

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до практичних занять
із навчальної дисципліни

«СОНЯЧНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності G4 – Енерговиробництво,
спеціалізації G4.03 – Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2025**

Методичні рекомендації до практичних занять із навчальної дисципліни «Сонячна теплоенергетика» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G4 – Енерговиробництво, спеціалізації G4.03 – Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Я. Б. Форкун. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 48 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент

О. Б. Єгоров, кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 2 від 26 вересня 2025 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ.....	6
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОТУ І МЕХАНІЧНУ РОБОТУ.....	
1.1 Теоретичні питання змістового модуля	8
1.2 Приклади розв’язання задач.....	9
Контрольні запитання.....	18
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ І ОПАЛЕННЯ.....	
2.1 Теоретичні питання змістового модуля	19
2.2 Приклади розв’язання задач.....	21
Контрольні запитання.....	34
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3 СОНЯЧНІ ТЕПЛОВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	
3.1 Теоретичні питання змістового модуля	35
3.2 Приклади розв’язання задач.....	36
Контрольні запитання.....	42
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43
ДОДАТКИ.....	45

ВСТУП

Використання нетрадиційних відновлюваних джерел енергії актуальне для всіх країн світу. Для розвинених країн, що імпортують паливно-енергетичні ресурси, – це забезпечення енергетичної безпеки; для розвинених країн, що мають свої запаси палива, – поліпшення екологічної ситуації; для країн, що розвиваються, – спосіб поліпшити соціально-побутові умови мешкання населення. Ці джерела енергії розглядають як істотне доповнення до традиційних.

Нетрадиційна (альтернативна) енергетика – сукупність перспективних способів отримання, передачі та використання енергії, які поширені не так широко, як традиційні, проте становлять інтерес через вигідність їх використання при низьких ризиках заподіяння шкоди навколишньому середовищу.

Альтернативне джерело енергії є відновлюваним ресурсом. Відновлювані ресурси – природні ресурси, запаси яких або відновлюються швидше, ніж використовуються, або не залежать від того, використовуються вони чи ні, тобто енергія отримується з практично невичерпних природних ресурсів і явищ. Цей термін був введений в обіг як протиставлення поняттю «невідновлювані ресурси», тобто ресурси, запаси яких можуть бути вичерпані вже найближчим часом при існуючих темпах використання. Традиційні джерела енергії функціонують на нафті, природному газі та вугіллі, які при згорянні виділяють в атмосферу вуглекислий газ, що сприяє зростанню парникового ефекту і глобального потепління.

В сучасній світовій практиці до відновлюваних джерел енергії відносять: гідро, сонячну, вітрову, геотермальну, гідравлічну енергії, енергію морських течій, хвиль, припливів, температурного градієнта морської води, різниці температур між повітряною масою і океаном, тепла Землі, біомасу тваринного, рослинного і побутового походження. Використання відновлюваних видів енергії придбало відчутні масштаби і стійку тенденцію до росту.

Серед відновлюваних джерел енергії сонячна радіація за розмірами ресурсів і поширеності найбільш значуща, тому розвиток геліоенергетики є найбільш перспективним. Сонячна енергетика – галузь альтернативної енергетики, заснована на безпосередньому використанні сонячного випромінювання для отримання електричної або теплової енергії в будь-якому зручному для його застосування вигляді. За характером використовуваного обладнання і принципами отримання енергії геліоенергетику можна розділити на два основних види: сонячну фотоенергетику та сонячну теплоенергетику. Останній напрям геліоенергетики пов'язаний із перетворенням сонячної енергії в теплову, яку використовують у системах гарячого водопостачання та опалення будівель. Крім того, тепла енергія може бути використана опосередковано – для отримання електроенергії шляхом концентрації сонячного випромінювання дзеркалами, нагрівання робочого тіла до пароподібного стану та подальшого приведення в дію традиційного енергогенерувального обладнання.

Методичні рекомендації підготовлені на основі робочої програми дисципліни «Сонячна теплоенергетика» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітньої програми «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» (за новим переліком спеціальностей та галузей знань – G4.03 – Енерговиробництво (Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика) з метою допомогти їм під час підготовки до практичних занять, лабораторних робіт, диференційованого заліку та виконання курсової роботи.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Метою викладання навчальної дисципліни «Сонячна теплоенергетика» є вивчення фізичних основ перетворення енергії сонячного випромінювання в теплоту і механічну роботу, застосування сонячної енергії в системах гарячого водопостачання і опалення будинків, вивчення принципу роботи сонячних теплових електростанцій, тобто формування у студентів належного рівня знань про аспекти сучасної сонячної теплоенергетики для подальшого застосування цих знань при виконанні виробничих завдань, безпосередньо пов'язаних з їхнім фахом.

Вивчення дисципліни безпосередньо спирається на дисципліни: «Загальна фізика», «Вища математика», «Термодинаміка та тепломасообмін в установках альтернативної енергетики». Відповідно до структурно-логічної схеми у формі графа, що представлена в освітньо-професійній програмі (далі – ОПП) «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» 2024 року, дисципліна передуює курсовій роботі «Розробка установки з використанням сонячної теплової енергії», дисципліні «Акумуляування енергії та передача на відстань» та кваліфікаційній роботі (дипломний проєкт бакалавра).

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен:

- знати фізичні аспекти використання теплової енергії сонця та фізичні основи перетворення енергії сонячного випромінювання в інші види енергії;
- знати метод перетворення сонячної енергії в теплову енергію з використанням плоских та трубчастих колекторів та принцип їх дії, основні типи конструкцій перетворювачів сонячної енергії та їх характеристики, конструкцію, принцип дії та особливості експлуатації сонячних теплоенергетичних установок;
- вміти обирати обладнання сонячних теплоенергетичних установок різного призначення;
- вміти оцінювати потенціал енергозбереження на об'єкті після застосування сонячних теплоенергетичних установок;
- знати та вміти використовувати методики вибору обладнання сонячних теплоенергетичних установок побутового і промислового призначення;

– знати і розуміти методи, що використовуються для розрахунку енергетичних характеристик та проєктування геліоустановок й методи дослідження основних параметрів геліоустановок;

– отримати знання основних підходів до побудови теплових сонячних колекторів та вміння використовувати їх при проєктуванні геліоустановок;

– вміти проводити розрахунки сонячних теплоенергетичних установок і обирати відповідне обладнання;

– мати певні компетентності, а саме: здатність використовувати базові знання з фізики, математики та теплотехніки для вирішення практичних задач в галузі сонячної теплоенергетики, аналізувати науково-технічну інформацію, розраховувати режими роботи сонячних теплоенергетичних установок різного призначення, визначати склад обладнання та його параметри.

«Сонячна теплоенергетика» є професійною дисципліною, яка вивчається в 4 семестрі згідно з ОПП «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», що затверджена в 2024 році. Обсяг дисципліни складає 4 кредити ЄКТС (120 годин).

Дисципліна містить три змістових модулі (далі – ЗМ):

– ЗМ 1 Сонячне випромінювання. Перетворення сонячної енергії в теплоту і механічну роботу;

– ЗМ 2 Застосування сонячної енергії в системах гарячого водопостачання і опалення;

– ЗМ 3 Сонячні теплові електростанції.

Впродовж вивчення дисципліни передбачаються лекції (1 година на тиждень); практичні заняття (1 година на тиждень); лабораторні заняття (1 година на тиждень), самостійна робота (72 години у розрахунку на 16-тижневий семестр). Форма підсумкового контролю – диференційований залік.

На практичних заняттях студенти опрацьовують теоретичні питання кожної теми певного змістовного модуля, розв’язують задачі, пишуть контрольні роботи та проходять усне опитування за питаннями, що наведені в цих методичних рекомендаціях.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОТУ І МЕХАНІЧНУ РОБОТУ

1.1 Теоретичні питання змістового модуля

У ЗМ 1 передбачено вивчення двох тем:

- тема 1 «Сонячне випромінювання» (3 години практичних занять);
- тема 2 «Перетворення сонячної енергії в теплоту і механічну роботу»

(3 години практичних занять).

Тема 1 містить такі теоретичні питання:

- потенційні можливості сонячної енергії: визначення, фізичний та біологічний варіанти геліоенергетики, переваги та недоліки;
- космічне сонячне випромінювання, його складові;
- вплив земної атмосфери, визначення оптичної маси атмосфери, розсіювання, відбивання, поглинання атмосферою сонячного випромінювання;
- оцінювання сонячної енергії: статистичні вимірювання, світлий час доби як міра опромінення, доля потоку випромінювання;
- визначення наявної кількості сонячної енергії: геометрія Землі та Сонця;
- оптимальна орієнтація розташування приймача відносно Сонця, зміна густини потоку сонячного випромінювання на протязі доби.

Тема 2 містить такі теоретичні питання:

- поняття сонячного колектора, класифікація сонячних колекторів, принцип роботи сонячних колекторів;
- основні характеристики сонячних колекторів: пропускання випромінювання прозорим покриттям геліоколектора; відбивання на границі розділу середовищ, пропускну здатність скляного покриття та приведена пропускну здатність геліоколектора:
- вплив орієнтації колектора на пропускну та поглинальну здатності;
- особливості конструкції сонячних колекторів плоского типу;
- повітронагрівачі;
- використання селективних покриттів у сонячних колекторах.

1.2 Приклади розв'язання задач

ЗАДАЧА 1

Потенціал сонячної енергії

У Києві (географічна широта $\varphi = 50^\circ$) потрібно визначити потенційну кількість сонячної енергії, яка досягає поверхні Землі, якщо відомо, що стала сонячної радіації $I_0 = 1\,367 \text{ Вт/м}^2$, схилення Сонця $\delta = 23,5^\circ$, а кут нахилу освітлюваної поверхні до горизонту – $\beta = 30^\circ$. Розглядаємо момент місцевого полудня $t = 12:00$.

