов.

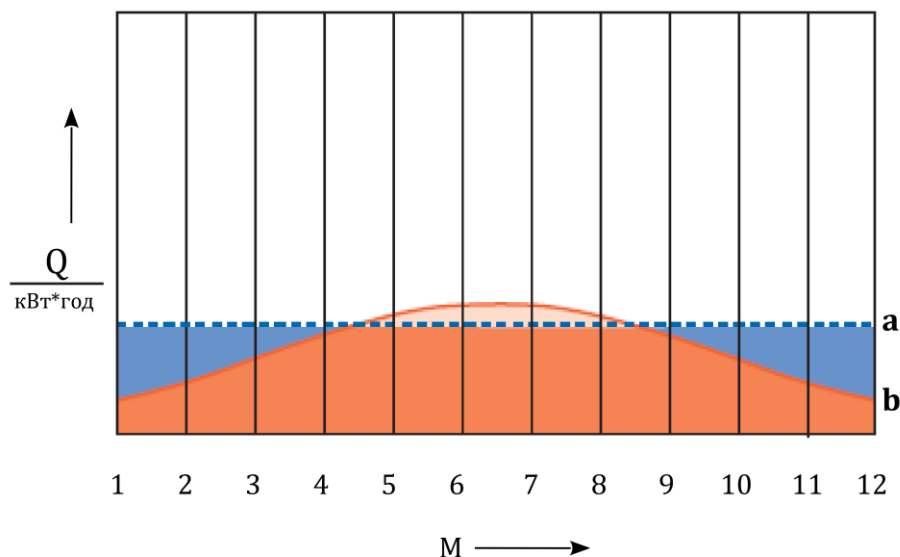


Рис. 1.5 – Співвідношення між виробітком енергії геліоколекторною установкою та річною потребою в тепловій енергії для ГВП

Геліоколекторні установки для ГВП та системи опалення.

Геліоколекторні установки також застосовуються у комплексних системах гарячого водопостачання та сонячного опалення. У той же час, слід враховувати, що робота геліоустановки можлива лише за умови, що температура теплоносія у геліоколекторі перевищує температуру у зворотному трубопроводі системи опалення. Тому їх застосування є найбільш виправданим для опалювальних приладів з великою площею нагріву і низькими температурами в системі або для систем підлогового опалення, а також у комплексі з установками підвищення потенціалу низькопотенційних джерел енергії, зокрема, на основі теплових насосів. За умови правильного проектування та монтажу, геліосистема покриває до 30% сумарної річної потреби в енергії для гарячого водопостачання та опалення. Співвідношення

між виробленням енергії геліоколекторною установкою і річною потребою в тепловій енергії для ГВП та опалення показано на рисунку 1.6.

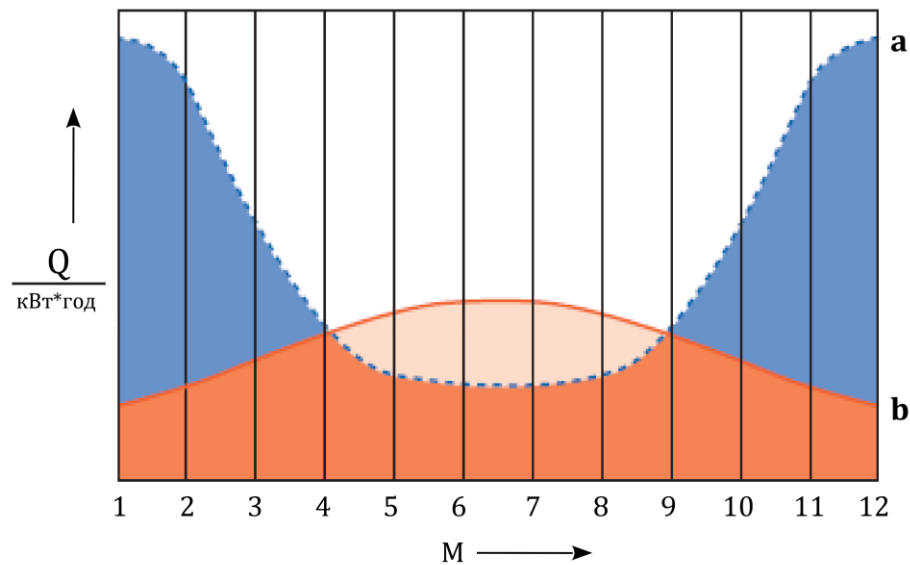


Рис. 1.6 – Співвідношення між виробітком енергії геліоколекторною установкою та річною потребою в тепловій енергії для ГВП та опалення

"а" – потреба в енергії (реальне споживання);

"б" – вироблення енергії геліоустановкою;

"М" – місяць;

"Q" – теплова енергія;

■ – надлишок сонячної енергії;

■ – використовувана сонячна енергія (покриття потреби в енергії за рахунок Сонця);

■ – потреба в енергії (використання додаткового нагрівання).

*Дані являють собою орієнтовні значення і наведені для визначених умов:

- Орієнтація фасадів на південь
- Кут нахилу геліоколекторів від 35° до 45°.

Тепловий баланс геліоколектора.

Основними параметрами, що характеризують взаємодію тіл з випромінюванням є:

- **коефіцієнт поглинання α (поглинальна здатність) тіла** – відношення потоку випромінювання, що поглинається поверхнею тіла, до потоку випромінювання, що падає на цю поверхню;
- **коефіцієнт відбивання ρ (відбиваюча здатність) тіла** – відношення потоку випромінювання, відбитого поверхнею тіла, до потоку, що падає на цю поверхню. Для поверхонь, які розсіюють падаюче сонячне випромінювання, цю величину також називають **альбедо**;
- **коефіцієнт пропускання τ (пропускна здатність) тіла** – відношення потоку випромінювання, що пропускається тілом, до потоку, що падає на це тіло. Коефіцієнти поглинання, відбивання і пропускання залежать від температури тіла, частоти (або довжини хвилі) випромінювання, а також від природи тіла, стану поверхні тіла. Для будь-якого тіла:

$$\alpha + \rho + \tau = 1.$$

Тіло, для якого коефіцієнт поглинання дорівнює одиниці, називається абсолютно чорним. Воно поглинає все падаюче на нього випромінювання. **Коефіцієнт випромінювання ε (ступінь чорноти) тіла** - відношення потоку власного інтегрального випромінювання даного тіла до потоку інтегрального випромінювання абсолютно чорного тіла при тій же температурі. Сумарний тепловий потік, що надходить до теплоносія, визначається балансом

$$Q = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{випр}}$$

де $Q_{\text{погл}}$, $Q_{\text{випр}}$ – поглинений потік і теплові втрати приймача відповідно.

Потік сонячного випромінювання, що поглинається панеллю приймача, становить:

$$Q_{\text{погл}} = \tau_{\text{пок}} \alpha_n \cdot S_n \cdot E,$$

де $\tau_{\text{пок}}$ – коефіцієнт пропускання прозорого покриття, що захищає приймаючу поверхню від сонця (0,8-0,9); α_n – коефіцієнт поглинання приймаючої поверхні; S_n – площа освітлюваної поверхні; E – густина сонячного потоку.

В процесі поглинання температура приймаючої поверхні підвищується. Перевищення температури поглинаючої панелі t_n над температурою навколишнього середовища $t_{o,c}$ призводить до втрати тепла від приймача:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{t_n - t_{\text{н.с.}}}{R} \cdot S_n = (\alpha_l + \alpha_k)(t_n - t_{\text{н.с.}}) \cdot S_n,$$

де R – термічний опір приймача, який залежить від теплоізоляції приймача і від покриття; α_l, α_k – коефіцієнти тепловіддачі від теплоприймача навколишньому середовищу випромінюванням і конвекцією. Корисний тепловий потік, що надходить до теплоносія, визначається через рівняння теплопередачі:

$$Q = k(t_n - t_e) \cdot S_n',$$

де $k = (\delta/\lambda + 1/\alpha_n)^{-1}$ – коефіцієнт теплопередачі від зовнішньої поверхні поглинаючої панелі до енергоносія, $\delta, \lambda, \alpha_n$ – товщина, коефіцієнт теплопровідності і коефіцієнт тепловіддачі поглинаючої панелі; t_e – середня температура енергоносія; S_n – площа внутрішньої поверхні поглинаючої панелі. З іншого боку, корисний тепловий потік можна визначити через тепло, поглинене теплоносієм. При нагріванні статичної маси рідини

$$Q = G \cdot c_e (t_{e2} - t_{e1}),$$

де G – масова витрата рідини; c_e – теплоємність теплоносія; t_{e1}, t_{e2} – температура теплоносія на вході та виході колектора. Максимальна температура теплоносія, що досягається в геліоколекторі, визначається з умови $Q_{\text{ном}} = Q_{\text{випр}}$, тоді

$$\tau_{\text{пок}} \cdot \alpha_n \cdot S_n \cdot E = (t_{\text{max}} - t_{\text{н.с.}})/R \cdot S_n.$$

Звідки знаходимо максимальну температуру теплоносія

$$t_{\text{maxnok}} = \tau_n \cdot \alpha \cdot E \cdot R_{\text{н.с.}} + t$$

ККД геліоколектора визначається за формулою

$$\eta = Q/(S_n \cdot E) = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta t}{E} - k_2 \frac{(\Delta t)^2}{E}$$

де $\eta_{0\text{пок}} = \tau_{\text{пр}} \alpha$ – оптичний ККД, що враховує втрати геліоколектором на відбивання сонячного випромінювання та його поглинання прозорим покриттям (0,78-0,85); k_1 – коефіцієнт теплових втрат конвекцією (1,2-4,2); k_2 –

коефіцієнт теплових втрат випромінюванням (0,0073-0,0130); $\Delta t = t_n - t_{o.c}$ – різниця температур колектора і навколишнього середовища середовища. В результаті ККД геліоколектора в залежності від умов експлуатації змінюється від 70% до 30%.

Основним завданням роботи є визначення к.к.д. та температури рівноваги плаского вертикального сонячного колектора, а також знаходження на основі досліджень коефіцієнта теплових втрат колектора. Оскільки реалізація підтримки поверхні сонячного колектора перпендикулярно сонячним променям за допомогою трекінгової системи слідування є складною і дороговартісною, колектори встановлюють стаціонарно, або змінюють їх орієнтацію декілька разів на рік. Найкраще орієнтувати колектори на південь. Кут нахилу колектора до горизонту складає:

$$\text{для зими: } \alpha = \gamma + 12^\circ ;$$

$$\text{для літа: } \alpha = \gamma - 12^\circ ,$$

де γ - широта місцевості, а 12° – приблизно половина кута нахилу земної вісі до площини орбіти Землі.

Вітражами експериментального сонячного колектора слугують шибки вікна лабораторії. Корпус колектора, що знаходиться в приміщенні лабораторії, виконаний з дерева і закріплений за вертикальну дерев'яну раму. Інтенсивність сонячного випромінювання при безхмарному небі на вертикальну площину обернену на південь знаходиться з таблиці 1, на 22 число кожного місяця. При необхідності потрібно інтерполювати величини на конкретну дату.

Таблиця 1.1. Інтенсивність сонячної радіації I , Вт/м² та накопичена за день енергія E , на вертикальну поверхню обернену на південь при безхмарному небі.

