

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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



Я. Б. Форкун, О. О. Шкурпела

СОНЯЧНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

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

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026**

Форкун Я. Б. Сонячна теплоенергетика : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G4 – Енерговиробництво, спеціалізація G4.03 – Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» / Я. Б. Форкун, О. О. Шкурпела ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 117 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун,
канд. техн. наук, асист. О. О. Шкурпела

Рецензент

О. Б. Єгоров, кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 4 від 26 листопада 2025 р.

Конспект лекцій складено з метою допомогти студентам спеціальності G4 – Енерговиробництво, спеціалізації G4.03 – Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» під час підготовки до практичних занять, лабораторних робіт, екзамену та виконання курсової роботи

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВУ. ТЕПЛОВІ СОНЯЧНІ КОЛЕКТОРИ	7
1.1 Сонячне випромінювання.....	7
1.1.1 Потенційні можливості сонячної енергії	7
1.1.2 Складові випромінювання. Вплив земної атмосфери.....	10
1.1.3 Оцінювання сонячної енергії.....	17
1.2 Теплові сонячні колектори	23
1.2.1 Класифікація та принцип роботи сонячних колекторів...	23
1.2.2 Сонячні колектори плоского типу.....	25
1.2.3 Вакуумні трубчасті сонячні колектори.....	37
1.2.4 Вакуумні плоскі сонячні колектори.....	45
1.2.5 Відкриті сонячні колектори.....	48
1.2.6 Фокусувальні сонячні колектори.....	49
2 ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ І ОПАЛЕННЯ.....	52
2.1 Конструкція, налагодження, введення в експлуатацію та обслуговування геліоколекторних установок.....	52
2.1.1 Конструкція геліоколекторних установок.....	52
2.1.2 Налагодження та введення в експлуатацію геліоколекторних установок.....	61
2.1.3 Обслуговування та поточний ремонт геліоколекторних установок.....	69
2.2 Основи проектування систем сонячного теплопостачання.....	72
2.2.1 Розрахунок сонячної радіації, що падає на колектор.....	72

2.2.2 Тепловий розрахунок системи сонячного теплопостачання..	77
2.2.3 Розрахунок системи гарячого водопостачання за рахунок геліоколекторних установок.....	83
2.2.4 Розрахунок системи підтримання опалення за рахунок геліоколекторних установок.....	90
3 СОНЯЧНІ ТЕПЛОВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	94
3.1 Принцип роботи сонячних теплових електростанцій. Класифікація сонячних теплових електростанцій.....	94
3.2 Особливості експлуатації, монтажу та техніки безпеки.....	101
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115

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.

У 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 (далі – ГВП) 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.

Конспект лекцій підготовлений на основі робочої програми дисципліни «Сонячна теплоенергетика» для студентів спеціальності G4 – Енерговиробництво, спеціалізації G4.03 – Енерговиробництво (Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика), освітньої програми «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» з метою допомогти їм під час підготовки до практичних занять, лабораторних робіт, диференційованого заліку та виконання курсової роботи.

1 СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВУ. ТЕПЛОВІ СОНЯЧНІ КОЛЕКТОРИ

1.1 Сонячне випромінювання

1.1.1 Потенційні можливості сонячної енергії

Потенційні можливості енергетики, заснованої на використанні сонячного випромінювання, надзвичайно великі: використання всього лише 0,0125 % всієї кількості енергії Сонця могло б забезпечити всі сьогоденні потреби світової енергетики, а використання 0,5 % – повністю покрити потреби на перспективу. Однак існують і перешкоди – низька інтенсивність падаючих променів та їх нерівномірність, а також значна вартість перетворюючих пристроїв.

На поверхню земної кулі падає сонячне випромінювання, енергія якого становить близько $81\,000 \times 10^6$ МВт, з яких $27\,000 \times 10^6$ МВт припадає на континенти. Близько 80 % цієї енергії надходить у період з квітня до вересня. З іншого боку, всесвітнє використання всіх видів енергії становить близько 10×10^6 МВт.

За годину наша планета одержує від сонця майже стільки енергії, скільки людство використовує впродовж року. Виникає питання, чому ж при такому потужному потенціалі дармової сонячної енергії, її так важко перетворити на енергію, доступну для використання, та чому ж отримана від сонця енергія є такою дорогою. Причинами цього є:

- мала щільність сонячної енергії;
- мала інтенсивність падаючих променів та їх нерівномірність;
- значна вартість перетворювальних пристроїв.

Для порівняння: при спалюванні кубу вугілля з ребром 10 см і вагою близько 1 кг отримуємо енергію потужністю близько 10 кВт · год. Для отримання тієї ж самої кількості енергії випромінювання сонця необхідно використовувати квадрат з ребром 10 см впродовж року.

Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для впровадження геліосистем як теплоенергетичного, так і фотоелектроенергетичного обладнання практично на всій території (рис. 1.1). Сонячне випромінювання в Україні складає 3 500–5 200 МДж/м² за рік. Сезонний період для активного використання сонячної енергії у північних регіонах продовжується з квітня по вересень, а у південних – з березня до жовтня, що становить 1 900–2 400 годин в рік. Загальне середньорічне сонячне випромінювання варіюється від 1 070 кВт · год / км² у місяць в північних районах України до 1 400 кВт · год/км² на півдні країни. За рівнем інтенсивності сонячного випромінювання (радіації) на території України необхідно виділити чотири зони, які показані нижче.