Розв'язок

Визначаємо інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальній поверхні $I_{\text{гор}}$ Землі, яка залежить від кута падіння променів. Цей кут також пов'язаний з косинусом кута зенітного положення Сонця. Формула для розрахунку $I_{\text{гор}}$ без урахування атмосфери має вигляд:

$$I_{\text{гор}} = I_0 \cdot \cos Z,$$

де I_0 – сонячна стала;

Z – зенітний кут Сонця.

Сонячна стала – це потік енергії від Сонця, що падає на одиницю площі, перпендикулярної до сонячних променів, на верхній межі атмосфери Землі, коли Земля перебуває на середній відстані від Сонця. Її середнє значення становить – $I_0 = 1\,367 \text{ Вт/м}^2$.

У спеціальній літературі можна зустріти різні позначення сонячної сталої:

– I_0 , коли підкреслюється, що це інтенсивність випромінювання (потужність на одиницю площі);

– E_0 , коли розглядається як енергія випромінювання на одиницю площі (аналогічна фізична величина, але інколи подається в інших одиницях, наприклад $\text{кДж/м}^2 \cdot \text{год}$).

Зенітний кут Z – це кут між сонячним променем і нормаллю до горизонтальної поверхні в точці A . Кут зазвичай вимірюється від зенітної точки

(вертикальної лінії) до напрямку сонячного променя. На момент, коли Сонце перебуває прямо в зеніті, зенітний кут дорівнює 0° , а коли сонце на горизонті – « 90° ».

$$\cos Z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega,$$

де $\varphi = 50^\circ$ – географічна широта;

$\delta = 23,5^\circ$ – схилення Сонця;

ω – годинний кут.

Географічна широта визначається як кут між лінією, що сполучає деяку точку А на поверхні Землі з центром Землі О, і проєкцією цієї лінії на площину екватора.

Схилення Сонця δ – це кут між лінією, що сполучає центри Землі і Сонця, і її проєкцією на площину екватора. Схилення Сонця $\delta = 23,5^\circ$ настає під час літнього сонцестояння в Північній півкулі приблизно 21 червня. Протягом року схилення Сонця змінюється від $+23,5^\circ$ (літнє сонцестояння в Північній півкулі) до $-23,5^\circ$ (зимове сонцестояння в Північній півкулі), проходячи через 0° під час весняного та осіннього рівнодень.

Годинний кут ω обчислюють за формулою:

$$\omega = 15^\circ \cdot (t - 12),$$

де t – час у годинах (по місцевому сонячному часу).

Остання формула походить із того, що Земля обертається навколо своєї осі на 360° за 24 години, тобто за 1 годину Сонце «пересувається» по небесній сфері на 15° .

Якщо $t = 12$ маємо сонячний полудень (Сонце в зеніті); якщо $t > 12$ Сонце вже «західніше» від меридіана та $\omega > 0$; якщо $t < 12$ – Сонце «східніше», тобто $\omega < 0$.

За умовою задачі розглядаємо момент місцевого полудня $t = 12$, отже:

$$\omega = 15^\circ \cdot (12 - 12) = 0^\circ,$$

$$\cos Z = \sin 50^\circ \cdot \sin 23,5^\circ + \cos 50^\circ \cdot \cos 23,5^\circ \cdot \cos 0^\circ = 0,766 \times 0,3987 +$$

$$+ 0,6428 \times 0,9171 \times 1 = 0,3054 + 0,5895 = 0,8949,$$

$$Z = \arccos 0,8949 \approx 26,5^\circ.$$

Інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальній поверхні $I_{\text{гор}}$ дорівнюватиме:

$$I_{\text{гор}} = 1\,367 \times 0,894\,9 \approx 1\,223,33 \text{ Вт/м}^2.$$

Визначаємо потенційну кількість сонячної енергії, що досягає поверхні Землі в умовах заданої географічної широти, при розрахованій інтенсивності випромінювання $I_{\text{гор}}$ та оптимальному нахилі поверхні приймача ($\beta = 30^\circ$) за виразом, Вт:

$$P = I_{\text{гор}} \cdot \cos \beta \cdot A = I_{\text{пох}} \cdot S,$$

де S – площа сонячного приймача, м^2 ;

β – кут нахилу поверхні до лінії горизонту, $\beta = 30^\circ$.

Припустимо, що площа сонячного приймача становить $S = 1 \text{ м}^2$, тоді:

$$P = 1\,223,33 \cdot \cos 30^\circ = 1\,059,5 \text{ Вт}.$$

Поданий метод з використанням множника $\cos \beta$ дозволяє достатньо просто врахувати нахил поверхні приймача і дає цілком коректну оцінку потенційної сонячної енергії в ясний день на похилу поверхню. Для швидких розрахунків цього цілком достатньо. У більш точних моделях застосовують так званий коефіцієнт відношення радіації на похилу площину до горизонтальної:

$$R_b = \cos (Z - \beta) / \cos Z.$$

Цей коефіцієнт уточнює геометрію падіння променів. Його використання особливо важливе, коли кут нахилу β близький до зенітного кута Z . З використанням цього коефіцієнту інтенсивність сонячного випромінювання на похилій поверхні Землі дорівнюватиме:

$$I_{\text{пох}} = I_{\text{гор}} \cdot R_b.$$

Проте на базовому рівні, як у нашому прикладі ($\beta = 30^\circ$, $Z \approx 26,5^\circ$), різниця між обома підходами існує, але невелика і можна не перевантажувати розрахунок.

В додатку А наведена порівняльна таблиця розрахунку інтенсивності сонячного випромінювання для широти 50° , $\beta = 30^\circ$, $\omega = 0^\circ$ (полудень) при спрощеному ($I_{\text{пох}} \approx I_{\text{гор}} \cdot \cos \beta$) та уточненому розрахунку ($I_{\text{пох}} = I_{\text{гор}} \cdot R_b$) для періоду з квітня по вересень 2025 року з інтервалом в 15 діб.

ЗАДАЧА 2

Вплив атмосфери на сонячне випромінювання

Відомо, що коефіцієнт розсіювання сонячного випромінювання в атмосфері $k_{\text{розс}} = 0,3$; пряма сонячна радіація $I_{\text{пр}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$; альbedo поверхні $\rho = 0,25$.

Необхідно:

- розрахувати сумарну сонячну радіацію, що досягає поверхні Землі, враховуючи атмосферні ефекти;
- оцінити, який відсоток потоку сонячної енергії блокується атмосферними явищами, і який потік досягає земної поверхні.

Розв'язок

Розраховуємо сумарну сонячну радіацію, враховуючи атмосферні ефекти.

В атмосфері сонячне випромінювання зазнає розсіювання, поглинання і відбиття, що зменшує його інтенсивність на земній поверхні. Ми враховуємо це при визначенні сумарного енергетичного потоку. Таким чином (три основні складові сонячної радіації, яка доходить до земної поверхні):

$$I_{\text{сум}} = I_{\text{пр}} + I_{\text{розс}} + I_{\text{альbedo}}, \quad (1)$$

де $I_{\text{пр}}$ – пряма сонячна радіація;

$I_{\text{розс}}$ – частина світла, яка була розсіяна атмосферою, але все ж досягла Землі, тобто саме дифузне випромінювання;

$I_{\text{альbedo}}$ – відбите випромінювання (альbedo), світло, яке відбилося від поверхні Землі і може потрапити на інші об'єкти.

Пряма сонячна радіація – це потік сонячного випромінювання, який доходить до земної поверхні без змін напрямку, тобто без розсіювання чи відбиття в атмосфері. Формула для розрахунку:

$$I_{\text{пр}} = I_0 \cdot e^{-\tau m},$$

де τ – коефіцієнт поглинання атмосфери;

m – оптична маса атмосфери (залежить від кута Сонця над горизонтом).

Величина τ показує, яка частина сонячного випромінювання поглинається молекулами газів, водяною парою, аерозолями та іншими частинками в атмосфері, перш ніж досягти земної поверхні. Чим вище τ , тим більше сонячного випромінювання поглинається і менше доходить до земної поверхні.

Типові значення τ для різних умов:

- для чистого сухого повітря (у горах) $\tau = 0,1 - 0,2$;
- для звичайних атмосферних умов (помірний клімат) $\tau = 0,2 - 0,3$;
- при вологому повітрі, тумані, смогу $\tau = 0,3 - 0,5$;
- для умов сильного забруднення повітря, високій вологості $\tau > 0,5$.

Оптична маса атмосфери – це безрозмірна величина, що показує, у скільки разів шлях сонячного випромінювання крізь атмосферу довший, ніж при вертикальному падінні (коли Сонце знаходиться в зеніті):

$$m = \frac{1}{\cos Z}.$$

Існує емпірична формула для реальної атмосфери, яка точніша для малих кутів Сонця над горизонтом (великих зенітних кутів):

$$m = \frac{1}{\cos Z + 0,50572 \cdot (96,07995^\circ - Z)^{-1,6364}}.$$

У таблиці 1 надані приблизні значення оптичної маси атмосфери (m) залежно від висоти Сонця.

Таблиця 1 – Приблизні значення m залежно від висоти Сонця

Висота Сонця над горизонтом h	Зенітний кут $Z=90^\circ-h$	Оптична маса m
90° (Сонце в зеніті)	0°	1,0
60°	30°	1,15
45°	45°	1,41
30°	60°	2,00
15°	75°	3,86
5°	85°	10,3

Чим більша m , тим більше поглинання і розсіювання світла в атмосфері:

- на світанку або заході Сонця ($m \approx 10$) майже весь синій спектр розсіюється, тому ми бачимо Сонце червоного кольору;

- при ще більшому m (наприклад, коли Сонце майже за горизонтом) випромінювання практично повністю поглинається, і Сонце зникає з виду, тобто $m \rightarrow \infty$, а Сонце на горизонті ($Z = 90^\circ$), випромінювання майже не доходить до поверхні.