Дата	I по годинам дня (астрономічним) Вт/м ²										За день E _м , Вт·год
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
22.06	157	281	381	446	468	446	381	281	157	78	3313
24.05 та 21.07	181	311	415	482	505	482	415	311	181	75	3584
23.04 та	247	395	512	586	612	586	512	395	247	93	4351

22.08											
22.09 та 23.03	305	482	620	707	734	707	620	482	305	122	5213
22.02 та 22.10	273	492	660	763	798	763	660	492	273	0	5179
21.01 та 21.11	120	398	601	724	765	724	601	398	120	0	4393
21.12	0	316	540	674	718	674	540	316	0	0	3782

Плоскі сонячні колектори, що мають прозорі вітражі у вигляді скла чи плівки, можуть поглинати як пряму так і розсіяну сонячну радіацію. Розсіяне випромінювання складає близько 10...12% від прямого сонячного випромінювання.

К.к.д. сонячного колектора, відповідно до теплового балансу геліоколектора, залежить від таких факторів:

- конструкція вітражів;
- тип абсорбера;
- теплоізоляція абсорбера;
- теплоізоляція корпусу;
- температур теплоносія на вході і виході .

Прозорі вітражі колектора виконують функції затримування випромінювання від абсорбера, зменшення охолодження абсорбера конвективними потоками, пропускання сонячного проміння та захист від опадів та вітру. Кількість вітражів залежить від вимог до к.к.д. і до температури, яку потрібно отримати. Найбільша їх кількість - 3. В основному використовують одинарне скління при температурах до 60°C, для досягнення вищих температурах використовують подвійне або потрійне скління ($t = 80...110^{\circ}\text{C}$). Скло характеризується оптичним коефіцієнтом $\nu = 0,80 \dots 0,92$. В даній роботі при порівнянні експериментальних результатів з розрахунковими

даними прийматимемо $\nu = 0,85$. При послідовній установці вітражів оптичний коефіцієнт системи:

$$\nu_n = \nu^n$$

де n - кількість вітражів.

Тип абсорбера впливає на к.к.д. через коефіцієнт неізотермічності $K_{ні}$, який залежить від відстані між трубками абсорбера і матеріалу трубок. Для абсорбера, звареного з листів і використаного в даній роботі $K_{ні} = 1$.

Теплоізоляцію в колекторі встановлюють за поверхнею абсорбера, зворотньою до сонячного випромінювання. Роль теплоізоляції може виконувати задня стінка корпусу. В даній роботі досліджували обидва випадки:

- з повітряною подушкою між абсорбером і задньою стінкою;
- з додатково встановленою на задню стінку зовнішньою теплоізоляцією.

Теплоізоляція, вітражі та матеріал корпусу впливають на загальний коефіцієнт теплових втрат K колектора, який подібний до коефіцієнта теплопередачі, але віднесений не до всієї його зовнішньої поверхні, а лише до поверхні прозорого покриття.

Формула для обчислення к.к.д. колектора має такий вигляд

$$\eta = \left[\nu - \frac{k \left(\frac{t_{вх} + t_{вих}}{2} - t_m^{next} \right)}{I} \right] K_{ні} \quad (1)$$

З рівняння (1) видно, що к.к.д. колектора росте при зниженні середньої температури теплоносія в колекторі

$$t_m = \frac{t_{вх} + t_{вих}}{2} \quad (2)$$

Температура рівноваги колектора

Це максимальна температура, що досягається в колекторі при наявній інтенсивності вимірювання. При досягненні такої температури, кількість енергії, що надходить до колектора з сонячними променями дорівнює кількості енергії, що втрачається колектором. При цьому, теплоносій (вода, антифриз чи повітря) через колектор не циркулює і колектор не продукує корисну теплову

енергію. Відповідно, і к.к.д. колектора дорівнює нулю (відповідно до теплового балансу геліоколектора).

Температура рівноваги t_p , залежить від інтенсивності сонячного випромінювання I та температури навколишнього середовища. Підвищення температури рівноваги ΔT_p , у порівнянні з температурою навколишнього середовища для $I = 1000 \text{ Вт/м}^2$ може сягати максимально $60...70^\circ$ для колектора з одним вітражем і $120...130^\circ\text{C}$ та $140...150^\circ\text{C}$ для колектора з двома та трьома вітражами, відповідно.

Опис дослідного стенда з сонячним колектором

Основним елементом стенда є сонячний колектор. Подвійна застелена рама 1 вікна слугує прозорим покриттям 2 колектора. Площа вітража колектора складає $0,675 \text{ м}^2$ ($1,375 \cdot 0,49 \text{ м}$). Вертикальний абсорбер 3 представляє собою зварені по контуру два листи нержавіючої сталі з дистанційними проштампованими округлими виступами у нержавіючому листі, зверненому до ізоляції.

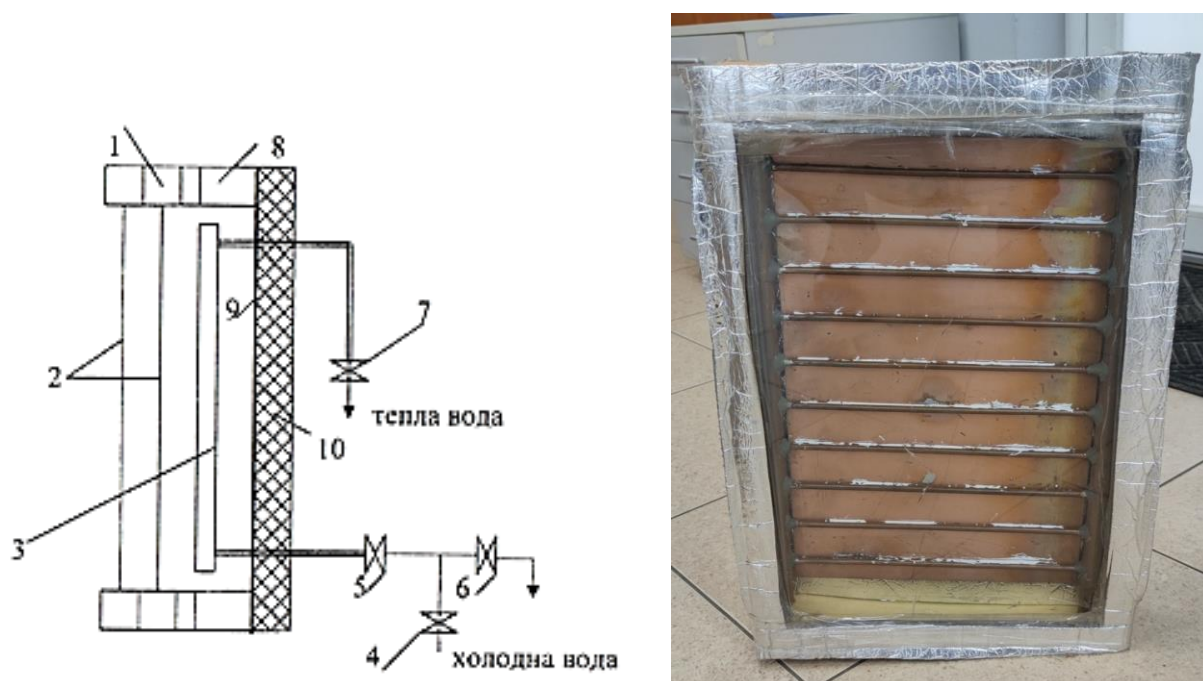


Рис. 1.7 – Конструкція вертикального сонячного колектора:

1 – рама вікна; 2 – скло; 3 – абсорбер; $4, 5, 6, 7$ – вентилялі; 8 – корпус;

9 – задня стінка з фанери; 10 – з'ємна теплоізоляція.

До абсорбера приєднані нижній вхідний і вихідний патрубки. Нижній патрубок з'єднаний з водогоном. Кількість води, що міститься в абсорбері складає 4,7 л. Вхідна магістраль має три вентиля: вентиль 4 слугує для перекриття води, а вентиль 6 для зливу води як з водогону так і з колектора. При випробуваннях колектора вентиля 5 та 7 повинні бути завжди відкритими для того, щоб не підвищувати тиск в системі вище тиску, допустимого для гумового шлангу яком подається вода після вентиля 4. Якщо вентиль 5 закривається, то при відкритому вентилі 4 потрібно забезпечити спуск води через вентиль 6.

Температура на вході в колектор вимірюється лабораторним термометром, який занурюється у резервуар, куди тече вода через вентиль 6. Температура також контролюється термopарою з вторинним приладом. Аналогічно знаходиться і температура на виході із колектора. Витрата води знаходиться методом вимірювання часу заповнення заданого тарованого об'єму за секундоміром.

Виконання лабораторної роботи

З метою підвищення точності вимірювань дослідження рекомендується проводити з 11 до 15 годин (в період максимальних значень Λ). Для оптимізації часу, першою вимірюється температура рівноваги. Для її вимірювання потрібно витіснити холодною водою через вентиля 4, 5 і 7 гарячу воду з колектора (близько 2...4 літрів) з періодичним вимірюванням температури. Записати максимальне значення температури води.

Методика дослідження температури рівноваги

Дослідження проводяться для 2-х випадків: I. Колектор без теплоізоляції; II. колектор з теплоізоляцією.

Перед заміром температури рівноваги t_p , колектор повинен бути заповнений водою і залишений без подачі холодної води в нього протягом 2 - 3 годин. Для заміру максимальної температури води потрібно подати холодну воду на вхід колектора і по мірі витіснення гарячої води заміряти щохвилино

її температуру. Найбільше максимальне значення прийматимемо за t_p , яку занотуємо до таблиці 2.

Таблиця 1.2. Оформлення результатів експерименту

Дата « ____ » _____ 20__ р.

№ досл.	Астрон. час		Витрата води		Температура, °С					Примітка
	Початок	Закінчення	m, кг	τ, с	Вода			Повітря		
					рівн. t_p	вхід t_1	вихід t_2	кімн. t_3	навк. серед. t_4	
I. Колектор без теплоізоляції										
Результати дослідження 12.11.2003 р. (зразок)										
1	13 ⁰⁰	-			65	-	-	23	11	
2	13 ³⁰	13 ⁴⁰	0,17	60	-	22	41,5	23	11	
II. Колектор з теплоізоляцією										
1										
2										

Методика дослідження к.к.д. сонячного колектора

Величину к.к.д. необхідно дослідити при двох значеннях величини масової витрати води, що відрізняються між собою не менше ніж в два рази. В процесі досліджень потрібно записати в таблицю 2 час початку дослідів і температури води на вході t_1 та на виході з колектора t_2 . Слід дочекатися стаціонарного режиму, коли протягом 10 хвилин температура t_2 не буде змінюватися. Одночасно з фіксацією часу початку і закінчення дослідів потрібно записати температури повітря в кімнаті t_3 та навколишнього середовища t_4 .

Дослідження к.к.д. слід виконувати за відсутності і при наявності додаткової теплоізоляції.