У першій та другій зонах знаходяться усі південні області України: більше половини території нашої країни знаходиться в четвертій зоні, яка найменш придатна для використання сонячної енергії. Найбільша величина надходження сонячного проміння в першій зоні – 1 350 кВт · год/км² в рік, а найменша – в четвертій 1 000 кВт · год/(км² · рік). Для другої та третьої зон ці величини складають, відповідно 1 250 кВт · год /км² та 1 150 кВт · год /км² за рік. У цілому територія України відноситься до зон з середньою інтенсивністю сонячної радіації.

У реальних умовах величина густини прямої та дифузійної, сонячної радіації залежить від широти місцевості, прозорості атмосфери, характеристик земної поверхні, а також від часу доби і пори року. З цієї причини величина річного потрапляння сонячної радіації на 1 м² з поверхні землі суттєво варіюється для різних регіонів України та очевидним є збільшення густини сонячної радіації та кількості сонячних днів у напрямку з Півночі на Південь із відповідним збільшенням річного потрапляння сонячної радіації на 1 м² поверхні землі.



Рисунок 1.1 – Потенціал сонячної енергії України

На рисунку 1.2, зображеному нижче, показані величини енергії сонячної радіації, що доходять до Землі протягом року на 1 м² горизонтальної поверхні в регіонах, представлених шістьма українськими містами, при чому за 6 місяців теплого періоду року на поверхню Землі потрапляє велика доля річної кількості сонячної енергії. Кількість річної енергії сонячної радіації в великих містах України: Сімферополь – 4,99 ГДж/м², Одеса – 4,88 ГДж/м², Донецьк – 4,44 ГДж/м², Київ – 4,12 ГДж/м², Суми – 3,89 ГДж/м², Львів – 3,85 ГДж/м².

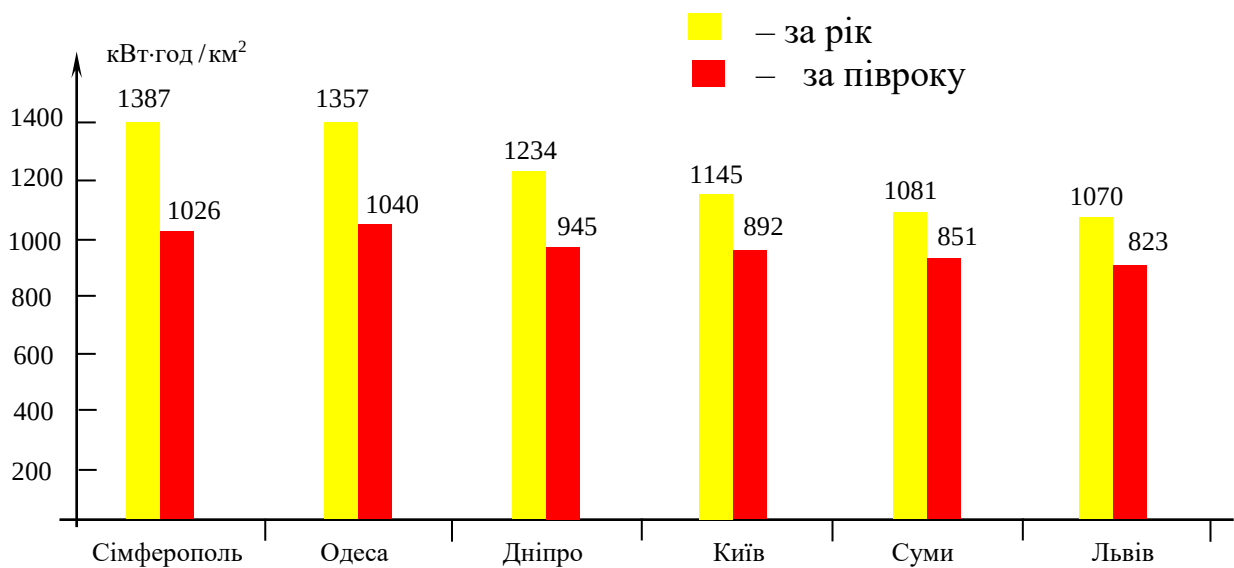


Рисунок 1.2 – Сумарна сонячна радіація на горизонтальну поверхню у різних містах України

Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні є еквівалентним 6 млн т умовного палива. Його використання дозволяє заощадити біля 5 млрд м³ природного газу. Збільшення споживання сонячної енергії в багатьох місцях розв'язало б проблеми гарячого водопостачання в теплу пору року.

1.1.2 Складові випромінювання. Вплив земної атмосфери

Джерелом енергії сонячного випромінювання є термоядерні реакції, що протікають на Сонці. Сонце – величезна газоподібна куля радіусом 695 500 км. Маса Сонця становить $1,98 \times 10^{30}$ кг, середня щільність сонячної матерії

дорівнює $1,4 \text{ г/см}^3$. Сонце випромінює в навколишній простір потік потужності, еквівалентний $4 \times 10^{23} \text{ кВт}$. Внаслідок реакцій ядерного синтезу в активному ядрі Сонця температури сягає 10^7 К , а спектральний розподіл потоку випромінювання з ядра нерівномірний. Це випромінювання поглинається зовнішніми неактивними шарами, в результаті чого спектральних розподіл сонячного випромінювання стає безперервним.

Земля знаходиться від Сонця на відстані приблизно $150\,000\,000 \text{ км}$ (цю відстань називають астрономічної одиницею, а. о.). На найбільшому видаленні від Сонця ($1,067 \text{ а. о.}$) Земля знаходиться 4 липня. Ця точка орбіти Землі називається афелієм. На найменшому віддаленні від Сонця ($0,983 \text{ а. о.}$) Земля знаходиться 3 січня. Ця точка орбіти називається перигелієм. Площа поверхні Землі, що опромінюється Сонцем, становить близько $5 \times 10^8 \text{ км}^2$. Потік сонячної радіації, що досягає Землі, за оцінками експертів складає до $1,2 \times 10^{14} \text{ кВт}$, що значно перевищує ресурси всіх інших відновлюваних джерел енергії.