Розсіяна сонячна радіація $I_{\text{розсіюв}}$ – це частина сонячного випромінювання, яка змінила свій напрямок через розсіювання в атмосфері на молекулах газів, аерозолях, пилу, хмарах. Загальна енергія $I_{\text{розсіюв}}$, яка зазнала розсіювання, але ще не обов’язково досягла Землі, визначається так:

$$I_{\text{розсіюв}} = I_0 \cdot (1 - e^{-\tau \cdot m}),$$

де $e^{-\tau \cdot m}$ – частина випромінювання, що не була розсіяна.

Дифузне випромінювання – це саме та частина розсіяного випромінювання, яка досягла поверхні Землі:

$$I_{\text{розс}} = k_{\text{розс}} \cdot I_{\text{пр}},$$

де $k_{\text{розс}}$ – коефіцієнт розсіювання сонячного випромінювання атмосферою;

$I_{\text{пр}}$ – інтенсивність прямої сонячної радіації.

Коефіцієнт розсіювання сонячного випромінювання в атмосфері – це величина, що характеризує частку сонячної радіації, яка розсіюється в атмосфері та доходить до поверхні Землі у вигляді дифузного випромінювання. Його значення залежить від атмосферних умов.

Приблизні значення коефіцієнта розсіювання:

- для чистого неба $k_{\text{розс}} \approx 0,1-0,2$;
- для злегка затьмареного неба $k_{\text{розс}} \approx 0,3-0,4$;
- для хмарного неба $k_{\text{розс}} > 0,5$.

Формула для розрахунку відбитого від поверхні Землі випромінювання, що відбилося і може потрапити на інші об’єкти ($I_{\text{альбедо}}$):

$$I_{\text{альбедо}} = \rho \cdot (I_{\text{пр}} + I_{\text{розс}}),$$

де ρ – коефіцієнт альбедо поверхні.

Типові значення альбедо ρ для різних поверхонь:

- 0,02–0,10 для відкритого моря;
- 0,1–0,2 для лісів;
- 0,15–0,26 для трави;
- 0,3–0,45 для пісків;
- 0,6–0,9 для снігу;
- 0,4–0,8 хмари;
- 0,3 для земля в середньому.

Здійснюємо усі необхідні розрахунки:

– інтенсивність розсіяної радіації $I_{розс} = k_{розс} \cdot I_{пр} = 0,3 \times 1\,000 = 300 \text{ Вт/м}^2$;

– відбите випромінювання $I_{альбедо} = \rho \cdot (I_{пр} + I_{розс}) = 0,25 \cdot (1\,000 + 300) = 325 \text{ Вт/м}^2$;

– сумарна сонячна радіація $I_{сум} = I_{пр} + I_{розс} + I_{альбедо} = 1\,000 + 300 + 325 = 1\,625 \text{ Вт/м}^2$.

Оцінюємо втрати через атмосферні явища, тобто скільки енергії перерозподіляють атмосферні явища. Для цього віднімемо сумарну радіацію, що досягає поверхні Землі, від початкової прямої сонячної радіації, отримаємо:

$$(I_{пр} + I_{розс}) - I_{сум} = (1\,000 + 300) - 1\,625 = 1\,300 - 1\,625 = -325 \text{ Вт/м}^2.$$

Також, для зручності оцінки можна визначити, скільки відсотків початкової сонячної радіації досягає земної поверхні:

$$\frac{I_{сум}}{I_{пр} + I_{розс}} \cdot 100\% = \frac{1625}{1300} \cdot 100\% \approx 125\%.$$

Робимо висновки:

– загальна інтенсивність сонячної радіації, що досягає поверхні Землі, становить 1 625 Вт/м;

– атмосфера перерозподіляє випромінювання, атмосферні процеси розсіювання і відбиття збільшують потік сонячної радіації на Землі на 25 % відносно початкового прямого потоку, $100\% - 125\% = -25\%$ (відсоток збільшено через відбиття та розсіювання).

ЗАДАЧА 3

Визначення оптимальної орієнтації сонячного приймача

Для забезпечення максимальної ефективності роботи сонячних енергетичних систем необхідно правильно орієнтувати поверхню приймача відносно Сонця. Відомо, що сонячний приймач встановлено у місцевості з географічною широтою $\varphi = 45^\circ$, а схилення Сонця у цей день становить $\delta = 23,5^\circ$. Кут нахилу поверхні приймача відносно горизонту дорівнює $\beta = 35^\circ$. Час доби – $t = 14:00$.

Необхідно:

- знайти зенітний кут Z Сонця, висоту сонця над горизонтом H ;
- визначити оптимальну орієнтацію сонячного приймача для максимальної інтенсивності сонячного випромінювання.

Розв'язок

Розраховуємо зенітний кут, косинус якого визначається за формулою:

$$\cos Z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega,$$

де φ – географічна широта;

δ – схилення Сонця;

ω – годинний кут.

Обчислюємо годинний кут ω за формулою:

$$\omega = 15^\circ \cdot (t-12),$$

де t – місцевий сонячний час у годинах,

12 – година, коли Сонце знаходиться у найвищій точці (на півдні).

Для часу доби $t = 14:00$ маємо:

$$\omega = 15^\circ \cdot (14 - 12) = 30^\circ.$$

Підставляємо усі значення в формулу для косинуса зенітного кута о 14:00:

$$\cos Z = \sin 45^\circ \cdot \sin 23,5^\circ + \cos 45^\circ \cdot \cos 23,5^\circ \cdot \cos 30^\circ = 0,843.$$

$$Z = \arccos 0,843 \approx 33,6^\circ.$$

Визначаємо висоту Сонця над горизонтом, тобто кут між напрямком на Сонце та горизонтом. Висота пов'язана із зенітним кутом формулою:

$$H = 90^\circ - Z,$$
$$H = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ.$$

Отже, висота Сонця над горизонтом о 14:00 становить 60° .

Обґрунтовуємо оптимальну орієнтацію сонячного приймача.

Кут нахилу приймача β визначає, наскільки панель нахилена відносно горизонту, а азимут γ – в якому напрямку вона орієнтована. Для максимальної ефективності сонячний приймач повинен бути орієнтований так, щоб його поверхня була перпендикулярна до напрямку сонячних променів. Оптимальний кут β залежить від широти, і впливає на ефективне поглинання сонячного випромінювання.

Проаналізуємо, чому за умовами задачі кут нахилу поверхні обрано $\beta = 35^\circ$.

Вибір оптимального кута нахилу залежить від пори року:

- для зимового періоду оптимальний кут приблизно $\varphi + 10^\circ = 55^\circ$;
- для літнього періоду оптимальний кут приблизно $\varphi - 10^\circ = 35^\circ$;
- якщо приймач має бути стаціонарним цілий рік, кут нахилу беруть приблизно рівним широті місцевості або трохи меншим, щоб забезпечити максимальне поглинання сонячного випромінювання в середньому за рік (усереднений нахил, середнє значення між зимовим і літнім кутами):

$$\beta_{\text{середнє}} = (\beta_{\text{зимове}} + \beta_{\text{літнє}})/2 = \varphi.$$

У цій задачі вочевидь розглядається літній період, оскільки $\delta = 23,5^\circ$, тому і вибрано $\beta = 35^\circ$.

Також потрібно враховувати, що для найкращого збору енергії протягом дня, сонячний приймач повинен бути орієнтований по азимуту на південь ($\gamma = 180^\circ$), що і забезпечить максимальну інтенсивність сонячного випромінювання. Можливий інший кліматичний чи технічний фактор,

наприклад, іноді кут зменшують, щоб уникнути перегріву влітку або враховують вплив місцевих умов (сильне розсіювання взимку).

Висновки та підсумок:

- зенітний кут Сонця о 14:00 дорівнює $33,6^\circ$;
- годинний кут Сонця о 14:00 дорівнює 30° ;
- висота Сонця над горизонтом 60° ;
- азимут орієнтації приймача $\gamma=180^\circ$ (південь);
- оптимальна орієнтація сонячного приймача (літній період): поверхня повинна бути спрямована на південь з нахилом 35° .

Контрольні запитання

Після вивчення матеріалу ЗМ 1 студент повинен відповідати на нижче наведені контрольні запитання:

1. Наведіть переваги та недоліки сонячної енергетики.
2. Які кліматичні характеристики необхідно враховувати при реалізації сонячних теплових колекторів?
3. Від чого залежить надходження сонячної радіації до Земної поверхні?
4. Яким чином оцінюється надходження сонячної радіації на поверхню Землі?
5. Яким чином поділяється сонячний спектр?
6. Наведіть області застосування енергії сонця з точки зору отримання теплової енергії.
7. Як впливає траєкторія руху Сонця на кут падіння променів?
8. Наведіть визначення часового, зенітного кута, широті місцевості, азимута.
9. Охарактеризуйте принцип роботи плоского сонячного колектора і перерахуйте його основні елементи.
10. За якими ознаками класифікують сонячні колектори?
11. Як орієнтація та кут нахилу сонячного колектора впливають на максимальне надходження сонячного випромінювання на його поверхню?
12. Як змінюють кут нахилу сонячного колектора в залежності від пори року?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ І ОПАЛЕННЯ

2.1 Теоретичні питання змістового модуля

У ЗМ 2 передбачено вивчення трьох тем:

- тема 3 «Вакуумні трубчасті сонячні колектори» (2 години практичних занять);
- тема 4 «Конструкція і основи проєктування систем сонячного теплопостачання. Розрахунок енергетичних характеристик систем з сонячними колекторами» (2 години практичних занять);
- тема 5 «Наладка, введення до експлуатації та обслуговування геліоколекторних установок» (2 години практичних занять).

Тема 3 «Вакуумні трубчасті сонячні колектори» містить такі питання:

- трубчасті вакуумні колектори: класифікація (за основними конструктивними та робочими ознаками);
- методи підвищення ефективності, види селективних покриттів у вакуумних трубчастих колекторах;
- порівняльна характеристика плоских та вакуумних трубчастих колекторів (за конструкцією, ефективністю, особливостями практичного застосування, вартістю).