Таблиця 1.3. Результати обробки експериментів

№ досл.	I, Вт/м ² (з табл. 1.1)	F, м ²	I, F, Вт	m _v , кг/с	$t_1 - t_2$	Середня темп., °С		t_p , °С	Q_k , Вт	$\eta_{\text{експ}}$	$\eta_{\text{розр}}$
						води, t_m	повітря, t_m^n				
I. Колектор без теплоізоляції											
Результати дослідження 12.11.2003 р. (зразок)											
1	738	0,675	505	0	0	65	17,5	65	0	0	0
2	700	0,675	50	$2,83 \cdot 10^{-3}$	19,5	31,75	17,5	-	231	0,48	0,51

II. Колектор з теплоізоляцією											
1											
2											

Обробка результатів вимірювань к.к.д.

Масу води в мірній посудині знаходимо приймаючи 1 см³ (мілілітр) за 1 грам. Масова витрата

$$m_{\text{в}} = \frac{m}{\tau}$$

Масова витрата вимірюється в кг за секунду.

Для розрахунків кількості теплоти знаходимо приріст температури води в колекторі.

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

Корисна теплова потужність колектора

$$Q_k = C_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} (t_1 - t_2)$$

де $C_{\text{в}} = 4,187 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Середня температура води в колекторі

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Середня температура повітря навколишнього середовища і в кімнаті

$$t_{\text{п}} = \frac{t_3 + t_4}{2}$$

Експериментальне значення к.к.д.

$$\eta = \frac{Q_k}{IF}$$

Значення I знаходимо за табл. 1 інтерполюючи на дату і точний час дослідів.

Площа вітража сонячного колектора $F = 0,675 \text{ м}^2$. Результати розрахунків за наведеними вище формулам заносимо в табл.1.3.

Обробка результатів вимірювання температури рівноваги

При температурі рівноваги к.к.д. колектора дорівнює нулю, тому є можливість використовуючи рівняння (1) для знаходження коефіцієнта

теплових втрат K колектора. Приймаючи коефіцієнт неізотермічності (суцільна пластина в конструкції абсорбера) одержимо:

$$K = \frac{I\nu^2}{t_p - t_m^n}$$

$\nu = 0,85$ - оптичний коефіцієнт; для двох вітражів $\nu_2 = 0,722$.

Розрахуємо η для проведених дослідів використовуючи знайдене значення K .

Контрольні запитання

1. Фізичний зміст температури рівноваги?
2. Які фактори впливають на к.к.д. сонячного колектора?
3. Що таке стратифікація в сонячних установках?
4. Дайте характеристику абсорберу колектора.
5. Що таке коефіцієнт неізотермічності і від чого він залежить?

Лабораторна робота № 2

Розрахунок параметрів затінення сонячних колекторів

Мета роботи : поглибити теоретичні знання та одержати практичні навички експериментальних досліджень параметрів затінення.

Завданням роботи є визначення параметрів затінення сонячних колекторів.

Теоретичні відомості:

Для збільшення виробництва енергії нерідко збільшують площі встановлення фотопанелей або сонячних колекторів, оскільки збільшення площі самої фотопанелі або геліоколектора є дорогавартісним і нерациональним. Тому, для збільшення виробітку, раціонально встановлювати ряди геліоколекторів, що може призвести до їх затінення і суттєвого зниження їх ефективності.

Ця проблема, головним чином, стосується наземних геліополів і дахового розміщення плоских колекторів, де ряди сонячних колекторів або панелей повинні бути оптимально розміщені для максимального використання доступного місця. Затінення може бути як від сторонніх споруд, дерев тощо, так і у ряді колекторів від інших колекторів у ряду.

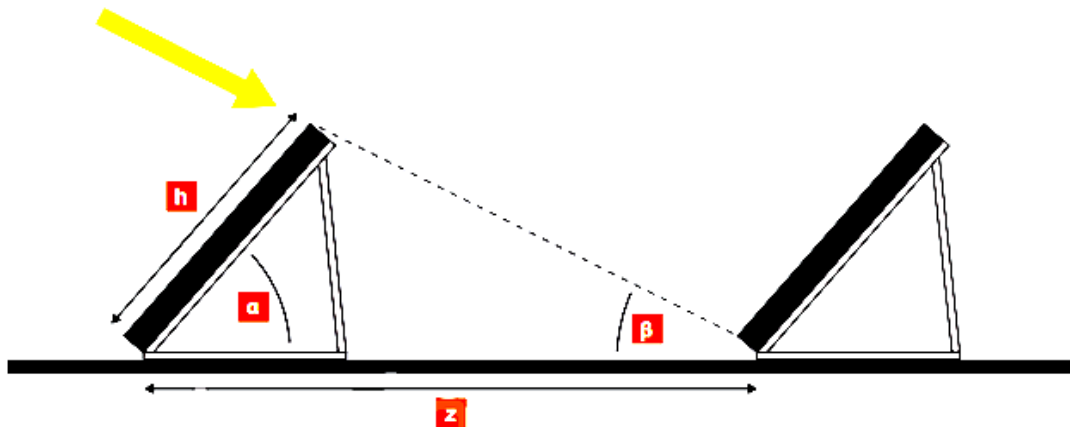


Рис. 2.1 – Схематичне зображення розміщення геліоколекторів:

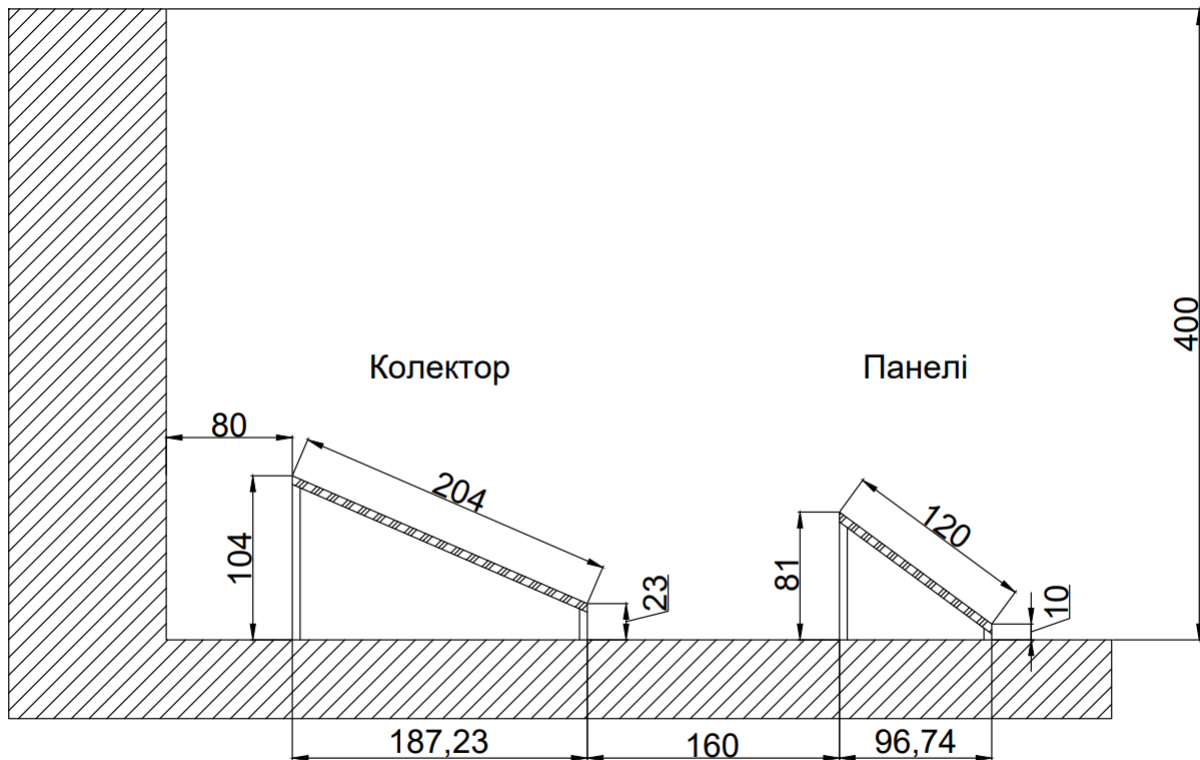
z – відстань між рядами колектора; h – висота колектора; α – кут нахилу колектора; β – кут висоти стояння Сонця над горизонтом.

Доцільно встановлювати колектори у ряду на такій відстані, що коли сонце знаходиться у зеніті, то тінь, що падає від попереднього колектора не

потрапляла на абсорбер наступного колектора (в ідеалі) або потрапляла частково. Період з 12^{00} - 15^{00} характеризує найбільшою інтенсивністю випромінювання, і називається сонячним вікном. Мінімальна відстань, що необхідна для уникнення затінення в середині сонячного вікна називається азимутальною корекцією Сонця.

Завдання до лабораторної роботи

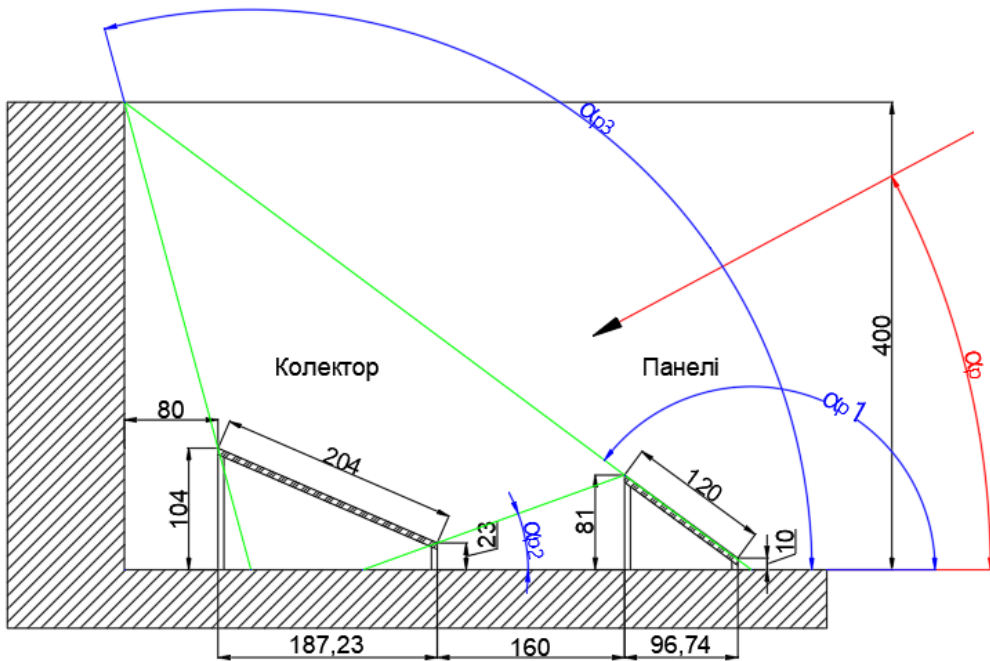
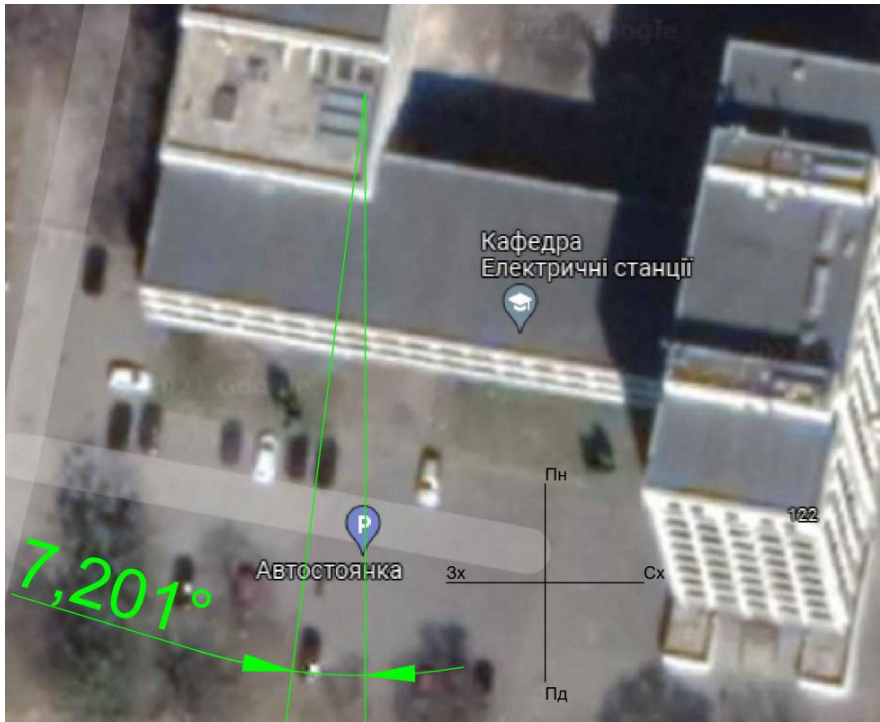
Необхідно визначити параметри затінення сонячних колекторів сусіднім рядом сонячних панелей та сніною, що знаходиться позаду сонячних колекторів. Вихідні параметри: довжина колектора 2,02 м, колектори встановлені під кутом 50° та орієнтовані на південь. Оцінити частину площі колекторів, затіненої рядом фотопанелей, профільний кут дорівнює 30° . Схема розміщення геліоколекторів наведена на рисунку 2.2.