Сонячний спектр можна розділити на три основні групи:

- ультрафіолетове випромінювання (довжини хвиль до $0,4 \text{ мкм}$), 9% інтенсивності;
- видиме випромінювання (довжини хвиль від $0,4 \text{ мкм}$ до $0,7 \text{ мкм}$), 45% інтенсивності;
- інфрачервоне (теплове) випромінювання (довжини хвиль понад $0,7 \text{ мкм}$), 46% інтенсивності; з довжинами хвиль в діапазоні від $0,75 \text{ мкм}$ до $1\,000 \text{ мкм}$.

Промениста енергія, проходячи через атмосферу, розсіюється і поглинається. Досягаючи земної поверхні, сонячна радіація частково відбивається. Невідбита частина радіації поглинається, перетворюючись в тепло. Нагріта поверхня, зі свого боку, стає джерелом власного випромінювання, спрямованого до атмосфери. Атмосфера, що нагрівається завдяки теплообміну з земною поверхнею, також є джерелом випромінювання, спрямованого до земної поверхні і в світовий простір.

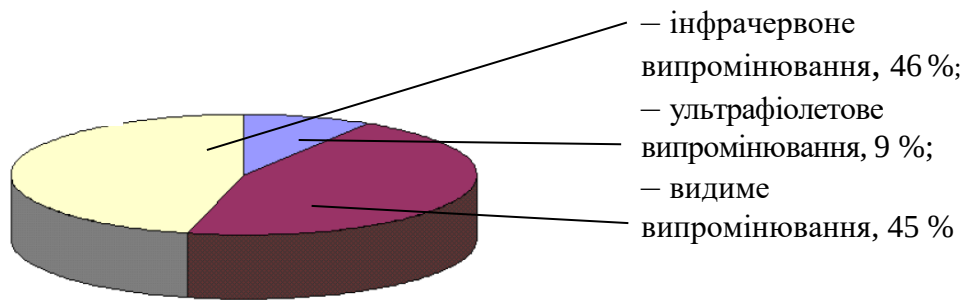


Рисунок 1.3 – Склад сонячного спектра

Баланс променистої енергії Землі представлений на рисунку 1.4. Близько 28 % енергії, що прийшла від Сонця, відбивається хмарами і аерозолями назад в космічний простір. Теплове (інфрачервоне) випромінювання Землі складає 114 % енергії, що прийшла від Сонця, з них 42 % повертаються атмосферою, а решта йде до космосу. По поверхні планети енергія перерозподіляється морськими течіями і вітрами.

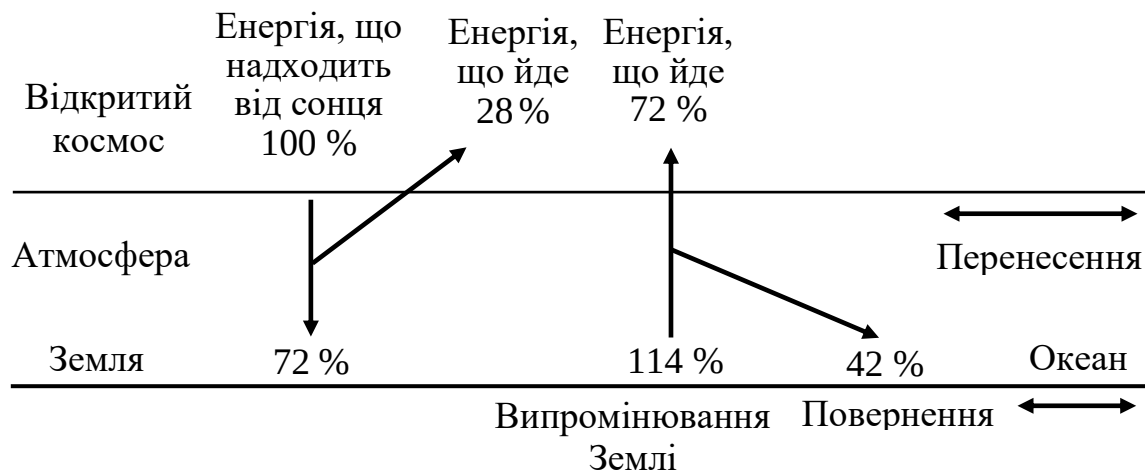


Рисунок 1.4 – Баланс променистої енергії Землі

Промениста енергія Сонця використовується біосферою з часів появи життя на планеті. Локальні значення променевої енергії Сонця, яка приходить до поверхні літосфери або гідросфери, залежать від багатьох факторів:

- широти і довготи місцевості;
- географічних і кліматичних особливостей (хмарність, запиленість повітря, висоти над рівнем моря);

- пори року і доби;
- стану атмосфери;
- висоти Сонця над горизонтом;
- орієнтації до Сонця (освітленості), тобто від розміщення приймача сонячного випромінювання на Землі по відношенню до Сонця.

У середніх широтах вдень інтенсивність сонячного випромінювання сягає 800 Вт/м^2 влітку і $200\text{--}350 \text{ Вт/м}^2$ взимку, зменшуючись до нуля із заходом Сонця.

В цілому можна виділити як закономірні особливості сонячного випромінювання, так і істотну частку його випадкової складової. Сумарне сонячне випромінювання, що досягає поверхні Землі, зазвичай складається з трьох складових:

- пряме сонячне випромінювання у вигляді паралельних променів, що надходить від Сонця на приймальний майданчик;
- дифузійне або розсіяне молекулами атмосферних газів і аерозолів сонячне випромінювання;
- відображена землею поверхнею частка сонячного випромінювання.