Тема 4 «Конструкція і основи проєктування систем сонячного теплопостачання. Розрахунок енергетичних характеристик систем з сонячними колекторами» містить такі питання:

- основні елементи і класифікація систем сонячного теплопостачання;
- принципові схеми систем сонячного нагріву води;
- вибір типу сонячного колектора та варіанти монтажу сонячних колекторів;
- проєктування геліополя, а саме схеми підключення одноконтурних та багатоконтурних геліополів;
- розрахунок сонячної радіації, що падає на колектор в геліополі;

- проєктування систем сонячного нагріву води;
- типові проєкти систем сонячного теплопостачання;
- сонячні системи гарячого водопостачання (далі – ГВП);
- сонячні системи для підтримки системи опалення;
- особливості використання сонячних систем в виробничому секторі;
- підігрів води в плавальних басейнах.

Тема 4 «Розрахунок енергетичних характеристик систем з сонячними колекторами» містить такі питання:

- методи розрахунку основних енергетичних характеристик систем сонячного теплопостачання (далі – ССТ);
- використання усереднених даних для розрахунку енергетичних характеристик;
- параметри, що використовуються для розрахунку енергетичних характеристик, а саме повний коефіцієнт теплових втрат колектора, оптичний коефіцієнт корисної дії (далі – ККД);
- визначення температури зворотної води;
- акумулювання енергії;
- визначення температури зовнішнього повітря та втрати на прогрів геліоколектора;
- вплив характеру теплового навантаження ССТ;
- вплив теплових втрат колектора і бака-акумулятора на теплову потужність ССТ;
- порівняння розімкнених і замкнених схем ССТ;
- розрахунок систем гарячого водопостачання;
- особливості розрахунку систем сонячного опалення.

2.2 Приклади розв'язання задач

ЗАДАЧА 1

Вибір сонячного колектора для приватного будинку

Родина з 4 осіб, яка мешкає в приватному будинку на Заході України (м. Володимир), бажає встановити сонячний колектор для забезпечення власних потреб гарячою води в період з квітня по вересень. У середньому родина використовує 200 л гарячої води температурою приблизно 50 °С щодня. Початкова температура холодної води приблизно 15 °С. Розглядаються три варіанта колектора, які подані в таблиці 2.

Таблиця 2 – Варіанти сонячних колекторів для забезпечення потреб гарячого водопостачання

Варіант	Тип колектора	ККД η (%)	Площа $S_{\text{кол}}$ (м ²)	Ціна (USD)	Особливості
А	Плоский	50 %	2,0	400	Доступний, але зниження ефективності взимку
В	Вакуумний трубчастий (U-type)	65 %	2,5	800	Краще працює при хмарності й у прохолодну погоду
С	Вакуумний трубчастий (Heat Pipe)	60 %	3,0	900	Висока стабільність в холодну пору року, самоочищення снігом

Необхідно:

- розрахувати щоденну потребу у тепловій енергії для нагріву води;
- обчислити, скільки енергії в середньому виробляє кожен з колекторів за ясного дня, якщо середньодобова інтенсивність сонячного випромінювання за період квітень–вересень становить в середньому $I = 450$ Вт/м², а тривалість ефективного сонячного освітлення складає $t_{\text{еф}} = 10$ годин;
- порівняти ці значення з потребою родини;
- з'ясувати, який варіант забезпечує достатню кількість енергії;
- враховуючи співвідношення ефективність / вартість обрати колектор, обґрунтувати вибір.

Розв'язок

Розрахуємо потребу в тепловій енергії.

Кількість енергії, необхідна для нагрівання води, визначається за формулою:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T,$$

де Q – теплова енергія (Дж);

m – маса води (кг);

$c = 4,18$ кДж/(кг · °С) – питома теплоємність води;

ΔT – різниця температури (°С).

$$Q = 200 \times 4\,180 \times (50 - 15) = 29,3 \text{ МДж}$$

Оскільки $1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3\,600 \text{ Дж}$, тоді $Q = 8,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Розраховуємо корисну енергію для кожного з можливих варіантів.

Щоб перейти від інтенсивності I до кількості корисної енергії, яка надходить за певний час, потрібно врахувати тривалість ефективного сонячного освітлення $t_{\text{еф}}$, площу колектора $S_{\text{кол}}$ та його ККД η .

Тобто розрахунок корисної енергії для кожного з можливих варіантів здійснюємо за формулою:

$$Q_{\text{кор}} = I \cdot S_{\text{кол}} \cdot \eta \cdot t_{\text{еф}},$$

де I – величина, що характеризує усереднене миттєве значення потужності потоку сонячного випромінювання на одиницю площі («скільки Сонце світить у цей момент»).

Варіант А – $Q_{\text{кор}} = 450 \times 2,0 \times 0,5 \times 10 = 4,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Варіант В – $Q_{\text{кор}} = 450 \times 2,5 \times 0,65 \times 10 = 7,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Варіант С – $Q_{\text{кор}} = 450 \times 3,0 \times 0,6 \times 10 = 8,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Робимо практичні висновки:

- вибір колектора є не лише технічним, а й економічним рішенням;
- варіант В підійде родині, яка хоче заощадити і погодиться на незначне зниження комфорту в похмурі дні (компроміс між ціною та продуктивністю);

– варіант С пов'язаний з найвищою вартістю початкових інвестицій, але забезпечує повне покриття потреб і стабільну роботу в будь-яку погоду;

– плоский колектор (варіант А) є нормальним варіантом для дач або сезонного використання, але не для щоденного забезпечення гарячою водою.

ЗАДАЧА 2

Підігрів басейну на дачі

Відкритий басейн площею 20 м^2 (глибина $1,5 \text{ м}$, площа поверхні $13,3 \text{ м}^2$) використовується з травня по вересень. Необхідно підвищити температуру води з 20°C до 26°C . Відомо, що середнє щоденне надходження сонячної енергії влітку складає $E_{\text{сон}} = 5,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$, а ККД плоского колектора – $\eta = 0,5$. Втрати через випаровування та теплообмін складають 30% .

Необхідно визначити, яку площу колекторів потрібно встановити.

Розв'язок

Розрахуємо необхідну теплову енергію Q для підігріву води в басейні на 6°C :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T,$$

де m – маса води (кг),

$c = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ – питома теплоємність води,

ΔT – зміна температури ($^\circ\text{C}$).

$$Q = 20\,000 \times 4,18 \times (26 - 20) = 501\,600 \text{ кДж} = 139,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

А з урахуванням втрат потрібна для підігріву енергія дорівнює:

$$Q_{\text{потрібна}} = 139,3 / 0,7 \approx 199 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Площа колектора S :

$$S = Q_{\text{потрібна}} / (\eta \cdot E_{\text{сон}}) = 199 / (0,5 \times 5,7) \approx 69,8 \text{ м}^2.$$

Робимо практичний висновок – підігрів басейнів вимагає значної площі колекторів, або ж використання вискоєфективних вакуумних трубок і теплоізоляційного покриття поверхні басейну.

З А Д А Ч А З

Розрахунок акумулювання енергії в баку-акумуляторі

Є бак-акумулятор об'ємом $V = 300$ л, заповнений водою. Початкова температура води – $T_1 = 30$ °С, бажана температура – $T_2 = 60$ °С. Система має 4 паралельно з'єднаних плоских колекторів (по 2 м² кожен), а сумарна теплова потужність (P) становить 1,2 кВт.

У системі встановлено чотири плоскі колектори, з'єднані паралельно.

Необхідно визначити, скільки енергії потрібно накопичити в баку, і скільки часу потрібно для цього.

Розв'язок

Розраховуємо масу води.

Спочатку переводимо літри у кубічні метри. Оскільки 1 л = 0,001 м³, отримуємо – 300 л = 0,3 м³.

Густина води становить 1 000 кг/м³ (або 1 г/см³) при температурі 4 °С.

При інших температурах густина води дещо змінюється:

- близько 999,8 кг/м³ за 0 °С;
- близько 998,2 кг/м³ за 20 °С;
- близько 988,0 кг/м³ за 50 °С;
- близько 958,4 кг/м³ за 100 °С.

Маса води:

$$m = V \cdot \rho = 0,3 \times 1\,000 = 300 \text{ кг.}$$

Розраховуємо енергію, потрібну для нагріву:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1).$$

$$Q = 300 \times 4,18 \times (60 - 30) = 37\,620 \text{ кДж} = 10,45 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Розраховуємо час нагріву:

Сумарна теплова потужність 1,2 кВт в цій задачі означає потужність, з якою система сонячних колекторів передає тепло воді в бак-акумуляторі. Іншими словами, це кількість енергії, яку колектори можуть передати воді за

одиницю часу. В нашому випадку система з 4 плоских колекторів (загальною площею 8 м²) здатна генерувати 1,2 кВт теплової енергії. Ця потужність враховує вже всі фактори:

- ефективність колекторів;
- інтенсивність сонячного випромінювання;
- теплові втрати в системі;
- ККД теплообміну.

Отже час нагріву t (год) :

$$t = Q / P,$$

де Q – необхідна енергія (кВт·год);

P – теплова потужність системи (кВт).

$$t = 10,45 / 1,2 \approx 8,7 \text{ год.}$$

Робимо висновки.

Для повного нагріву бака до 60 °С потрібно майже повний сонячний день (8, 7 годин). Але коли в задачі розраховується час нагріву бака – це ідеалізована ситуація, яка не враховує тепловтрати бака (процес передачі тепла від гарячої води через стінки бака в навколишнє середовище). Вони залежать від якості теплоізоляції бака, різниці температур між водою в баку та навколишнім середовищем, площі поверхні бака. У реальних умовах бак-аккумулятор постійно втрачає певну кількість тепла в навколишнє середовище. Саме тому реальний час нагріву буде довшим, ніж розрахунковий 8,7 годин, і чим вища температура води в баку, тим інтенсивніші тепловтрати (вночі або в періоди без сонячного випромінювання бак поступово охолоджується). Саме тому в реальних умовах нагрів може тривати довше або бажана температура не досягається за один день. При проектуванні врахування тепловтрат полягає в здійсненні якісної теплоізоляції бака (зазвичай 5–10 см вискоефективного утеплювача), розрахунку системи із запасом потужності – для повноцінної роботи системи протягом доби бак має бути більшого об'єму, ніж мінімально необхідний.