Розміри вказані у см

Рис. 2.2 – Схема взаємного розміщення сонячних колекторів та фотопанелей (балкон).

Карта з даними, необхідними для розрахунку параметрів затінення:



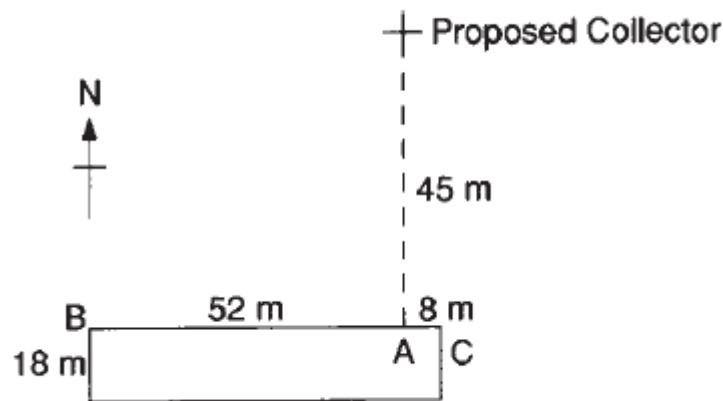
Розміри вказані в см

Рис. 2.3 – Схема взаємного розміщення сонячних колекторів та фотопанелей (балкон).

Для проведення розрахунків використовувати формули наведені нижче в прикладах.

Приклади розрахунку затінення від будівлі та рядом геліоколекторів [1].

Приклад. 1. Встановлення сонячного колектора планується на висоті 4 м над землею. Прямокутна будівля висотою 30 м, розташована на відстані 45 м на південь, орієнтована по лінії схід-захід, з розмірами, наведеними на рисунку. Широта 45° . Зобразити цю будівлю на діаграмі положення Сонця, щоб показати пору року та час доби, коли будівля буде затіняти колектор.



Розв'язання.

Три точки, що необхідні для визначення форми зображення, є верхніми точками найближчих кутів і верхньої точки будівлі в місці, розташованому точно на південь від колектора. Розглянемо першу точку А. Кутова висота об'єкта для даної точки визначається тим, що будівля віддалена від колектора на 45 м і на $(30 - 4) = 26$ вище колектора:

$$\operatorname{tg} \alpha_{0A} = \frac{26}{45}, \alpha_{0A} = 30,0^\circ$$

Азимутальний кут об'єкта $\gamma_{0A} = 0^\circ$, оскільки точка А розташована на півдні.

Для точки В, відстань SB дорівнює $\sqrt{(45^2 + 52^2)} = 68,8$ м. Висота дорівнює 26 м.

Тоді

$$\operatorname{tg} \alpha_{0B} = \frac{26}{68,8}, \alpha_{0B} = 20,7^\circ$$

Азимутальний кут об'єкта

$$\operatorname{tg} \gamma_{0B} = \frac{52}{45}, \gamma_{0B} = 49,1^\circ.$$

Розрахунки для точки С такі ж, як і для точки В. Відстань SC $\sqrt{(45^2 + 8^2)} = 45,7$ м.

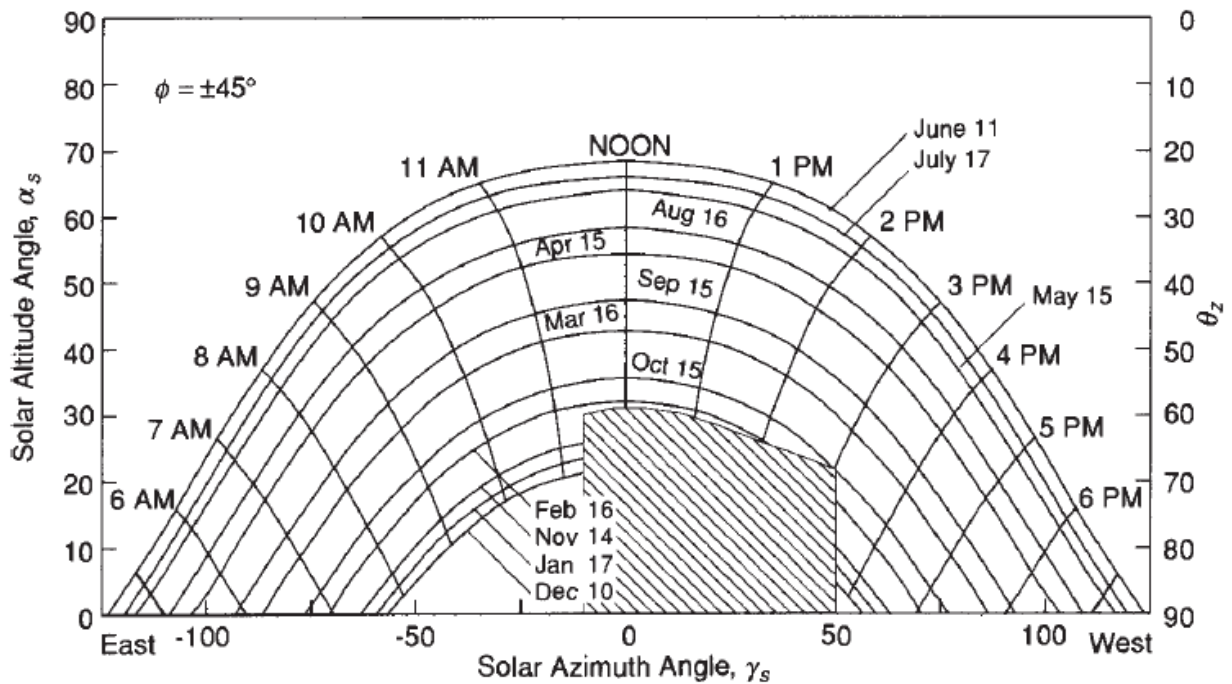
$$\operatorname{tg} \alpha_{0C} = \frac{26}{45,7}, \alpha_{0C} = 29,6^\circ$$

Азимутальний кут об'єкта

$$\operatorname{tg} \gamma_{OB} = \frac{8}{45}, \gamma_{OB} = 10,1^\circ.$$

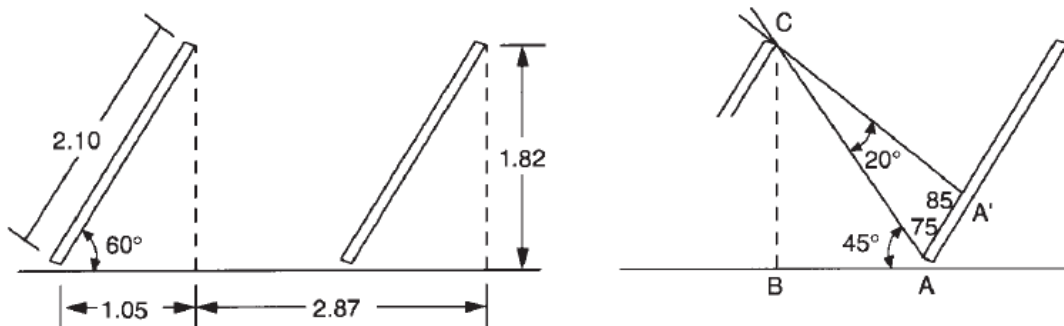
Оскільки точка С лежить на сході, γ_{OB} приймається від'ємним.

Профіль затінення будівлею може бути апроксимований за допомогою з'єднання А і С та А і В прямими лініями. Більш точно визначити криву можна, визначивши на профілі затінення координати проміжних точок. В даній задачі кутова висота об'єкта $27,7^\circ$ визначена для азимутального кута об'єкта 25° .



Заштрихована область відображає будівлю з точки встановлення колектора і періоди затінення останнього.

Приклад 2. Багаторядний масив колекторів встановлено за схемою, наведеною нижче. Довжина колектора 2,1 м. Колектори нахилені під кутом 60° та орієнтовані на південь. Оцінити частину площі колекторів ряду N, затіненої колекторами ряду M, якщо профільний кут дорівнює 20° . Вважати, що крайові ефекти незначні.



Розв'язання.

З рисунка $\angle BAC = \arctg[1.82 / (2.87 - 1.05)] = 45^\circ$, і оскільки $\alpha_p = 20^\circ$, затінення буде. Визначаємо відстань AA' :

$$AC = \frac{1.82}{\sin 45} = 2.57 \text{ м}$$

$$\angle CAA' = 180 - 45 - 60 = 75^\circ$$

$$\angle CA'A = 180 - 75 - 20 = 85^\circ$$

За теоремою синусів:

$$AA' = \frac{2.57 \sin 20}{\sin 85} = 0.88 \text{ м}$$

Частина колектора ряду N, що знаходиться в тіні, складає $0.88/2.10=0,42$.

Контрольні запитання

1. Основні фактори, що впливають на затінення.
2. Профільний кут та висота сонцестояння.
3. Вплив крайових ефектів на оцінку затінення.

Лабораторна робота №3

Дослідження режимів роботи та ефективності плоского сонячного колектора.