Необхідно пам'ятати, що протягом як коротких (хвилини, години), так і тривалих (добу, тижні) інтервалів часу в конкретній точці Землі може бути відсутня повністю, або частково, перша складова сонячного випромінювання. А в нічні години сонячне випромінювання відсутнє взагалі. Це означає, що сонячна енергетична установка на Землі має нульову гарантовану потужність при використанні тільки сонячного випромінювання без поєднання з іншими джерелами енергії. Крім того, в багатьох країнах сонячне випромінювання досягає свого максимуму в літній період, коли зазвичай відбувається закономірне зменшення споживання електроенергії. Відповідно максимум зимового споживання енергії настає в період мінімального приходу сонячного випромінювання.

Процеси, що супроводжують проходження сонячного випромінювання через атмосферу показані на рисунку 1.5, тобто в процесі проходження короткохвильового сонячного випромінювання через атмосферу

спостерігаються різні види взаємодії, а саме:

- поглинання, тобто перехід енергії випромінювання в тепло (збудження молекул) з подальшим випромінюванням світла більшої довжини хвилі;
- розсіювання, тобто зміна напрямку поширення світла в залежності від довжини хвилі;
- відбиття, яке не залежить від довжини хвилі.

Відбиття

В середньому близько 30 % інтенсивності космічного сонячного випромінювання відбивається назад в космічний простір. Більшу частину випромінювання відбивають хмари, меншу – сніг і лід на поверхні Землі. Щільність потоку короткохвильового сонячного випромінювання, що залишився, становить приблизно $(1 - \rho_0) \cdot 1,3 \text{ кВт/м}^2 \approx 1 \text{ кВт/м}^2$. Коефіцієнт відображення ρ_0 називається *альбедо*.

Парниковий ефект і довгохвильове випромінювання

Якщо радіус землі R , а інтенсивність космічного сонячного випромінювання (сонячна постійна) I_0 , то отримана від сонця енергія становить – $\pi \cdot R^2 \cdot (1 - \rho_0) \cdot I_0$. Ця енергія дорівнює енергії, що випромінюється в космічний простір Землею з випромінювальною здатністю $\varepsilon = 1$ і середньою температурою T_e . В умовах термодинамічної рівноваги, оскільки геотермічні і припливно-відливні ефекти незначні:

$$\pi \cdot R^2 \cdot (1 - \rho_0) \cdot I_0 = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_e^4. \quad (1.1)$$

З (1.1) витікає, що $T_e \approx 250 \text{ K} = -23^\circ \text{C}$.

Спектральний розподіл довгохвильового випромінювання поверхні Землі, що спостерігається з космосу, приблизно відповідає спектральному розподілу абсолютно чорного тіла за температури 250 К. Максимум розподілу при цій температурі відповідає $\lambda = 10 \text{ мкм}$, з розподілом сонячного випромінювання цей розподіл не перекривається. Досвід показує, що спектральні розподілення сонячного випромінювання (короткі хвилі) та теплового випромінювання Землі

(довгі хвилі) можна досліджувати окремо один від іншого.

Розглянемо більш докладно поглинання в атмосфері. Спектральні розподілення короткохвильового сонячного випромінювання та довгохвильового атмосферного можна поділити на окремі ділянки:

- на рівні моря сонячне випромінювання практичне відсутнє внаслідок поглинання O_2 , O_3 , O та N_2 та їх іонами ($\lambda < 0,3$ мкм);

- проходить мала доля випромінювання, достатня для засмаги ($0,3 < \lambda < 0,4$ мкм);

- для діапазону $0,4 < \lambda < 0,7$ мкм чиста атмосфера практично повністю пропускає випромінювання та стає «вікном» для його приходу на Землю;

- на діапазон $0,7 < \lambda < 2,5$ мкм припадає майже половина інтенсивності космічного сонячного випромінювання (20 % сонячної енергії поглинається в атмосфері парами H_2O та CO_2);

- для інфрачервоного діапазону $\lambda > 3$ мкм атмосфера практично непрозора.

Висновок

При проходженні короткохвильової радіації Сонця (електромагнітне випромінювання в області довжин хвиль від 0,3 мкм до 3 мкм) через атмосферу Землі, в верхніх шарах відбуваються хімічні реакції, іонізація, дисоціація молекул, тобто розпад складних хімічних сполук на складові компоненти і/або елементи; поглинання радіації, головним чином озоном, водяною паром і земною поверхнею, що призводить до нагрівання атмосфери.

Вимірювання складових сонячного випромінювання на Землі відбувається на актинометричних станціях. Актинометрія – розділ геофізики, в якому вивчаються перенесення і перетворення випромінювання в атмосфері, гідросфері і на поверхні Землі, тобто це – сукупність методів вимірів радіації Землі в метеорології.



Рисунок 1.5 – Процеси, що супроводжують проходження сонячного випромінювання через атмосферу

Основним завданням актинометрії є кількісне і якісне дослідження прямої, розсіяної і відбитої сонячної радіації, довгохвильовій радіації земної поверхні і атмосфери та радіаційного балансу атмосфери, розробка приладів і методів вимірювань, перетворень променевої енергії в атмосфері, гідросфері і на земній поверхні.

Як показує світовий досвід, просте перенесення наявних методів розрахунку сонячного випромінювання в одній країні на умови інших, з іншими кліматичними умовами, дає великі помилки. Додаткові складнощі вносить і обмежена кількість

актинометричних станцій, вимірювання на яких можна використовувати в розрахунках режимів і параметрів сонячних енергетичних установок різного типу та виду.