ЗАДАЧА 4

Вибір схеми підключення: одноконтурна чи двоконтурна

У приватному будинку в Полтавській області планується встановити сонячну систему гарячого водопостачання (далі – ГВП). Кількість вакуумних трубчастих колекторів – 3 шт. Площа одного колектора складає 1,8 м², загальна площа – 5,4 м². Взимку температура вночі може опускатися до мінус 15 °С. Вода буде використовуватись для побутових потреб.

Необхідно обрати схему підключення: одноконтурну або двоконтурну. Обґрунтувати вибір.

Розв'язок

Одноконтурна система – це коли у колектор закачується та сама вода, яку потім споживає користувач. Вода гріється безпосередньо у трубках сонячного колектора і циркулює або природньо (гравітаційно), або примусово (через насос). Мінус такого рішення – при температурі зовнішнього повітря нижче 0 °С, вода може замерзнути і пошкодити трубки. За умовами – температура взимку може сягати мінус 15 °С. Це небезпечно і призведе до дорогого ремонту (вода у трубках може замерзнути, розширитися і розірвати їх або з'єднання).

Двоконтурна система – це коли у в системі ГВП є окремий контур з антифризом (теплоносієм, який не замерзає). Цей антифриз нагрівається в колекторі, проходить через теплообмінник у баку, де і передає тепло воді. Основна вода (яка йде на душ / кухню) не контактує з колектором напряму. Плюс такого рішення – система працює навіть у мороз без ризику пошкодження. Однак така схема є складнішою, бо має теплообмінник, додаткові труби, які безпосередньо пов'язані з ним. Теплообмінник слугує бар'єром між двома контурами (один з антифризом, інший з водою), а додаткові труби необхідні для створення другого замкнутого контуру і забезпечують циркуляцію теплоносія між теплообмінником та системою опалення. Також потрібні додаткові з'єднувальні елементи, клапани, іноді окремий циркуляційний насос для другого контуру. Додаткова складність збільшує початкову вартість системи, потребує більшого простору для встановлення, але забезпечує вищу надійність у холодному кліматі.

Порівняльний аналіз двох схем підключення поданий в таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняльний аналіз одноконтурної та двоконтурної схем

Параметр	Одноконтурна	Двоконтурна
Температура нижче 0 °C	Ризик замерзання	Безпечна завдяки антифризу
Простота та дешевизна	Проста, дешевша	Складніша (теплообмінник, додаткові труби)
Ефективність влітку	Вища (пряме нагрівання)	Нижча на 5–10 % через тепловтрати
Застосування в Україні взимку	Не рекомендовано	Рекомендовано в більшості регіонів

Двоконтурні системи рекомендовані у більшості регіонів України через їх захист від замерзання завдяки антифризу. Однак у південних регіонах країни (наприклад, Одеська, Херсонська, Миколаївська області, Закарпаття), де зими м'якші і температура рідко опускається значно нижче нуля на тривалий час, одноконтурні системи можуть бути прийнятним рішенням. Але існує ризик короточасних заморозків, тому двоконтурні схеми з антифризом лишаються більш надійними, бо забезпечують надійну роботу в морози, дозволяють експлуатацію цілий рік, підходить для вакуумних колекторів, які добре працюють і при низькій температурі повітря.

Таким чином, у кліматичних умовах Полтави доцільно встановлювати двоконтурну систему з антифризом, навіть якщо вона трохи складніша та дорожча, бо вона надійніша і працює взимку без ризику. Одноконтурна система ризикує перемерзанням теплоносія (води), що може призвести до руйнування колекторів. Двоконтурна система передбачає використання незамерзаючої рідини (антифризу), що циркулює по колекторах і передає тепло воді через теплообмінник. Для регіонів з ризиком замерзання доцільно використовувати двоконтурну систему.

ЗАДАЧА 5

Розрахунок теплових втрат плоского колектора в зимовий період

В системі сонячного гарячого водопостачання використовується плоский сонячний колектор площею, яка збирає сонячну енергію $S_k = 2 \text{ м}^2$. Коли температура навколишнього повітря (зимовий період) $T_a = -5 \text{ }^\circ\text{C}$, температура теплоносія в колекторі підтримується на рівні $T_f = 55 \text{ }^\circ\text{C}$. Сонячна радіація, що надходить на поверхню колектора, становить $I = 450 \text{ Вт/м}^2$. Задані технічні характеристики колектора:

- оптичний ККД $\eta_0 = 0,75$;
- повний коефіцієнт теплових втрат $\alpha = 4,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$.

Необхідно визначити:

- яку корисну теплову потужність забезпечує цей колектор в заданих умовах;
- скільки тепла втрачається через колектор у навколишнє середовище.

Розв'язок

Інтенсивність сонячної радіації (випромінювання) означає, що Сонце «світить» з потужністю 450 Вт на кожен квадратний метр. Іншими словами, на кожен м^2 горизонтальної поверхні щосекунди надходить середній миттєвий потік енергії в 450 Дж/с. Якщо така інтенсивність триватиме 1 годину, то кількість енергії складе:

$$Q = I \cdot S \cdot t = 450 \times 1 \times 3\,600 = 1\,620\,000 \text{ Дж}.$$

У більш зручних для енергетики одиницях:

$$1\,620\,000 \text{ Дж} = 1,62 \text{ МДж} = 45 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Оптичний ККД – це максимально можливий ККД колектора, коли немає теплових втрат (тобто $T_f \approx T_a$), тобто коли вся сонячна енергія, що падає на поверхню, перетворюється на тепло.

Його ще називають оптичною ефективністю, бо η_0 враховує:

- відбивання світла від скла;
- поглинання випромінювання абсорбером;
- передачу світла через скло.

Наприклад, якщо $\eta_0 = 0,75$, це означає, що в ідеальних умовах 75 % сонячної радіації перетворюється в тепло (до початку втрат). «Ідеальні умови» означають:

- температура теплоносія дорівнює температурі навколишнього середовища;
- відсутні втрат через теплопровідність, конвекцію або випромінювання;
- маємо чисте скло, правильну орієнтацію.

Повний коефіцієнт теплових втрат – це кількість тепла, яку втрачає 1 м² поверхні колектора при різниці температур у 1 °С між теплоносієм і зовнішнім повітрям. Його вимірюють експериментально на стендах сертифікації (наприклад, Solar Keymark, EN 12975, ISO 9806).

Визначаємо потужність сонячного випромінювання на колектор, тобто скільки сонце подає на 2 м² поверхні:

$$P_{\text{sun}} = I \cdot A_k = 450 \times 2 = 900 \text{ Вт.}$$

Визначаємо загальні тепловтрати (через різницю температур колектор втрачає тепло):

$$P_{\text{втрати}} = \alpha \cdot S_k \cdot (T_f - T_a) = \alpha \cdot S_k \cdot \Delta T = 4,5 \times 2 \times (55 - (-5)) = 4,5 \times 2 \times 60 = 540 \text{ Вт.}$$

Існує таблиця емпірично розрахованих середніх втрат тепла від колектора при різних температурних різницях (ΔT) для площі колектора 1 м² і значенні оптичного ККД $\alpha = 4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – див. таблицю 4. В таблиці площа колектора $S_k = 1 \text{ м}^2$, тому $P_{\text{втрати}} = 4,5 \cdot 1 \cdot \Delta T$. Для колектора площею 2 м² множимо ці значення на 2. Наприклад, при $\Delta T = 60 \text{ °С}$ втрати складають для 1 м² – 270 Вт, для 2 м² – 540 Вт (як у нашій задачі).

Таблиця 4 – Середні втрати тепла

ΔT (°C)	Втрати тепла, Вт
0	0
10	45
20	90
30	135
40	180
50	225
60	270

Визначаємо тепло, що ефективно засвоюється колектором (без втрат):

$$P_{\text{теоретичне}} = \eta_0 \cdot P_{\text{sun}} = 0,75 \times 900 = 675 \text{ Вт.}$$

Визначаємо фактичну корисну теплову потужність:

$$P_{\text{корисна}} = P_{\text{теоретичне}} - P_{\text{втрати}} = 675 - 540 = 675 - 540 = 135 \text{ Вт.}$$

Робимо висновки:

– при зимовій температурі -5°C , навіть при середньому сонячному випромінюванні, великі теплові втрати значно знижують ефективність роботи плоского колектора;

– Сонце подає на колектор 900 Вт, з них у тепло ефективно перетворюється 675 Вт, але 540 Вт одразу втрачаються, тож і виходить, що колектор видає лише 135 Вт корисної теплової потужності з можливих 900 Вт;

– у зимових умовах, коли температура теплоносія значно перевищує температуру повітря, теплові втрати колектора можуть бути дуже великими (колектор втрачає 80 % отриманої енергії), і в таких умовах доцільно застосовувати вакуумні колектори, які мають менші втрати завдяки вакуумній ізоляції.

ЗАДАЧА 6

Розрахунок роботи насосної групи та акумулювального бака в системі ГВП із сонячними колекторами

У приватному будинку встановлена двоконтурна сонячна система гарячого водопостачання з такими параметрами:

- 3 вакуумні паралельно з'єднані трубчасті колектори, площа кожного $1,8 \text{ м}^2$;
- оптична ефективність $\eta_0 = 0,75$;
- коефіцієнт теплових втрат $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- інсоляція складає $I = 700 \text{ Вт}/\text{м}^2$;
- температура теплоносія в колекторі 60°C , зовнішнє повітря 15°C ;
- бак-акумулятор має об'єм 250 л ;
- початкова температура води в баку 20°C ;
- насосна група забезпечує витрату $0,5 \text{ м}^3/\text{год}$ теплоносія та $0,3 \text{ м}^3/\text{год}$ води для забезпечення ГВП (циркуляційний насос); механічні втрати
- теплообмінник має ККД 90% ($\eta_{\text{то}} = 0,9$).