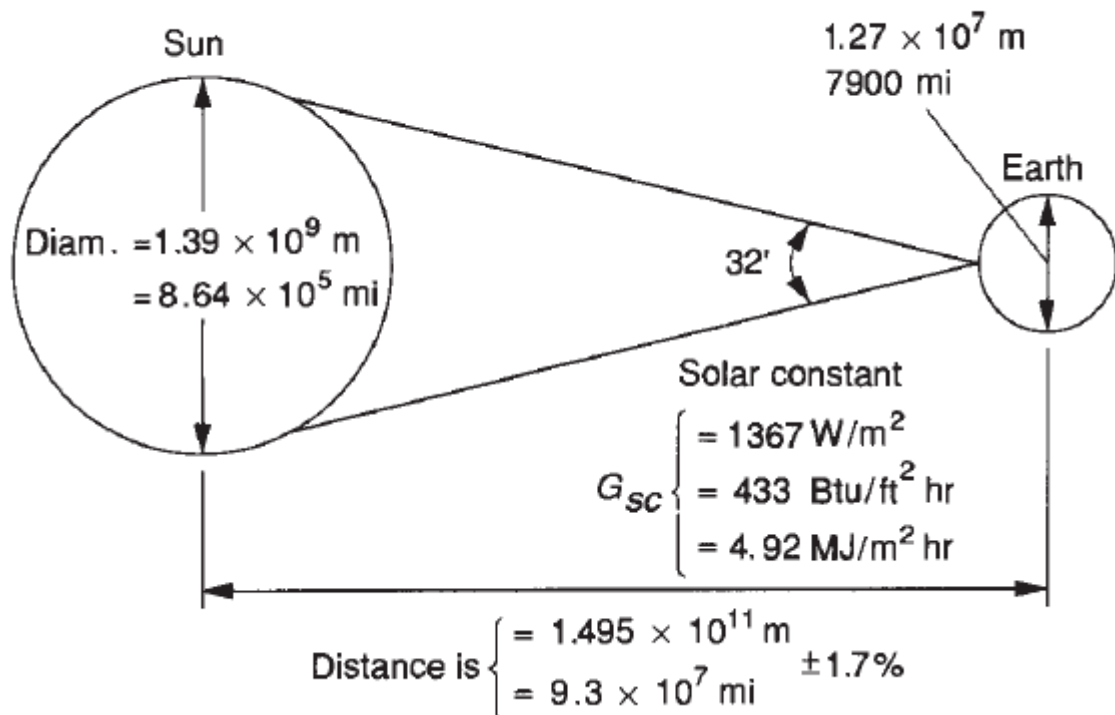
Мета та основні завдання роботи

Мета роботи – закріпити і поглибити теоретичні знання та одержати практичні навички експериментальних досліджень з визначення ефективності плоского сонячного колектора.

Завданням роботи є визначення к.к.д сонячного колектора та дослідження режимів його роботи.

Теоретичні відомості

Характеристики Сонця та його просторове розміщення відносно Землі такі, що інтенсивність сонячного випромінювання на границі атмосфери Землі майже постійна. *Сонячною постійною* називається енергія випромінювання Сонця, яка падає в одиницю часу на одиницю площі поверхні, перпендикулярної потоку сонячного випромінювання, в космічному просторі на відстані рівній середній відстані Землі до Сонця.



Взаєморозташування Землі і Сонця [1].

В різних джерелах ця величина варіюється від 1322 до 1395 Вт/м² в залежності від методів визначення. Для розрахунків приймається значення 1367 Вт/м².

Характеристики сонячної радіації.

Випромінювання характеризується наступними параметрами:

1. **Потік випромінювання, Q , Дж/с, Вт**, – величина, рівна енергії, що переноситься електромагнітними хвилями за одну секунду через довільну поверхню.
2. **Густина потоку випромінювання, E , Вт/м²**, – інтегральний потік випромінювання, що переноситься через одиницю поверхні:

$$E = \frac{dQ}{dS}$$

3. **Інтенсивність випромінювання, I , Вт/(м²·мкм)**, – густина потоку випромінювання тіла для досліджуваного інтервалу довжин хвиль $d\lambda$:

$$I = \frac{dE}{d\lambda}$$

4. **Опроміненість, H , Дж/м²**, – потік випромінювання, що падає на одиницю поверхні за певний проміжок часу dt :

$$H = \int Edt$$

5. **Світловий потік, Φ** – частина потоку випромінювання, що сприймається людським оком (тобто потік випромінювання, що відноситься до видимого діапазону довжин хвиль $0,4 < \lambda < 0,7$ мкм). Одиницею вимірювання світлового потоку є люмен (лм). Світловий потік в 1 лм білого світла дорівнює $4,6 \cdot 10^{-3}$ Вт (1Вт=217 лм).

6. **Освітленість (густина світлового потоку), E_c** – світловий потік, що падає на одиницю поверхні. Освітленість вимірюється в люксах (лк). 1 лк=1лм/м². Для білого світла 1 лк = $4,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/м². Для потоку світла від лампи розжарювання 1 лк = $10,7 \cdot 10^{-3}$ Вт/м². Прилади, призначені для вимірювання освітленості, називають люксметрами.

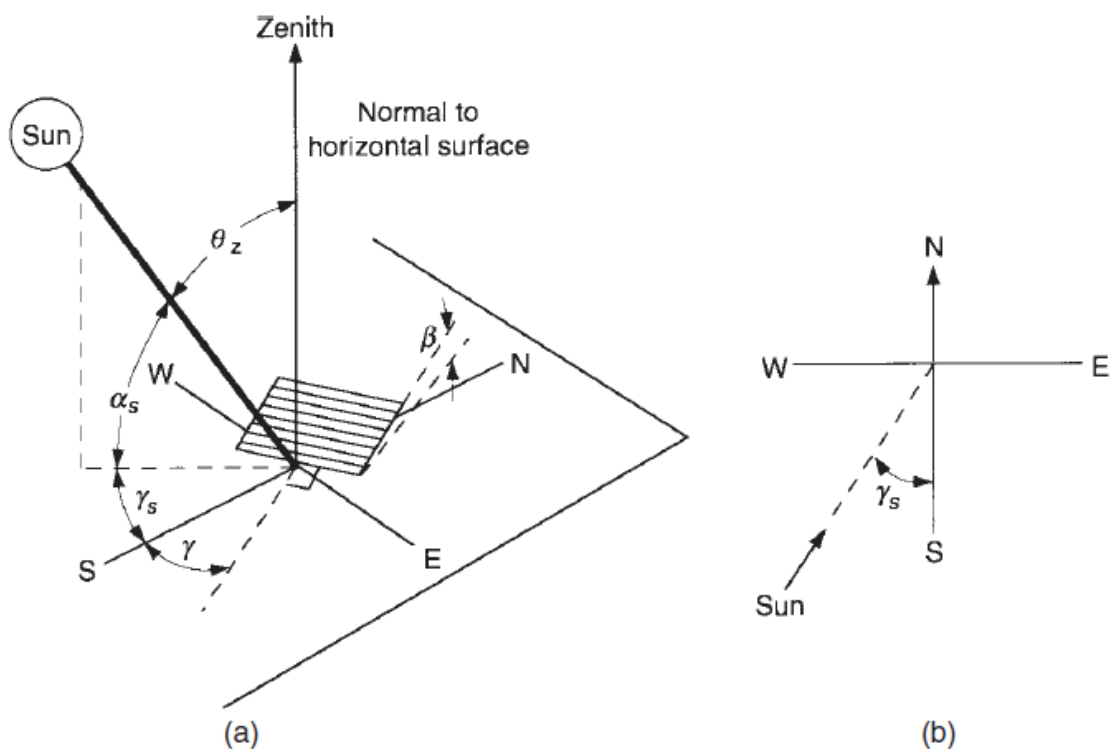
Напрямки поширення прямого сонячного випромінювання.

Геометричне співвідношення між положенням площини, певним чином орієнтованої відносно Землі в будь-який момент часу (незалежно від того, нерухома дана поверхня чи переміщується відносно Землі), і напрямком прямого сонячного випромінювання, тобто положенням Сонця відносно даної площини, можуть бути описані за допомогою ряду величин:

φ – **широта** місцевості (додатна для північної півкулі), $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$,

δ – **схилення** – кутове положення відносно площини екватора (додатна для північної півкулі), $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$,

β – **нахил площини** до горизонту – кут між заданою площиною та горизонтальною поверхнею; $0^\circ < \beta < 180^\circ$ ($\beta > 90^\circ$ означає, що площина розташована лицевою донизу);



Положення сонячних кутів [1]

γ – **азимутальний кут площини** – кут відхилення нормалі до площини від місцевого меридіану (за початок відліку приймають південний напрямок, відхилення на схід вважають додатним, на захід – від'ємним), $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$;

ω – **годинний кут** – кут відхилення Сонця від локального меридіану за рахунок обертання Землі навколо своєї осі. Даний кут дорівнює нулю в полудень, кожна година відповідає 15° довготи, значення годинного кута до полудня вважаються від’ємними, після полудня – додатними ;

θ – **кут падіння** прямого сонячного випромінювання – кут між напрямком падаючого випромінювання і нормаллю до поверхні;

θ_z – **зенітний кут** – кут між вертикаллю і напрямком на Сонце, тобто кут падіння прямого сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню;

α_s – **висота сонцестояння** – кут між напрямком на Сонце та горизонтальною поверхнею, додатковий до зенітного кута.

γ_s – **азимутальний кут Сонця** – кутове відхилення проекції напрямку поширення прямої сонячної радіації на горизонтальну площину від напрямку на південь. Відхилення на схід вважається від’ємним, на захід – додатним.

Схилення δ можна визначити за наближеною формулою Купера:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

або за більш точною формулою Спенсера (в радіанах, похибка становить менше $0,035^\circ$):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002679 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B$$

$$\text{де } B = (n - 1) \frac{360}{365}.$$

Рівняння, що дозволяє виразити кут падіння прямого сонячного випромінювання через інші кути має вигляд:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \\ &+ \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega; \end{aligned}$$

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma).$$

Для **вертикальних** поверхонь $\beta = 90^\circ$, тоді рівняння набуває вигляду:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \varphi \cos \gamma + \cos \delta \sin \varphi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega.$$

Для **горизонтальних** поверхонь кут падіння дорівнює зенітному куту Сонця θ_z . Його величина має варіюватися в межах 0° і 90° , якщо Сонце знаходиться вище горизонту. Для такого випадку $\beta = 0$, тоді