1.1.3 Оцінювання сонячної енергії

Реакція термоядерного синтезу легких елементів в глибинах Сонця породжує колосальну енергію сонячного випромінювання (радіації). Кількісно це випромінювання характеризується інтенсивністю I_C [Вт/м²], тобто це потужність променистої енергії, що приходить за межами земної атмосфери в секунду на квадратний метр перпендикулярного до сонячних променів майданчика.

Загальну кількість сонячної радіації, що надходить в одиницю часу на одиничну, перпендикулярну сонячним променям площадку на зовнішньому кордоні атмосфери, при середній відстані Землі від Сонця, називають сонячною постійною I_0 . Значення сонячної постійної визначалося ретельними вимірами протягом тривалого часу, зараз воно прийнято рівним 1 370 Вт/м². Це означає, що на кожен квадратний метр поверхні, перпендикулярної до сонячних променів і віддаленої від Сонця на 1 а. о., падає 1 370 Вт сонячної енергії.

Сумарна потужність променевої енергії, що надходить до земної атмосфери, дорівнює приблизно 180 млн ГВт (сумарна потужність електростанцій України понад 55 ГВт). Енергію інтенсивності радіації за певний час вимірюють в (кВт · год)/м².

Промениста енергія, проходячи через атмосферу, розсіюється і поглинається. Досягаючи земної поверхні, сонячна радіація частково відбивається. Невідбита частина радіації поглинається, перетворюючись в тепло. Нагріта поверхня, в свою чергу, стає джерелом власного випромінювання, спрямованого до атмосфери. Атмосфера, нагріта за рахунок теплообміну з земною поверхнею, також є джерелом випромінювання, спрямованого до земної поверхні і в світовий простір.

Радіаційний баланс є складовою частиною теплового балансу атмосфери і підстильної поверхні. Підстильна поверхня – компоненти земної поверхні, що здійснюють тепло- і вологообмін з атмосферою і впливають на її стан. Різні типи підстильної поверхні по різному поглинають сонячну радіацію і віддають тепло атмосфері, випаровують вологу і впливають на силу вітру. На Землі радіаційний баланс коливається в широких межах: найбільші його значення – в тропічних океанах (до 1 КВт/м²), найменші – в глибинних районах Антарктиди (від’ємні круглий рік).

Алгебраїчна сума витратних складових радіації представляє радіаційний баланс, рівняння якого має вигляд

$$B = S' + D + b \cdot E_a - E_z - R = Q \cdot (1 - A_k) - E_{ef}, \quad (1.2)$$

де S' – пряма сонячна радіація на горизонтальну поверхню;

D – розсіяна сонячна радіація;

R – відбита короткохвильова радіація;

Q – сумарна сонячна радіація;

E_z – довгохвильове (теплове) випромінювання земної поверхні;

E_a – зустрічне випромінювання атмосфери, що спрямоване до земної поверхні;

E_{ef} – ефективне випромінювання підстильної поверхні;

A_k – альbedo підстильної поверхні (фізична величина, що описує здатність поверхні тіла відбивати та розсіювати випромінювання);

b – коефіцієнт поглинання підстильної поверхні.

Складові радіаційного балансу вимірюються в Вт/м². Радіаційний баланс залежить від висоти сонця, обумовленої часом доби, пори року і географічної широти. При проходженні через атмосферу сонячна радіація, а також від здатності поверхні відбивати випромінювання, прозорості атмосфери, хмарності та інших факторів. Вдень радіаційний баланс додатний (надлишок тепла на поверхні землі, який компенсується відтоком енергії у вигляді турбулентних потоків і теплопередачі), вночі – від’ємний (нестача тепла, що поповнюється потоком енергії з атмосфери і з глибин ґрунту або води). Зміна

знаків радіаційного балансу відбувається приблизно через годину після сходу сонця і за годину до його заходу. Радіаційний баланс – один з кліматоутворювальних факторів разом з рельєфом місцевості та циркуляцією атмосфери.

Під прямою сонячною радіацією S' розуміють пучок паралельних променів, що виходять безпосередньо від сонця і зони близько сонця, радіусом 5° . Частка цієї радіації, яка припадає на горизонтальну поверхню, обчислюється за формулою:

$$S = S' \cdot \sin h, \quad (1.3)$$

де h – висота сонця над горизонтом.

Розсіяна сонячна радіація надходить на поверхню землі від усіх точок небосхилу за винятком диска сонця і зони близько сонця радіусом 5° . Розсіяне випромінювання обумовлено молекулами атмосферних газів, водяними краплями або крижаними кристалами хмар, твердими частинками, зваженими в повітрі.

Найбільш повною енергетичною характеристикою сонячного випромінювання є сумарна сонячна радіація:

$$Q = S' + D. \quad (1.4)$$

На геліоенергетичні ресурси території здійснюють безпосередній вплив географічні та кліматичні характеристики: тривалість світлового дня; середня місячна і річна тривалість сонячного сяйва; середні місячні та річні характеристики прозорості атмосфери і ряд інших.

Оцінка потенціалу сонячної енергетики, як вже було сказано, ґрунтується на багаторічних даних актинометричних спостережень на великій кількості станцій, розподілених доволі рівномірно по території.

Потенційні можливості приходу сонячної радіації визначаються географічною широтою місцевості. Кліматичні характеристики району, що побічно характеризуються тривалістю сонячного сяйва, вносять істотні корективи в можливість ефективного використання енергії сонця.

Надходження сонячної радіації до земної поверхні залежить від багатьох факторів:

- від широти місцевості;
- від пори року і доби;
- від прозорості атмосфери;
- від хмарності;
- від характеру підстильної поверхні;
- від висоти місця над рівнем моря;
- від закритості горизонту.