Необхідно визначити:

- скільки теплоти надходить до теплоносія від колекторів за годину;
- скільки з цієї енергії реально потрапить у воду в баку;
- до якої температури нагріється вода в баку;
- який об'єм води можна було б нагріти до 40°C за годину з цієї енергії;
- чи достатньою є подача теплоносія для ефективної передачі тепла від колекторів до бака.

Втрати тепла через теплоізоляцію бака-акумулятора мінімальні і не враховуватимуться під час розв'язання задачі.

Розв'язок

Коефіцієнт теплових втрат α – один з головних параметрів колектора, який визначає, скільки тепла втрачається при різниці температур між теплоносієм і навколишнім середовищем. Це повний коефіцієнт теплових втрат колектора, що має розмірність $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Він показує, яку кількість теплової енергії втрачає 1 м^2 поверхні колектора при різниці температур у 1 К між теплоносієм і повітрям.

Значення α беруть:

- з технічної документації колектора, тобто виробники надають значення α у паспорті до пристрою (наприклад, $\eta_0 = 0,76$; $\alpha = 4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$);
- з експериментального вимірювання;
- використовують усереднені типові значення (для плоского колектора без покриття $\alpha \approx 10\text{--}15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для плоского колектора зі скляним покриттям $\alpha \approx 4\text{--}6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для вакуумного трубчастого колектора $\alpha \approx 1\text{--}2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

Визначаємо площу всіх колекторів:

$$S = 3 \times 1,8 = 5,4 \text{ м}^2.$$

Визначаємо корисну теплову потужність від колекторів за формулою:

$$P_{\text{кор}} = S \cdot (\eta_0 \cdot I - \alpha \cdot (T_{\text{кол}} - T_{\text{пов}})).$$

$$P_{\text{кор}} = 5,4 \times (0,75 \times 700 - 2 \times (60 - 15)) = 5,4 \times 435 = 2\,349 \text{ Вт}.$$

У задачі $T_{\text{кол}} = 60^\circ\text{C}$, як середня робоча температура теплоносія (антифризу) в колекторі під час активного сонячного нагріву. Це типове значення температури для вакуумних трубчастих колекторів на виході у ясний день ($60\text{--}70^\circ\text{C}$), яке потрібне для розрахунку теплових втрат через вираз $\alpha \cdot (T_{\text{кол}} - T_{\text{пов}})$. Тобто, це не максимальна температура, а робоча, потрібна для оцінки ефективності системи.

Визначаємо енергію, яка потрапить до води (з урахуванням втрат теплообмінника) за годину:

$$Q_{\text{кор}} = P_{\text{кор}} \cdot \eta_{\text{то}} \cdot 3\,600 = 2\,349 \times 0,90 \times 3\,600 = 7\,610\,760 \text{ Дж} = 7,61 \text{ МДж}.$$

Визначаємо, до якої температури нагріється вода в баку з урахуванням, що 250 л – це 250 кг:

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{кор}}}{c \cdot m};$$

$$\Delta T = \frac{7,61 \cdot 10^6}{4180 \cdot 250} \approx 7,28^\circ\text{C}.$$

Отже, якщо температура підніметься на 7,3 °С, кінцева температура води дорівнюватиме: $T_{\text{кінц}} = (20 + 7,3) \text{ °С} = 27,3 \text{ °С}$.

Визначаємо, скільки води можна нагріти до 40 °С.

Різниця температур складає – $\Delta T = (40 - 20) \text{ °С} = 20 \text{ °С}$. Тоді:

$$m_{\text{води}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{c \cdot \Delta T};$$
$$m_{\text{води}} = \frac{7,61 \cdot 10^6}{4180 \cdot 20} \approx 91 \text{ кг} = 91 \text{ л}.$$

Визначаємо, чи достатньою є подача теплоносія, щоб передати розраховану кількість теплоти від колекторів до бака, якщо насосна група прокачує теплоносій зі швидкістю 0,5 м³/год.

Оскільки в колекторному контурі використовується антифриз (наприклад, пропіленгліколь), прийmemo його густину приблизно 1030 кг/м³. Тоді:

$$m_{\text{прон}} = 0,5 \times 1\,030 = 515 \text{ кг/год}.$$

Для передачі теплоти $Q = 7,61 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ при перепаді температур $\Delta T = 20 \text{ °С}$, потрібна така маса теплоносія (за теплоємністю води):

$$m_{\text{необх}} = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{7,61 \cdot 10^6}{4180 \cdot 20} \approx 91 \text{ кг}.$$

Навіть якщо врахувати, що теплоємність антифризу дещо нижча (близько 3600 Дж/(кг·К)), потрібна маса буде трохи більшою – приблизно 105 кг.

У будь-якому випадку насосна група подає понад 500 кг/год, що значно перевищує необхідний мінімум. Це означає, що подача теплоносія насосом є більш ніж достатньою для ефективної передачі тепла від колекторів до бака, однак у реальних умовах варто враховувати нижчу теплоємність антифризу.

Отже, теплова потужність від колекторів складає 2 349 Вт; корисна теплова енергія, що передається у бак дорівнює 2,11 кВт · год, вода в баку нагріється з 20 °С до приблизно 27,3 °С за годину, цієї енергії достатньо, щоб нагріти приблизно 91 л води з 20 °С до 40 °С.

Ця задача демонструє узгоджену роботу колекторів, насоса, теплообмінника й бака. Результати показують, що для забезпечення

комфортного ГВП потрібно або збільшити кількість колекторів, або працювати в режимі попереднього нагріву з електричним / газовим догрівом.

Після вивчення матеріалу ЗМ 2 студент повинен відповідати на нижче наведені запитання.

Контрольні запитання

1. Наведіть основні елементи системи гарячого водопостачання.
2. Які матеріали використовуються при створенні систем сонячного ГВП та опалення?
3. Охарактеризуйте теплоізоляційні матеріали для колекторів.
4. Охарактеризуйте теплоносії для сонячних колекторів.
5. Охарактеризуйте матеріали для акумуляторів теплоти: речовини з чутливою (сенсигельною) теплотою; матеріали з прихованою теплотою (фазові); термохімічні матеріали.
6. Перерахуйте типи акумуляторів теплової енергії геліоустановок та охарактеризуйте принципові відмінності між ними.
7. Наведіть основні характеристики акумуляторів теплової енергії геліоустановок.
8. Охарактеризуйте способи циркуляції теплоносія в системі геліоустановки.
9. Яким чином проводять розрахунок площі сонячних колекторів при відсутності та при наявності резервного джерела енергії?
10. Як визначають теплову потужність системи ГВП?
11. Охарактеризуйте можливі принципові теплові схеми сонячного гарячого водо й теплопостачання.
12. Яким чином відбувається виготовлення, монтаж і установка рідинної та повітряної геліосистеми теплопостачання?
13. Який існує зв'язок між тепловим і оптичним ККД колектора?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3 СОНЯЧНІ ТЕПЛОВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1 Теоретичні питання змістового модуля

У ЗМ 3 передбачено вивчення двох тем.

- тема 6 «Принципи побудови та функціонування сонячних теплових електростанцій» (2 години практичних занять);
- тема 7 «Особливості конструкцій сонячних теплових електростанцій» розглядає такі питання (2 години практичних занять).

Тема 6 «Принципи побудови та функціонування сонячних теплових електростанцій» містить такі питання:

- класифікація сонячних теплових електростанцій (далі – СЕС);
- принцип роботи сонячних теплових електростанцій;
- побудова теплових схем енергетичних установок на основі використання паротурбінних циклів;
- вибір робочих тіл для замкнених турбінних циклів.

Тема 7 «Принципи побудови та функціонування сонячних теплових електростанцій» містить такі питання:

- конструкції СЕС баштового типу;
- конструкції СЕС тарілчастого типу;
- конструкції СЕС, які використовують параболічні концентратори;
- особливості експлуатації, монтажу та техніки безпеки.

3.2 Приклади розв'язання задач

ЗАДАЧА

Розрахунок площі приймача та теплових втрат для баштової СЕС

На сонячній електростанції баштового типу встановлено $n = 300 + 2 \cdot N$ геліостатів (N – додаткові геліостати), кожен з яких має площу дзеркала $F_{\Gamma} = 43 \text{ м}^2$. Геліостати відбивають сонячні промені на приймач, на поверхні якого зареєстрована максимальна енергетична освітленість $I_{np} = 2,5 - 0,02 \cdot N \text{ МВт/м}^2$. Коефіцієнт відбиття геліостата $R_{\Gamma} = 0,8$; коефіцієнт поглинання приймача $A_{np} = 0,95$. Максимальна освітленість дзеркала геліостата $I_{\Gamma} = 600 + N \text{ Вт/м}^2$.

Необхідно визначити площу поверхні приймача F_{np} та теплові втрати в ньому, зумовлені тепловим (інфрачервоним) випромінюванням і конвекцією, якщо робоча температура теплоносія становить $t = 550 + N \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ступінь чорності приймача – $\varepsilon_{np} = 0,95$. Конвективні втрати прийняти удвічі меншими, ніж променисті.

В таблиці 5 наведено загальні вирази, символи, сталі і значення що використані в формулах для чисельного розрахунку у випадку $N = 5$.