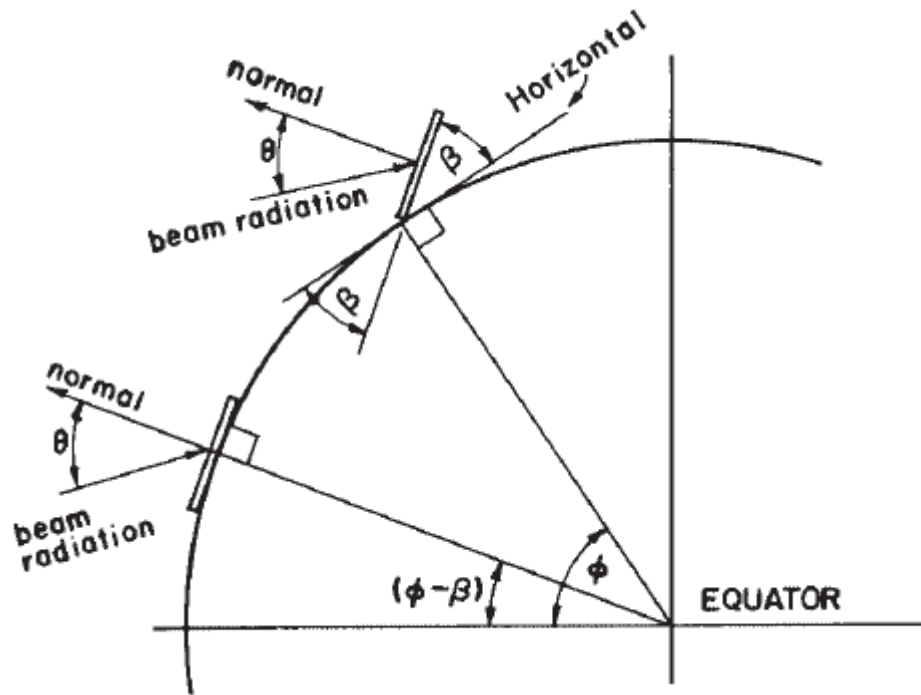
$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta.$$

Азимутальний кут Сонця γ_s може набувати значень в діапазоні від 180° до -180° . Для північних і південних широт, що розташовані між $23,45^\circ$ і $66,45^\circ$, γ_s буде знаходитися в між 90° і -90° при тривалості дня менше 12 годин. Для днів тривалістю більше 12 годин, на початку і в кінці дня, коли Сонце розташовано північніше лінії схід-захід в північній півкулі і південніше лінії схід-захід – в південному, γ_s буде більше 90° або менше -90° . В тропічних широтах γ_s може набувати будь-яких значень, якщо різниця $\delta - \varphi$ додатна в північній півкулі або від'ємна в південній. Тобто, γ_s від'ємний, коли від'ємний годинний кут, і додатний в протилежному випадку. Значення функції sign дорівнює $+1$, якщо ω набуває невід'ємних значень і -1 в протилежному випадку:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \arccos \left(\frac{\cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \varphi} \right) \right|.$$

Для кутів падіння на поверхні, що обернені на північ або південь можна отримати зручні вирази, якщо врахувати, що для таких поверхонь справедливі ті ж співвідношення, що й для горизонтальної поверхні, розташованій на уявній широті $\varphi - \beta$ [1]:

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta.$$



Для південної півкулі:

$$\cos \theta = \cos(\varphi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi + \beta) \sin \delta.$$

В сонячний полудень для поверхні, нахиленої на південь, в північній півкулі:

$$\theta_{noon} = |\varphi - \delta - \beta|,$$

в південній півкулі:

$$\theta_{noon} = |-\varphi + \delta - \beta|.$$

Коли $\beta = 0$, кут падіння є зенітним кутом, для північної півкулі рівним:

$$\theta_{z,noon} = |\varphi - \delta|,$$

для південної півкулі

$$\theta_{z,noon} = |-\varphi + \delta|.$$

Геліоколектори для нагрівання теплоносія використовують сумарну сонячну радіацію, яка складається з прямої, розсіяної та відбитої. Густина потоку прямої сонячної радіації в площині колектора $H_{пр}$ на поверхню нахилену під кутом до горизонту дорівнює:

$$H_{пр} = H_{sc} \cdot R_{пр} \cdot K_{ат}, \quad (3.1)$$

де $R_{\text{пр}}$ – коефіцієнт перерахунку приходу прямої сонячної радіації з горизонтальної на похилу поверхню;

$K_{\text{ат}}$ – коефіцієнт, який враховує поправку на повітряну масу, яку проходить сонячне випромінювання.

Коефіцієнт перерахунку приходу прямої сонячної радіації на похилу поверхню буде дорівнювати:

$$R_{\text{пр}} = \frac{\cos \theta_{\text{пох.}}}{\cos \theta_{\text{гор.}}}, \quad (3.2)$$

де $\theta_{\text{пох.}}$ – кут між напрямком прямого сонячного випромінювання та нормаллю до похилої поверхні;

$\theta_{\text{гор.}}$ – кут між напрямком сонячного випромінювання та нормаллю до горизонтальної поверхні.

$$\cos \theta_{\text{пох.}} = \sin \delta \sin \varphi \cos S - \sin \delta \cos \varphi \sin S \cos \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos S \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin S \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin S \sin \gamma \sin \omega \quad (3.3)$$

$$\cos \theta_{\text{гор.}} = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega, \quad (3.4)$$

де S – кут нахилу геліоколектора до горизонту, град;

Годинний кут ω розраховується за формулою:

$$\omega = \frac{\pi}{12} (12 - t), \quad (3.5)$$

де t – сонячний час для даної місцевості, год.

Схилення Сонця розраховуємо так:

$$\delta = 23 \cdot 45 \cdot \sin \left\{ \frac{2\pi}{365(284 + N)} \right\}. \quad (3.6)$$

де N – порядковий номер дня року (починаючи з 1, що відповідає 1-му січня). Також кутове схилення можна визначити за формулою Купера, наведеною вище.

Коефіцієнт, який враховує поправку на повітряну масу, знаходиться за формулою:

$$K_{\text{ат}} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin h}, \quad (3.7)$$

де h - кут, який визначає висоту сонця над горизонтом в даний момент часу, град., синус цього кута рівний:

$$\sin h = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \cos \varphi. \quad (3.8)$$

Формула (3.1) дозволяє розраховувати лише величину потоку прямої сонячної радіації, напрямленої на довільну поверхню. Проте, будь-який сонячний колектор сприймає також дію розсіяної сонячної радіації. Точний розрахунок цієї складової частини енергії, яка надходить на сонячний колектор – процес досить складний. Проте, з достатньою точністю для довільно розташованої поверхні цю величину можна апроксимувати емпіричною залежністю:

$$H_{\text{розс}} = 137,1 - 14,82 \frac{1}{\sin h}. \quad (3.9)$$

Відбита сонячна радіація може бути оцінена з виразу:

$$H_{\text{від}} = 0,5 \cdot p \cdot (1 - \cos S) \cdot (H_{\text{пр}} + H_{\text{розс}}), \quad (3.10)$$

де p – відбивальна властивість Землі.

$p = 0,2$ в літній період.

$p = 0,7$ в зимовий період при наявності снігу.

Остаточо, загальний потік енергії, який приноситься сонячною радіацією на довільно орієнтовану у просторі нахилену поверхню на широті L , рівний:

$$H_T = H_{\text{пр}} + H_{\text{розс}} + H_{\text{від}} \quad (3.11)$$

Необхідно врахувати, що всі ці значення наведені для ясного дня, на практиці при розрахунку потрібно враховувати так званий коефіцієнт хмарності. Слід також відмітити, що розрахункові значення потоків для різних годин практично повністю збігаються із наведеними у таблицях у нормативних документах (СНІП) та кліматичному атласі.

Режим роботи сонячного колектора описується рівнянням енергетичного балансу, котре розділяє енергію сонячної радіації на корисну акумульовану енергію і втрати. Енергетичний баланс колектора в цілому можна записати в такому вигляді:

$$A\{HR(\tau\alpha)_D + [HR(\tau\alpha)]_d\} = Q_u + Q_L + Q_s, \quad (3.12)$$

де H – густина потоку сонячного випромінювання (прямого або розсіяного), падаючого на одиницю площі горизонтальної поверхні;

R – коефіцієнт перерахунку густини потоку прямого або розсіяного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню;

$(\tau\alpha)$ – приведена поглинальна здатність системи покриттів відносно прямого або розсіяного випромінювання;

A – площа колектора;

Q_u – тепловий потік, який переданий робочій рідині в сонячному колекторі (корисне тепло);

Q_L – теплові втрати колектора в навколишнє середовище шляхом випромінювання і конвекції, а також шляхом теплопровідності по опорах поглинаючої пластини і т.п.;

Q_s – потік теплоти, що акумулюється колектором.

Показником ефективності колектора є його коефіцієнт корисної дії (ККД) – відношення корисної теплової енергії Q_u до падаючої сонячної енергії.

Для випробувань сонячних колекторів часто використовують методику Національного бюро стандартів США. Згідно з цією методикою випробування проводять на експериментальному стенді в стаціонарних умовах, коли сонячна радіація, швидкість вітру, температура навколишнього середовища і температура рідини на вході слабо змінюється на протязі деякого часу.

Випробування проводять або в природних умовах приблизно опівдні в сонячні дні, або з використанням сонячного імітатора.

Корисна енергія, що відводиться колектору, визначається виразом:

$$Q_u = F_R A [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)], \quad (3.13)$$

де F_R – коефіцієнт відводу тепла з колектора;

I_T – густина потоку сумарної сонячної радіації в площині колектора, Вт/м²;

$\tau\alpha$ – приведена поглинальна здатність (враховує також ту частину випромінювання, що пройшла крізь скляне покриття, досягла адсорбера, і знову повернулась до скла):

U_L – повний коефіцієнт теплових втрат колектора, Вт/(м²К);

T_i – температура рідини на вході в колектор, °С;

T_a – температура навколишнього середовища, °С.

За результатами випробувань визначається ефективність колектора.

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T}. \quad (3.14)$$

Теплопродуктивність колектора можна визначити ще за температурами теплоносія на вході і виході колектора за формулою:

$$Q_u = GC_p(T_o - T_i). \quad (3.15)$$

де G – масова витрата теплоносія, кг/с;

C_p – питома масова теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К);

T_o , T_i – температури теплоносія на виході та вході в абсорбер колектора, °С.

Коефіцієнт корисної дії можна визначити ще наступним чином:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_o - T_i)}{I_T}, \quad (3.16)$$

де $F_R(\tau\alpha)$ – складовий коефіцієнт, який показує максимальне теоретичне значення ККД для цієї конструкції геліоколектора;

$F_R U_L$ – складовий коефіцієнт, що характеризує теплові втрати конкретної конструкції колектора.

Коефіцієнт, знайдений за формулою (3.16) значною мірою характеризує конструктивну і теплотехнічну досконалість конструкції плоского сонячного колектора [4, 5].

Густина поглиненої перетвореної енергії розраховується за формулою:

$$q = \frac{E}{A}, \quad (3.17)$$

де A – робоча площа поверхні колектора, м².

Опис експериментальної установки



На рис. 3.1 наведено принципову теплову схему для дослідження плоского колектора Atmosfera.

Основними елементами схеми є: плоский колектор (Виробник – Atmosfera); мембранний розширювальний бак розсільного контуру сонячного колектора; комбінований буферний накопичувач для приготування води гарячого водопостачання; циркуляційний насос контуру гарячого водопостачання; витратомір холодної води на потреби гарячого водопостачання; витратомір циркуляційної лінії гарячого водопостачання; вентиль вихідного трубопроводу геліоколектора (антифриз); вентиль трубопроводу подачі антифризу на геліоколектор.

Контур руху теплоносія пов'язаний із сонячним колектором, насосною станцією та теплообмінником комбінованого буферного накопичувача. Теплоносієм сонячного колектора є суміш гліколю з водою у співвідношенні 50:50. Теплоносієм контуру системи гарячого водопостачання є водогінна вода. Контур системи гарячого водопостачання складається з вбудованого бака-водонагрівача, триходового регулюючого клапана прямої дії та циркуляційного насоса гарячого водопостачання. Вода з водогону направляється до вбудованого в комбінований буферний накопичувач бака-водонагрівача на 160 літрів, в якому вона нагрівається від контуру сонячного колектора.