Кількість радіації, що отримується земною поверхнею за добу, залежить, перш за все, від широти і пори року. На кожній широті пора року визначає тривалість денної частини доби (світлового дня) і, отже, тривалість надходження радіації. Зі збільшенням широти тривалість світлового дня взимку та влітку зменшується, в порівнянні з південними широтами.

Надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню залежить не тільки від тривалості дня, а й від висоти сонця. Висота сонця змінюється в залежності від широти місця, пори року і доби.

Залежність приходу сонячної радіації від широти, більш чітко простежується взимку: в напрямку до більш високих широт кількість сонячної радіації зменшується. Влітку зі збільшенням широти збільшується тривалість дня і прозорість атмосфери, що сприяє збільшенню прямої і сумарної радіації. Збільшення ж хмарності зменшує пряму і збільшує розсіяну радіацію. Потік розсіяної радіації, хоча частково і компенсує ослаблення потоку прямої сонячної радіації в атмосфері, але ця компенсація не є повною. Тому, потік сумарної радіації при наявності хмарності, якщо сонце не закрите хмарами, буде більше, ніж при безхмарному небі. Вплив зростання прозорості в реальних умовах може перебиватися впливом хмарності на надходження радіації. Зменшення прозорості атмосфери призводить до збільшення розсіяної радіації.

Крім прозорості і хмарності на розсіяну радіацію впливає характер підстильної поверхні. При збільшенні відбивної здатності підстильної поверхні

значно зростає потік розсіяної радіації. При наявності снігового покриву збільшується відображення прямої сонячної радіації, вторинне розсіювання якої в атмосфері призводить до збільшення розсіяної радіації.

Зі збільшенням висоти над рівнем моря потік прямої сонячної радіації зростає, що пояснюється зменшенням оптичної товщини атмосфери. Внаслідок цього, максимальні значення потоку сонячної радіації в гірських районах більше, ніж на рівнинній місцевості.

Величина потоку розсіяної радіації з підняттям над рівнем моря зменшується при ясному небі, тому що зменшується товща шарів атмосфери, що розсіюють. При наявності ж хмарності, потік розсіяної радіації в шарах нижче хмар з висотою збільшується. Прихід прямої і сумарної радіації зменшується в пунктах, розташованих на дні долин або западин, завдяки закритості горизонту.

При проходженні через атмосферу сонячне випромінювання послаблюється переважно завдяки поглинанню інфрачервоного випромінювання парами води, ультрафіолетового випромінювання – озоном і розсіювання випромінювання молекулами газів, частинками пилу в повітрі і аерозолями.

Параметром, що відображає вплив атмосфери на інтенсивність і спектральний склад сонячного випромінювання, що доходить до земної поверхні, є атмосферна (повітряна) маса (АМ).

При нульовій повітряній масі $AM = 0$, інтенсивність випромінювання дорівнює $E_c = 1,35 \text{ кВт/м}^2$. Величина $AM = 1$ відповідає проходженню сонячного випромінювання через безхмарну атмосферу до рівня моря при розташуванні Сонця в zenіті. Повітряна маса для будь-якого рівня земної поверхні в будь-який момент дня визначається за формулою:

$$AM = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\sin \lambda}, \quad (1.4)$$

де P – атмосферний тиск, Па;

P_0 – нормальний атмосферний тиск ($1,013 \times 10^5$ Па);

λ – кут висоти Сонця над горизонтом.

Найхарактернішою в земних умовах є величина $AM = 1,5$ ($\lambda = 42^\circ$). Вона прийнята за стандартну, при інтегральній поверхневій щільності сонячного випромінювання $E_c = 0,84 \text{ кВт/м}^2$, що необхідно для забезпечення порівнянності результатів досліджень різних сонячних елементів.

Геометрія Землі та Сонця

Земля обертається за 24 години навколо своєї осі, що позначена на рисунку 1.6 точками північного і південного полюсів N і S та перпендикулярна екваторіальній площині. Точка C – центр Землі. Кожна точка P на поверхні характеризується широтою φ (додатна для точок, що лежать на

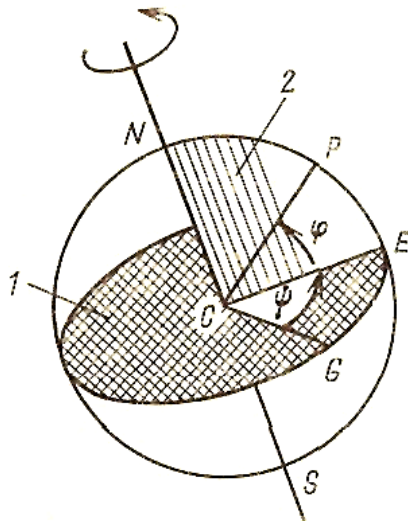


Рисунок 1.6 – Схема визначення широти φ та довготи ψ :

- 1 – екваторіальна площина;
- 2 – меридіональна площина

північ від екватора) та довготою ψ (додатна для точок, що лежать на схід від Гринвіча). Площина, що побудована з півночі на південь через точку P – локальна меридіональна площина. Точки E та G на екваторі мають ті ж самі довготи, що і точка P та Гринвіч відповідно. Кожні 24 години Сонце попадає в меридіональну площину, це і є полудень за сонячним часом для усіх точок, що мають цю довготу. Сонячний час не співпадає з так званим декретним

часом. Земля обертається навколо Сонця за рік. Напрямок її осі залишається фіксованим в просторі і складає з нормаллю до площини обертання $\delta_0 = 23,5^\circ$ (рис. 1.7). Кут між напрямком до Сонця та екваторіальною площиною називають схиленням δ і він є мірою сезонних змін. Іншими словами, схилення є широта точки, для якої Сонце знаходиться в zenіті в полудень за сонячним часом.