Таблиця 5 – Загальні вирази, символи, сталі і значення для розрахунку

Позначення	Значення ($N=5$)	Пояснення
N	5	параметр, що задає додаткові геліостати
n	$300 + 2 \cdot N = 310$	кількість геліостатів
F_{Γ}	43 м^2	площа дзеркала одного геліостата
I_{Γ}	$600 + N = 605 \text{ Вт/м}^2$	максимальна освітленість на дзеркалі (DNI для дзеркала)
R_{Γ}	0,8	коефіцієнт відбиття геліостата
A_{np}	0,95	коефіцієнт поглинання приймача
I_{np}	$2,5 - 0,02 \cdot N = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$	максимально допустима густина потоку на приймачі
ε_{np}	0,95	емісивність (ступінь чорності) приймача
t	$550 + N = 555 \text{ }^{\circ}\text{C}$	робоча температура теплоносія
T_s	$t + 273,15 = 828,15 \text{ К}$	температура приймача в Кельвінах
$T_{\text{навк}}$	$25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ або $298,15 \text{ К}$	температура навколишнього середовища (прийнято типове)
σ	$5,670374419 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$	стала Стефана–Больцмана

Пояснення:

- формула для максимальної енергетичної освітленості $I_{np} = 2,5 - 0,02 \cdot N$ «прив'язує» максимально допустиму енергетичну освітленість на приймачі до параметра N , тобто, чим більше N (додаткових геліостатів), тим більше потік, і відповідно зменшується допустима густина I_{np} , щоб моделювати обмеження за перегрівом приймача;

- формула для робочої температура теплоносія також залежить від N ($t = 550 + N$ °C), бо при більшій кількості геліостатів зростає навантаження на приймач і підвищується робоча температура теплоносія, це спрощена лінійна залежність для зручності розрахунку;

- максимальна освітленість на дзеркалі (DNI для дзеркала) є прямим нормальним випромінюванням Сонця (Direct Normal Irradiance), яке падає на площину дзеркала, коли воно точно орієнтоване перпендикулярно до сонячних променів, або це густина сонячного потоку (Вт/м²), яку отримує дзеркало при оптимальному положенні відносно Сонця;

- часові ряди виміряного DNI (дод. Б) беруть з даних метеорологічних станцій (радіометри (піргеліометри) безперервно фіксують значення DNI, DHI (дифузна складова) та GHI (горизонтальна)), з баз даних NASA, NREL, PVGIS, Meteornorm (є багаторічні ряди за 10–30 років з усередненими або погодинними значеннями, за даними національних гідрометеорологічних служб (публікують кліматичні довідники, де подають середньомісячні та добові значення сонячної радіації); за даними власних вимірювань на полігоні або майданчику майбутньої СЕС, де встановлюють метеостанцію для збору даних мінімум за рік;

- емісивність ε (ступінь чорності) приймача є безрозмірним коефіцієнтом (від 0 до 1), який показує, наскільки добре поверхня приймача випромінює теплову енергію порівняно з абсолютно чорним тілом при тій самій температурі;

- у задачі прийнято значення $I_r = 600$ Вт/м², до якого для варіативності додають N , що відповідає типовій прямій сонячній радіації в ясний літній день у середніх широтах (миттєва потужність, пік у ясний день), але реальні баштові СЕС будують в районах із набагато вищим рівнем сонячного випромінювання (субтропіки, тропіки), де характерні значення I_r сягають 800-1000 Вт/м².

Розв'язок

Визначаємо оптичну потужність (добуток кількості дзеркал на їх площу, освітленість та на ефективність відображення і поглинання), що сконцентрована на приймачі від усіх геліостатів Q_{in} :

$$Q_{in} = n \cdot F_{\Gamma} \cdot I_{\Gamma} \cdot R_{\Gamma} \cdot A_{пр}.$$

Підстановка значень для $N=5$ (див. табл.5):

$$Q_{in} = 310 \cdot 43 \cdot 605 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 6\,129\,134 \text{ Вт} \approx 6,129 \text{ МВт}.$$

Визначаємо мінімальну площу приймача за обмеженням по густині потоку $F_{пр(min)}$.

Якщо на приймачі не допускається перевищення $I_{пр}$ (Вт/м²), то мінімальна площа приймача без урахування теплових втрат повинна задовольняти умові:

$$F_{пр(min)} = \frac{Q_{in}}{I_{пр}}.$$

Отже $I_{пр} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $Q_{in} = 6\,129\,134 \text{ Вт}$, тому:

$$F_{пр(min)} = \frac{6129134}{2,4 \cdot 10^6} = 2,5538 \text{ м}^2.$$

Це – мінімальна «теоретична» площа, яка при ідеальній передачі і нульових теплових втратах забезпечила б прийом потужності Q_{in} .

Визначаємо питомі променисті (радіаційні) втрати q_{rad} (нетто) та конвективні втрати q_{conv} .

Нетто-променисті втрати поверхні приймача до навколишнього середовища визначаємо за стандартною формулою:

$$q_{rad} = \varepsilon_{пр} \cdot \sigma \cdot (T_S^4 - T_{навк}^4),$$

де T_S і $T_{навк}$ – абсолютні температури у Кельвінах.

$$T_{навк} = 25 + 273,15 = 298,15 \text{ К}.$$

Обчислюємо за даними $\varepsilon_{\text{пр}}$, σ , T_s , $T_{\text{навк}}$, наведеними в таблиці 5:

$$q_{\text{rad}} = 0,95 \cdot 5,670374419 \cdot 10^{-8} \cdot (828,15^4 - 298,15^4) \approx 24\,912,27 \text{ Вт/м}^2.$$

Це дуже велике значення є типовим для високотемпературних приймачів, воно виражає енергетичну густину випромінювальних втрат.

Конвективні втрати за умовою беремо наполовину від променистих:

$$q_{\text{conv}} = 0,5 \cdot q_{\text{rad}} = 12\,456,14 \text{ Вт/м}^2.$$

Сумарні питомі втрати:

$$q_{\Sigma} = q_{\text{rad}} + q_{\text{conv}} = 1,5 \cdot q_{\text{rad}} = 37\,368,41 \text{ Вт/м}^2.$$

Визначаємо загальні теплові втрати при площі $F_{\text{пр}(\text{min})}$ та чисту корисну потужність.

Загальні втрати для площі $F_{\text{пр}(\text{min})}$:

$$Q_{\text{loss}} = q_{\Sigma} \cdot F_{\text{пр}(\text{min})},$$

$$Q_{\text{loss}} = 37\,368,41 \cdot 2,5538 = 95\,431,66 \text{ Вт}.$$

Чиста (корисна) потужність, що залишається після втрат:

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}} = 6\,129\,134 - 95\,431,66 = 6\,033\,702,34 \text{ Вт} = 6,034 \text{ МВт}.$$

Необхідно відзначити, що при використанні площі $F_{\text{пр}(\text{min})}$ частина оптичної потужності витрачається на теплові втрати; чиста потужність все ще велика, але під час проєктування необхідно врахувати ці втрати.

Визначаємо уточнену площу приймача $F_{\text{пр}}^*$ з урахуванням питомих втрат, щоб забезпечити бажану корисну потужність.

Якщо мета забезпечити на виході ту саму корисну кількість потужності, що подається Q_{in} (в ідеалі), то потрібно, щоб кожен квадратний метр приймача забезпечував не $I_{\text{пр}}$ корисної потужності, а $I_{\text{пр}} - q_{\Sigma}$, бо частина потоку губиться як теплові втрати. Тому уточнена площа визначається як:

$$F_{\text{пр}}^* = \frac{Q_{\text{in}}}{I_{\text{пр}} - q_{\Sigma}}.$$

Цей вираз має сенс тільки якщо $I_{np} > q_{\Sigma}$. Інакше приймач буде термодинамічно неспроможним (витрати більше допустимої щільності).

Отже:

$$I_{np} - q_{\Sigma} = 2,4 \cdot 10^6 - 37\,368,41 = 2\,362\,631,59 \text{ Вт/м}^2.$$

$$\text{Отже} - F_{np}^* = \frac{6129134}{2362631,59} = 2,593 \text{ м}^2.$$

Відповідні втрати при цій площі:

$$Q_{loss}^* = q_{\Sigma} \cdot F_{np}^* = 37\,368,41 \cdot 2,593 = 96892 \text{ Вт}.$$

Чиста корисна потужність після уточнення:

$$Q_{net}^* = Q_{in} - Q_{loss}^* = 6\,129\,134 - 96\,892 = 6\,032\,242 \text{ Вт},$$

що за побудовою практично дорівнює очікуваному (різниця пов'язана з округленнями).

Результати розрахунків (відповіді для прикладу $N=5$):

– оптично-абсорбована потужність на приймачі $Q_{in} = 6\,129\,134 \text{ МВт}$;

– мінімальна площа приймача без урахування втрат $F_{np(min)} = 2,5538 \text{ м}^2$;

– питомі втрати при $T_s = 555 \text{ }^\circ\text{C}$: $q_{rad} = 24\,912,27 \text{ Вт/м}^2$, $q_{\Sigma} = 37\,368,41 \text{ Вт/м}^2$,

$q_{conv} = 12\,456,14 \text{ Вт/м}^2$;

– загальні втрати для $F_{np(min)}$: $Q_{loss} = 95,432 \text{ КВт}$, чиста потужність $Q_{net} = 6,034 \text{ МВт}$;

– уточнена площа з урахуванням втрат: $F_{np}^* = 2,593 \text{ м}^2$.

Робимо висновки.

1. У задачі прийнято спрощені умови, які полегшують розрахунок і дозволяють зосередитися на основних закономірностях. Наприклад, температуру навколишнього середовища беруть стандартною $25 \text{ }^\circ\text{C}$, а конвективні втрати вважають рівними половині променистих. Це лише приблизна оцінка: насправді конвекція залежить від багатьох факторів – швидкості та напрямку вітру, форми й розмірів приймача, умов його розташування. Тому для інженерних проєктів використовують більш складні моделі, які дозволяють точніше оцінити втрати тепла. Зазвичай застосовують

емпіричні кореляції для коефіцієнта тепловіддачі (залежності Нуссельта від числа Релея чи Рейнольдса). Це дозволяє врахувати як природну, так і примусову конвекцію, що впливає на точність розрахунків.

2. Важлива перевірка на наявність умови $I_{\text{пр}} > q_{\Sigma}$. Якщо ця умова порушується, то при заданих температурах і емісивності неможливо забезпечити задану густину потоку без надмірних втрат (потрібно або знизити T_s , або збільшити площу, або зменшити Q_{in}).

3. Для оцінки річної продуктивності та теплових навантажень варто використовувати часові ряди DNI (а не одну фіксовану величину I_g), та включати дифузну складову, похибки системи слідування, затінення та інші побутові фактори, тому в реальності DNI змінюється з часом (протягом дня, місяця, року).