У внутрішньому вбудованому баку-водонагрівачу вода може нагріватися до температури вище 60 °С, тому для підтримання максимальної температури води на потреби гарячого водопостачання не вище 60 °С встановлено триходовий клапан прямої дії, який підмішує воду з водогону до необхідної температури. Циркуляційна вода гарячого водопостачання повертається до бака-водонагрівача. Для знезараження води від бактерій легіонери у системі ГВП передбачено процедуру знезараження, яка забезпечує нагрівання води вище 60°С протягом певного часу з визначеною періодичністю.

Плоский сонячний колектор Atmosfera виконаний з наступних елементів та матеріалів: рама корпусу виконана із скловолокна, задня стінка колектора виконана із сталевого листа із алюмінієво-цинковим покриттям, в якості ізоляції використовується мінеральна вата товщиною 55 мм, скло – структуроване безпечне скло з низьким вмістом заліза, товщиною 3,2 мм та світлопроникністю до 92%, абсорбер колектора мідний з чорним хромованим покриттям.

Порядок проведення лабораторної роботи

Послідовність роботи

1. Ознайомитися з конструктивною схемою експериментальної установки та її основними структурними елементами та одержати допуск до виконання лабораторної роботи у викладача.

2. За даними термодатчиків та витратоміру, встановлених в контурі теплоносія сонячного колектора, зафіксувати наступні параметри для відповідних моментів часу:

T_o , T_i – температури теплоносія (суміш гліколю з водою) на вході та виході з сонячного колектора відповідно, °С;

T_k – середня температура поверхні адсорбера в сонячному колекторі, °С;

V – об’єм теплоносія, м³;

G – витрата теплоносія, м³/год.;

Q_u – теплопродуктивність колектора, кВт;

3. За показниками блоку керування визначити температуру

T_k – середню температуру поверхні адсорбера в сонячному колекторі, °С;

4. Використовуючи дані Гідроцентру записати інтенсивність сонячної радіації I , Вт/м² для відповідних моментів часу.

5. Провести експериментальну обробку інформації: розрахунки, побудову залежностей, тощо.

Таблиця 3.2. Експериментальні дані

Дата «__» _____ 20__ року.

№ дослідження	Астрономічний час, год.		Температура, °С					G , м ³ /год	Q_k , кВт	E , кВт·год	I , Вт/м ²	V , м ³
	Початок	Закінчення	антифриз			повітря						
			T_a , °С	T_i , °С	T_k , °С	T_a , °С	, °С					

Обробка експериментальних даних

В ході обробки результатів вимірювання необхідно визначити такі параметри:

1) Розрахувати середню витрату теплоносія, що протікає в колекторі за певний проміжок часу Δt (доба, година, півгодини):

$$V_{\tau} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} \quad (3.18)$$

де V_{i+1} , V_i – показання лічильника на початок і кінець визначеного проміжку часу відповідно, м³.

2) Розрахувати середній потік поглиненої перетвореної сонячної енергії за визначений проміжок часу (доба, година):

$$E_{\tau} = \frac{E_{i+1} - E_i}{\Delta\tau}, \quad (3.19)$$

де E_{i+1} E_i – показання лічильника на початок і кінець визначеного проміжку часу відповідно, кВт·год.

3) Густина поглиненої перетвореної енергії:

$$q = \frac{E_{\tau}}{A}, \quad (3.20)$$

де E_{τ} – середній потік поглиненої перетвореної сонячної енергії за певний проміжок часу, кВт·год.;

A – робоча площа поверхні колектора, м².

4) Експериментальне значення ККД сонячного колектора.

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T}, \quad (3.21)$$

де Q_u – теплопродуктивність колектора (показник теплового лічильника з табл. 2, Вт;

I – інтенсивність сонячної радіації, Вт/м².

5) Розрахункова тепла продуктивність колектора

$$Q_u = GC_p(T_o - T_i), \quad (3.22)$$

де G – масова витрата теплоносія, яка вираховується за формулою:

$$G = V_{\tau} \cdot \rho_A, \quad (3.23)$$

де ρ_A – питома густина антифризу.

Питому масову теплоємність теплоносія C_p (в нашому випадку це 50% водний розчин пропіленгліколю) взяти з таблиці.

6) Обчислюємо розрахункове значення ККД:

$$\eta_{\text{розра}} = \frac{Q'_u}{I \cdot F}. \quad (3.24)$$

7) Визначити теоретичне значення ККД геліоколектора, підставляючи в формулу (3.14) корисну теплоту Q_u , розраховану за формулою (3.13).

8) Розрахувати інтенсивність сонячної радіації на площину геліоколектора за формулами (3.1) – (3.9).

Результати обчислень занести в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 Результати обчислень

№ п/п	Δt , ГОДИН	V_t	E_t	q	$\eta_{\text{експ}}$	$\eta_{\text{розр}}$	$\eta_{\text{теор}}$	$\eta_{\text{пасп}}$	I_T
1									
2									
3									
4									
5									

Побудувати наступні залежності.

- 1) Залежність теплопродуктивності колектора Q_u кВт від зміни витрат теплоносія (див. рис.3.2).
- 2) Залежність температури теплоносія на виході з колектора t'' , °C від змін витрат теплоносія.
- 3) Залежність коефіцієнта корисної дії від температури на виході геліоколектора.

Загальний вигляд залежностей показано на рис. 3.2.

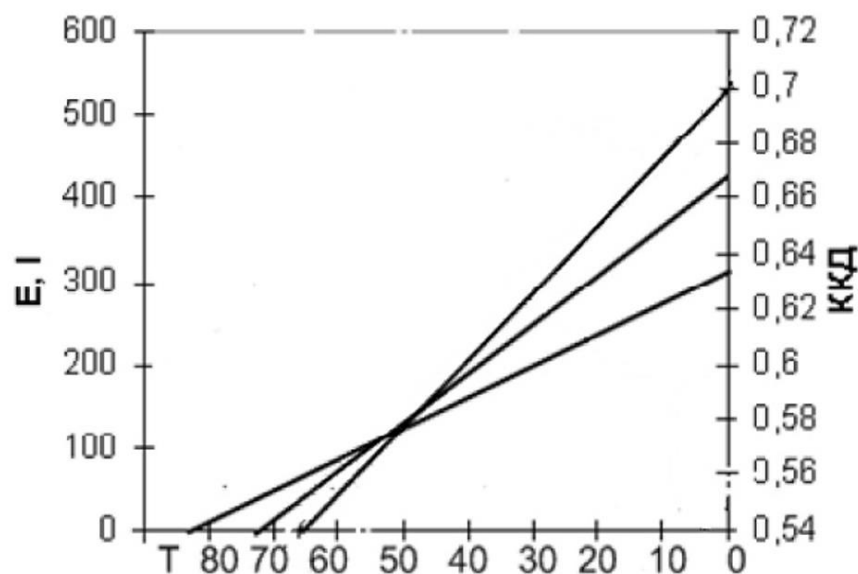


Рис. 3.2. Загальний вигляд залежностей

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Основні характеристики сонячної радіації.
2. Наведіть параметри, що впливають на ефективність сонячних колекторів?
3. Конструкція плоского сонячного колектора.

4. Класифікація активних сонячних систем.
5. Переваги та недоліки активних та пасивних сонячних систем.
6. Як визначити середній потік поглиненої перетвореної сонячної енергії за визначений проміжок часу?
7. Як визначити середню витрату теплоносія, що протікає в колекторі за певний проміжок часу?

Лабораторна робота №4

Визначення акумулюючої здатності сонячного ставка.

Мета та основні завдання роботи

Мета роботи – поглибити теоретичні знання та одержати практичні навички експериментальних досліджень з сонячної теплоенергетики.

Завданням роботи є оцінка акумулюючої здатності сонячного ставка та дослідження режимів його роботи.

Теоретичні відомості

Сонячні ставки – клас сонячних установок, що дозволяє забезпечити перетворення сонячної енергії в тепло в різних природно-кліматичних умовах з подальшим його використанням для теплопостачання, опріснення води, отримання солей, отримання теплової енергії для відділення сирової нафти від супутніх розсолів, вирощування низькотемпературних аквакультур, а в деяких випадках і для виробництва електроенергії.

Відомі два основні класи сонячних ставок: *дестабілізовані та стабілізовані*. *Нестабілізовані* сонячні ставки – це клас пристроїв, що охоплює мілкі і глибокі сонячні ставки, в яких не застосовуються будь-які спеціальні заходи з придушення конвекції води. Вони являють собою плоску конструкцію, виконану з бетону, пластику або іншого матеріалу, з тепло- і гідроізолювані зачорненим дном і бічними стінками і, як правило, покриті зверху світлопрозорою огорожею. Товщина шару води в мілкому сонячному ставку становить 5-10 см, в глибокому – до декількох метрів. У разі хорошої зовнішньої теплоізоляції конструкції, вода в мілкому сонячному ставку, як і в сонячному колекторі, може прогрітися до 40-60 ° С. Сонячні ставки такого типу, в зв'язку з невеликою масовою теплоємністю, не здатні забезпечити тривале акумулювання теплоти, тому вони зазвичай забезпечуються додатковими

теплоізолюваними ємностями, куди закачується нагріта в ставку протягом дня вода.

Глибокі нестабілізовані сонячні ставки поєднують в собі і функції акумулятора теплоти. Нагрівання води в них, як правило, незначне, і вони можуть використовуватися там, де немає потреби в підвищених температурах, наприклад, з тепловими насосами в якості джерела низькопотенційної теплоти.

Основними недоліками розглянутого класу сонячних ставків, що обмежують їх широке застосування, є нестабільність і низький рівень одержуваних температур води.

У стабілізованих сонячних ставках забезпечується різко виражений градієнт температури по їх глибині, що досягається за рахунок придушення у той чи інший спосіб конвекції в об'ємі ставка.

Стабілізовані сонячні ставки класифікують:

- з градієнтом сольової концентрації (зі штучно створеним градієнтом концентрації та насичені);
- в'язкісностабілізовані;
- механічно стабілізовані.

Сонячні ставки з градієнтом сольової концентрації (ССГСК), в яких концентрація і відповідно густина розчину зростають з глибиною. ССГСК поділяються на ставки зі штучним підтриманням градієнта і насичені ставки, в яких застосовуються солі зі значною залежністю розчинності від температури. Відомі також ідеї створення в'язкісно-стабілізованих сонячних ставків, гідродинамічна стабілізація яких здійснюється шляхом додавання в воду сполучних добавок з утворенням прозорих гелів, і механічно стабілізованих сонячних ставків, конвекція в яких не допускається за рахунок перегородок або стільникових структур.

На рис. 4.1 наведено схему сонячного ставка з штучно створюваним градієнтом сольовий концентрації.