У північній півкулі δ плавно змінюється від $\delta_0 = 23,5^\circ$ (літнє сонцестояння) до $\delta_0 = -23,5^\circ$ (зимове сонцестояння). Аналітично отримано:

$$\delta = \delta_0 \cdot \sin \left[\frac{360^\circ \cdot (284 + n)}{365} \right], \quad (1.5)$$

де n – день року ($n = 1$ відповідає 1 січня).

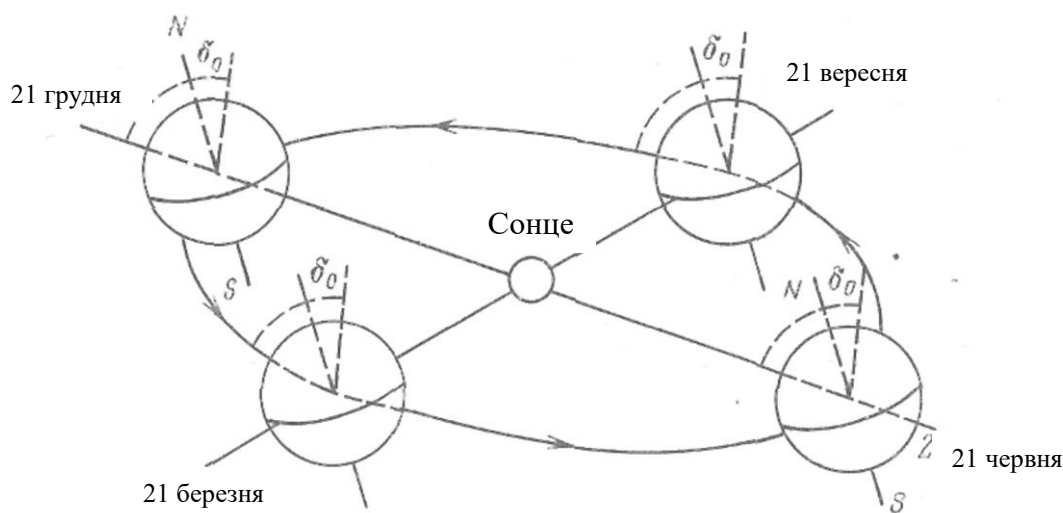


Рисунок 1.7 – Схема обертання Землі навколо Сонця
(суцільна лінія на поверхні Землі – екватор)

1.2 Теплові сонячні колектори

1.2.1 Класифікація та принцип роботи сонячних колекторів

Сонячний колектор (далі – СК) – теплотехнічний пристрій для перетворення енергії випромінювання Сонця у видимому та інфрачервоному спектрі в теплову енергію шляхом його поглинання. На відміну від сонячних батарей, які виробляють безпосередньо електрику, сонячний колектор здійснює нагрів теплоносія. Колектори застосовують для підігріву води та підтримання опалення, існують різні їх типи, але всі вони засновані на простому принципі: темна поверхня «вбирає» сонячну енергію, потім це тепло передається теплоносію.

Найпростіші колектори в складі термосифонної системи не вимагають насосів або іншого електрообладнання, бо гаряча рідина переміщається між колектором і баком за принципом конвекції (нагріта рідина завжди піднімається вгору). Завдяки ж застосуванню антифризу вони можуть використовуватися навіть в зимовий час.

Основний принцип роботи сонячного колектора такий:

- сонце нагріває рідину в колекторі;
- нагріта рідина піднімається по колектору і трубі в бак-акумулятор;
- коли гаряча рідина надходить в теплообмінник, встановлений в бак з водою, тепло передається від теплообмінника воді;
- рідина в теплообміннику, охолоджуючись, переміщається донизу по спіралі і надходить з отвору в нижній частині бака назад в колектор;
- нагріта в баку вода акумулюється в верхній його частині і відбирається звідти через вихідний отвір;
- холодна вода з водопровідної мережі або резервуара надходить у нижню частину бака.

Поки на колектор світить сонце, рідина в трубах абсорбера нагрівається, переміщається в бак і постійно циркулює. Цей процес забезпечує нагрів води в баку всього за кілька годин при інтенсивному сонячному випромінюванні. Таким чином, робота будь-якого колектора базується на послідовному процесі: пропускання випромінювання → поглинання → нагрів → передача тепла → транспортування енергії.

Сонячні колектори класифікуються за різними ознаками:

- за призначенням;
- за технічними рішеннями;
- за видом теплоносія;
- за терміном експлуатації;
- за температурою теплоносія
- за конструкцією, яка безпосередньо пов'язана з температурою теплоносія.

За призначенням вони поділяються на колектори для гарячого водопостачання та для опалення, за використаними технічними рішеннями – на одно-, дво- і багатоконтурні, за видом теплоносія розрізняють рідинні та повітряні колектори, за терміном експлуатації – сезонні та цілорічні.

За температурою теплоносія колектори поділять на:

- низькотемпературні (температура теплоносія в них не перевищує 100 °C);
- середньо температурні (температура теплоносія в них від 30 до 165 °C);
- високотемпературні (температура теплоносія від 20 до 300 °C).

Головною принципом класифікації все ж таки є класифікація їх за конструкцією, а саме:

- плоскі колектори, які є низькотемпературними;
- вакуумні колектори (середньо та високотемпературні залежно від їх особливостей);
- фокусувальні сонячні колектори.