Наприклад, добовий часовий ряд для України в середньому:

- для ясного дня: з 6:00 ранку $\text{DNI} \approx 0$, поступово зростає, досягаючи максимуму близько 900-1000 Вт/м² опівдні, і знову зменшується до нуля о 18:00;

- графік має форму «дзвоника» (параболоїда).

Річний ряд (середньомісячні значення) для України в середньому:

- у січні середній DNI може бути приблизно 150 Вт/м²;

- у травні-липні середній DNI сягає максимуму, приблизно 700–800 Вт/м²;

- у грудні середній DNI знову на рівні 150–200 Вт/м².

- на графіку середній DNI має вигляд хвилі, що підіймається влітку й падає взимку.

3. Часові ряди публікують у базах даних (NASA POWER, Global Solar Atlas), і саме вони використовуються для річного енергетичного балансу та реальних розрахунків СЕС замість умовних «600 Вт/м²», як у задачі. Але потрібно розуміти, що ці дані є усередненими для ясного неба без урахування хмарності.

В додатку Б (табл. Б2 подано значення DNI для України помісячно для помірної сонячної зони (середньорічне значення знаходиться в діапазоні

від 400 Вт/м² до 500 Вт/м²), а також для типової тропічної зони з високим потенціалом для СЕС (м. Ель-Маатга, Марокко, середньорічне значення – близько 700–800 Вт/м²).

Після вивчення матеріалу ЗМ 3 студент повинен відповідати на нижче наведені запитання.

Контрольні запитання

1. Наведіть особливості та область застосування концентруючих геліоприймачів.
2. Наведіть особливості та область застосування плоских геліоприймачів.
3. Оцініть ефективність роботи СЕС.
4. Дайте порівняльну характеристику СЕС баштового й тарілчастого типів.
5. Які рідини можуть використовуватися як робочі тіла у теплових схемах СЕС?
6. Яке устаткування входить до теплової схеми СЕС, дайте його коротку характеристику.
7. Наведіть правила техніки безпеки при експлуатації приводів систем геліостатів.
8. Наведіть особливості механічного монтажу, введення в експлуатацію редукторів трекерів, технічного огляду і обслуговування.
9. Наведіть особливості організації технічного контролю в період будівництва і при прийманні до експлуатації башт сонячних енергоустановок.
10. Охарактеризуйте особливості експлуатації башт сонячних енергоустановок: технічне обслуговування в період експлуатації, состав робіт по технічному обслуговуванню веж СЕС.
11. Охарактеризуйте поточне технічне обслуговування башт сонячних енергоустановок: планово-профілактичне технічне обслуговування, денне маркування і світлозахисне огорожування.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії / О. І. Соловей, Ю. Г. Лега, В. П. Розен [та ін.] ; за ред. О. І. Солов'я. – Черкаси : Вид. ЧДТУ, 2007. – 642 с.
2. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник / С. О. Кудря. – Київ : Національний технічний університет України «КПІ», 2012. – 495 с.
3. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / Під заг. ред. А. К. Шидловського. – Київ: «Українські енциклопедичні знання», 2007. – 560 с.
4. Титко Р. Відновлювальні Джерела Енергії (досвід Польщі для України) : навч. посіб. / Р. Титко, В. М. Калініченко. – Варшава : OWG, 2010. – 530 с.
5. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник / С. О. Кудря. – Київ : Національний технічний університет України «КПІ», 2012. – 495 с.
6. Конспект лекцій з дисципліни «Сонячна теплоенергетика» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма – Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії) [Електрон. ресурс] / уклад. : Я. Б. Форкун, О. О. Шкурпела ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 125 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/55818/>, вільний (дата звернення: 24.08.2025). – Назва з екрана.
7. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Сонячна теплоенергетика» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньої програми – «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. В. Сенецький, Я. Б. Форкун, О. О. Шкурпела. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 28 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/57683/>, вільний (дата звернення: 24.08.2025). – Назва з екрана.

8. Методичні рекомендації до самостійного вивчення дисципліни «Сонячна теплоенергетика» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньої програми — Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. В. Сенецький, Я. Б. Форкун. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 25 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/61744/>, вільний (дата звернення: 24.08.2025). – Назва з екрана.

9. Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту з дисципліни «Сонячна теплоенергетика» за темою «Проектування установки з використанням сонячної теплової енергії» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньої програми – «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») [Електрон. ресурс] / Харків нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. В. Сенецький, Я. Б. Форкун. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 42 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/58549/>, вільний (дата звернення: 24.08.2025). – Назва з екрана.

ДОДАТОК А

Інтенсивність сонячного випромінювання на похилій поверхні

Таблиця А.1 – Розрахунок інтенсивності сонячного випромінювання для широти 50° , $\beta = 30^\circ$, $\omega = 0^\circ$ (полудень): спрощений ($I_{\text{пох}} \approx I_{\text{гор}} \cdot \cos\beta$) та уточнений розрахунок ($I_{\text{пох}} = I_{\text{гор}} \cdot R_b$)

Дата	$\delta, (^\circ)$	$Z, ^\circ$	$I_{\text{гор}}, \text{Вт/м}^2$	R_b	$I_{\text{пох}} \approx I_{\text{гор}} \cdot \cos\beta$	$I_{\text{пох}} = I_{\text{гор}} \cdot R_b$
01.04	+4,6	35,4	1 114	1,087	964	1 211
15.04	+11,3	28,7	1 200	1,058	1 039	1 270
01.05	+14,9	25,1	1 239	1,048	1 072	1 297
15.05	+20,1	19,9	1 288	1,030	1 116	1 326
01.06	+22,0	18,0	1 299	1,026	1 125	1 333
15.06	+23,4	16,6	1 309	1,021	1 133	1 336
21.06	+23,5	16,5	1 311,7	1,073	1 136	1 408
01.07	+23,1	16,9	1 307	1,022	1 131	1 336
15.07	+21,0	19,0	1 295	1,028	1 122	1 332
01.08	+17,4	22,6	1 262	1,040	1 093	1 313
15.08	+13,3	26,7	1 220	1,052	1 058	1 283
01.09	+7,7	32,3	1 151	1,073	997	1 235
15.09	+2,2	37,8	1 079	1,095	934	1 182

Таблиця А.2 – Приблизні значення $I_{\text{пр}}$, $I_{\text{розс}}$, $I_{\text{сум}}$ в різних умовах

Умови	$I_{\text{пр}} (\text{Вт/м}^2)$	$I_{\text{розс}} (\text{Вт/м}^2)$	$I_{\text{сум}} (\text{Вт/м}^2)$
Чисте небо, Сонце в зеніті	900–1 000	100–200	1 000–1 100
Легка хмарність	600–800	200–400	800–1 000
Сильна хмарність	100–300	500–700	600–800
Повністю хмарне небо	≈ 0	200–400	200–400

ДОДАТОК Б

Середні значення прямого нормального випромінювання Сонця (Direct Normal Irradiance, DNI)

Таблиця Б.1 – Середні значення DNI: Україна та райони із сильним сонячним потенціалом

Регіон / країна	Середній річний DNI (кВт · год/(м ² · рік) або еквівалент	Примітки / джерело
Україна (центр, Черкаська область, с. Гельмязів)	$\approx 1\,181$ кВт · год/м ² · рік (SOLARIAN)	Проект у с. Гельмязові, Черкаська область
Україна (загальний рівень)	950–1 500 кВт · год/м ² · рік (greenpeace.de)	Greenpeace, карти сонячного ресурсу
Південна Іспанія (район Севільї)	~ 850 Вт/м ² як «design DNI» у ясний день (ResearchGate)*	Для CSP-проектів задають цей рівень
Пустельні райони (наприклад, Північна Африка / Південна Іспанія)	6,4–6,8 кВт · год/м ² · день ≈ 640 –680 Вт/м ² як середньоденний еквівалент (ecowater-economics.com)	Денне середнє значення прямої нормальної радіації
* Design DNI ≈ 850 Вт/м²» – це розрахункове значення прямої нормальної сонячної радіації, яке приймають при проектуванні сонячних електростанцій у регіонах з високим сонячним потенціалом (пустелі, субтропіки), тобто це типове максимальне значення DNI у ясний день, не середнє за рік, а умовно стабільна потужність сонячного потоку, яку система має витримувати без перевантаження («еталонна» інтенсивність Сонця для розрахунку геометрії та температурних режимів колекторів або геліостатів).		

Таблиця Б.2 – Приклад середньомісячних значень DNI для України (м. Володимир, 50° пн. ш.) та тропічного регіону (м. Ель-Маатга, Марокко, 31° пн. ш.)

Місяць	DNI, Україна (Вт/м ²)	DNI, Марокко (Вт/м ²)	Коментар
Січень	210	560	Зимовий мінімум у помірній зоні, ясне небо в тропіках
Лютий	290	620	Зростання сонячності, в Марокко стабільно високе
Березень	390	690	Початок весни — різке збільшення інсоляції
Квітень	470	740	Оптимальні умови для колекторів у тропіках
Травень	540	780	Максимум весняного сонця в Україні
Червень	580	810	Літній пік у помірній зоні
Липень	570	830	Висока сонячність в обох регіонах
Серпень	530	820	Стабільно високе випромінювання
Вересень	440	760	Зменшення висоти Сонця в Україні
Жовтень	350	680	Початок осіннього зниження
Листопад	250	590	Короткий день, часті хмари
Грудень	200	540	Мінімальна інсоляція року

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації

до практичних занять
з навчальної дисципліни

«СОНЯЧНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності G4 – Енерговиробництво,
спеціалізації G4.03 – Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладач **ФОРКУН** Яна Борисівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*
Редактор *О. В. Михаленко*
Комп'ютерне верстання *Я. Б. Форкун, І. В. Волосожарова*

План 2025, поз. 293М

Підп. до друку 30.10.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,8.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 8386 від 14.07.2025.