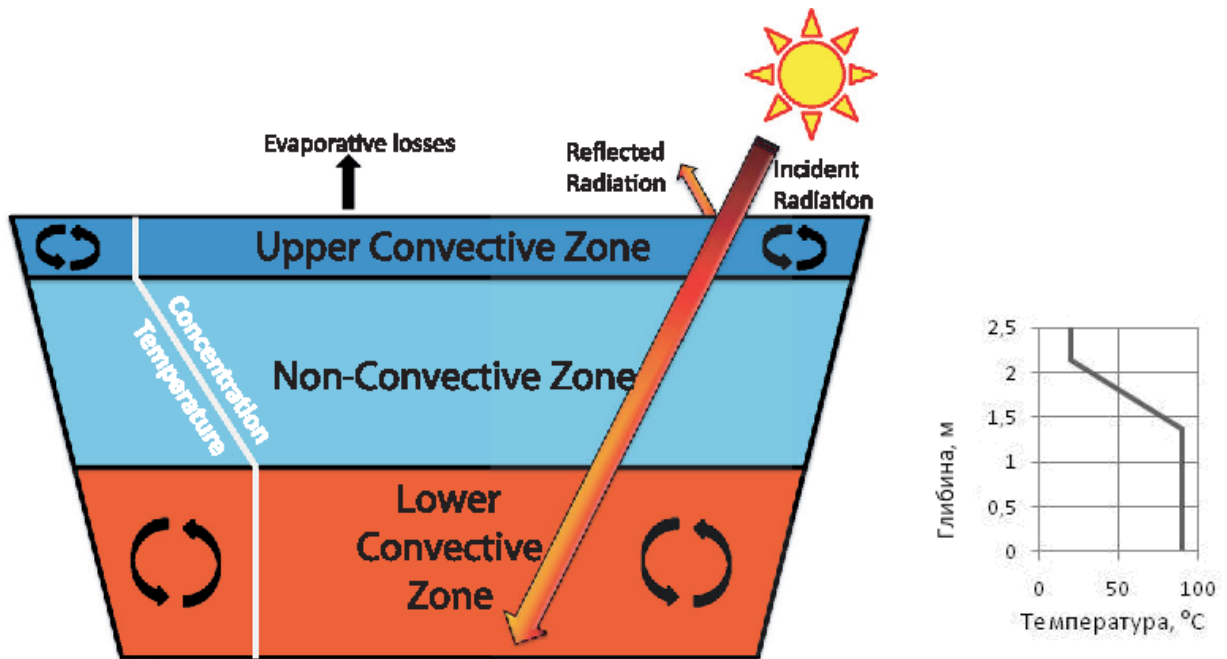


Рис. 4.1 – схематичне зображення сонячного ставка.

Градієнт концентрації солі в зоні стабілізації [зоні градієнта концентрації (ЗГК)] повинен бути таким, щоб забезпечувати гідродинамічну стійкість цієї зони при наявності градієнта температури, що збігається за напрямком з градієнтом концентрації. В цьому випадку в даній зоні за рахунок оптичних і теплофізичних властивостей води досить ефективно пропускається сонячне випромінювання в глибину ставка і одночасно теплоізолюючи нижні шари нагрітого від атмосфери розчину за рахунок як невисокою теплопровідності води, так і того, що теплове випромінювання нагрітого дна і розчину не пропускається водою (парниковий ефект). За допомогою ССГСК можливе отримання температури до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і навіть трохи вище, якщо врахувати збільшення температури кипіння сольового розчину з ростом концентрації.

У створенні градієнта концентрації солі є дві принципові можливості:

а) в більшій частині ставка розчин солі ненасичений, і здійснюється спеціальне управління градієнтом концентрації для забезпечення стабільності ставка;

б) для стабілізації ставка використовується насичений розчин солі, розчинність якої у робочому діапазоні температур збільшується з ростом температури. У цьому випадку має місце саморегулювання концентрації розчину за рахунок температурної залежності розчинності.

Критерієм гідродинамічної стабільності зони градієнта концентрації ставка є позитивність похідною:

$$\frac{d\rho(c,T)}{dx} = \left(\frac{\partial\rho}{\partial c}\right)_T \frac{dc}{dx} + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_c \frac{dT}{dx} > 0 \quad (4.1)$$

де ρ , c , T відповідно густина, концентрація і температура розчину; x – координата, відраховується в напрямку від поверхні ставка до його дна.

Насичені ставки при використанні солей, що задовольняють критерію (4.1) можуть бути гідродинамічно стабільними, і для них не потрібен спеціальний контроль за концентрацією розчину. Це спрощує конструкцію і обслуговування сонячного ставка. Однак насичені сонячні ставки в порівнянні з ненасиченими мають ряд недоліків. Для створення насичених сонячних ставків потрібна велика кількість солі, що може привести до надмірного збільшення вартості ставка. В процесі роботи при його охолодженні надлишок солі випадає на дно, що погіршує поглинання сонячного випромінювання і відповідно призводить до зменшення ККД. На ефективність перетворення сонячної енергії негативно позначається також помітне погіршення прозорості розчину через великий вміст в ньому солі.

При експлуатації дестабілізованих ставків:

- вода під дією сонячних променів починає прогріватись від дна;
- при підвищенні температури густина води змінюється;

- тепліша рідина піднімається на поверхню водойми і поступово віддає свою теплоту повітрю.

В стабілізованому ставку даний процес виключається за рахунок використання шарів води різної солоності. Крім того, концентрація солі в придонному шарі сонячного ставка в процесі нагрівання підвищується, оскільки при підвищенні температури, розчинність солі збільшується.

Температурні показники і тепловіддача сонячного ставка залежать від ряду факторів:

- активність сонячної радіації в певному районі;
- ступінь прозорості атмосфери;
- показники прозорості прісної води, що знаходиться в верхньому шарі ставка;
- концентрація розсолу в різних шарах ставка;
- якість теплової ізоляції на дні і бокових стінках ставка;
- наявність концентраторів для концентрації сонячного випромінювання;
- наявність чи відсутність вітру.

Порядок виконання роботи:

Заповнити сонячний ставок трьома шарами води. Верхній прошарок в сонячному ставку заповнюється прісною водою, товщина шару має становити 5 см. В якості вимоги до даного шару – має забезпечуватись гладкість поверхні, яка дозволить підвищити рівень поглиненого сонячного випромінювання, і прозорість води. Верхній шар сонячного ставка називається конвективною зоною.



Рис. 4.2 – Зображення сонячного ставка (праворуч).

Далі розташовується шар, який виконує роль ізоляції. Концентрація солі в ньому збільшується зверху вниз. Даний шар називається термоклин. В даному шарі температурні показники розподіляються максимально різко, рівень солі в розчині також розподіляється нерівномірно. Характеристики сонячного ставка безпосередньо залежать від даного шару. Для приготування сольового розчину використовується хлорид магнію (або хлорид натрію).

Третій шар складається в розсолу. На 1 м^2 площі ставка необхідно 500-1000 кг хлорид магнію (або хлорид натрію). Дно сонячного ставка пофарбовано селективною фарбою.

Після заповнення ставка, його необхідно накрити скляною кришкою для запобігання процесам випаровування води з прісного шару. На кожному рівні розчинів встановлюються давачі температури (рис. 4.3)

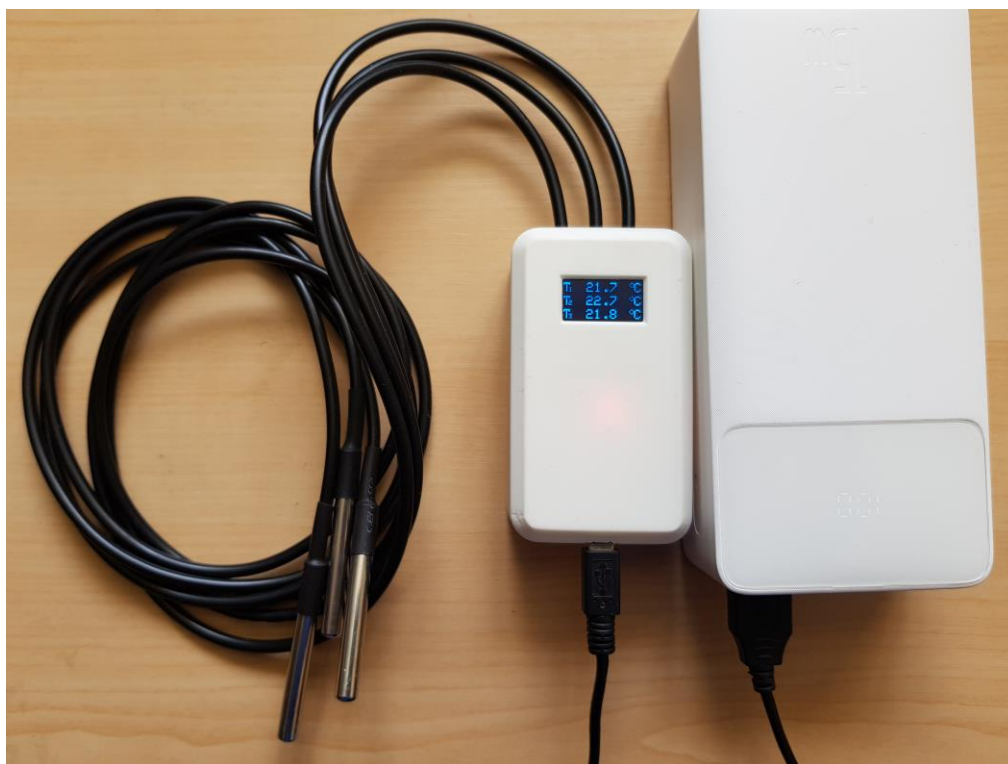


Рис. 4.3 – Триканальний цифровий термометр.

Встановити систему «штучне сонце». Нагрівати ставок протягом 2-3 годин, після чого, протягом 2-х годин фіксувати температуру з трьох датчиків температури і побудувати графік залежності температури від часу при процесах нагрівання та охолодження ставка.

Кількість акумульованої теплоти визначається за формулою

$$Q = G \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1), \text{ кДж,}$$

де G – маса насиченого розчину бішофіту, кг;

C_p – теплоємність насиченого розчину бішофіту;

T_2, T_1 – початкова і кінцева температури води в першому шарі сонячного ставка, °C.

Контрольні запитання

1. Стабілізовані та дестабілізовані сонячні ставки.
2. Що таке «термоклин»?
3. Класифікація стабілізованих сонячних ставків.

Література:

1. John A. Duffie, William A. Beckman, Nathan Blair Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / Fifth Edition – Wiley, 2020. – 919 p.
2. Сонячна теплоенергетика: розрахункова робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів денної форми навчання за освітньою програмою підготовки «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Вишневська Ю.П. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,15 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 27 с. – Назва з екрана. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53765>
3. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. – Київ.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2012. – 489 с.
4. Дослідження режимів роботи та ефективності плаского сонячного колектора типу SKN 3.0 / Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи №1 з дисциплін по використанню нетрадиційних джерел енергії для студ. спец. «Теплоенергетика» та «Нетрадиційні джерела енергії» / уклад.: Варламов В.Б., Приймак К.О., Тімакова Т.В., Новаківський Є.В., Филоненко Ю.С.– Київ : НТУУ «КПІ», 2010. – 42 с.
5. Сонячна теплоенергетика: розрахункова робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів денної форми навчання за освітньою програмою підготовки «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Вишневська Ю.П. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,15 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 27 с. – Назва з екрана. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53765>