1.2.2 Сонячні колектори плоского типу

Плоский сонячний колектор – найбільш поширений тип сонячних колекторів, який застосовують в геліосистемах, для підігріву води і для підтримки опалення. Конструкція плоских сонячних колекторів використовує пряме або розсіяне сонячне випромінювання і не передбачає його концентрації. Перевагою плоского сонячного колектора є відносна простота конструкції, що дозволяє здешевити систему за достатньо високих показників продуктивності і надійності. Недоліком можна назвати високі теплові втрати, які знижують показники виробництва теплової енергії при низькій температурі повітря.

Розглянемо конструкцію плоского сонячного колектора, який є багат шаровою системою, де усі елементи взаємопов'язані та працюють як єдине ціле (рис. 1.9).

Перелік елементів плоского СК із мінімальним поясненням функцій:

- скло, яке пропускає випромінювання і зменшує втрати;
- абсорбер, який поглинає сонячну енергію;

- мідні трубки, які передають теплоносію тепло;
- теплоносій (переносє теплову енергію);
- повітря / інертний газ (зменшує конвекційні втрати);
- теплоізоляція для зменшення втрат тепла;
- листовий метал (задня стінка), що є основою та механічною підтримкою;
- корпус колектора, здійснює герметичність і захист внутрішніх елементів.

Отже, сонячне випромінювання проходить через прозоре покриття (скло) і потрапляє на абсорбер – основний елемент, що поглинає енергію. Абсорбер нагрівається і передає тепло теплоносію, який циркулює через мідні трубки. Нагрітий теплоносій рухається далі по системі, передаючи накопичену енергію в бак-акумулятор. Щоб мінімізувати втрати тепла:

- простір між склом і абсорбером заповнюється повітрям або інертним газом і це зменшує конвекційні втрати;
- знизу розташована теплоізоляція, яка перешкоджає втратам через задню частину;
- корпус і листовий метал забезпечують механічну міцність, герметичність та довговічність конструкції.

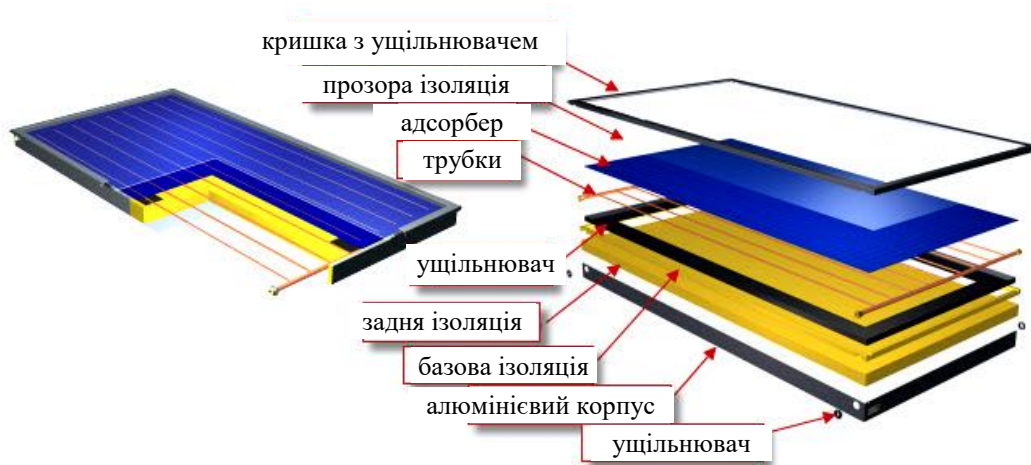


Рисунок 1.9 – Конструкція плоского сонячного колектора

Скло СК

Скло виконує функцію пропускання сонячного випромінювання та зменшення теплових втрат. Воно забезпечує так званий парниковий ефект: пропускає короткохвильове випромінювання і затримує довгохвильове теплове. Скла СК повинно мати:

- висока пропускна здатність для сонячного випромінювання з коефіцієнтом пропускання $\tau \approx 0,90\text{--}0,92$;
- низький вміст заліза (так зване низькозалізне скло (solar glass))
- бути загартованим (термозміцненим), щоб витримувати град, вітер, механічні навантаження і температурні перепади.
- бути термостійким (витримувати температури $150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ без деформацій)
- мати малу товщину (зазвичай 3–4 мм)

Для плоских сонячних колекторах іноді використовують антирефлексне (антивідбивне) скло, яке зменшує втрати на відбиття і підвищує пропускання сонячного випромінювання. Антирефлексне скло має спеціальне покриття, яке зменшує відбиття сонячного випромінювання від поверхні скла. Це дає більший відсоток сонячної енергії, що проходить до абсорбера, і коефіцієнт корисної дії (далі – ККД) колектора збільшується приблизно на 3–5 %. Недоліком застосування такого скла є вища вартість СК. Однак треба відмітити, що антирефлексне покриття працює найефективніше при перпендикулярному падінні сонячних променів на поверхню скла, коли ж кут падіння збільшується (ранок, вечір, зима), ефект зменшення відбиття частково знижується. Саме тому навіть антирефлексне скло не усуває повністю оптичні втрати, а лише зменшує їх приблизно на кілька відсотків.

Абсорбер

Абсорбер – це ключовий елемент плоского сонячного колектора, який безпосередньо відповідає за перетворення сонячної енергії в тепло. Саме він визначає швидкість нагріву теплоносія, максимальну температуру, теплові втрати, загальний ККД системи. Ефективність усього колектора в значній мірі

визначається характеристиками абсорбера.

Для виготовлення абсорберів використовують матеріали з високою теплопровідністю:

- найкращим варіантом є мідь з високою теплопровідністю, корозійною стійкістю, довговічністю
- алюміній часто використовується у бюджетних моделях, є легшим, дешевшим, але має дещо гіршу теплопровідність;
- сталь застосовується рідко, бо має нижчу ефективність (теплопровідність матеріалу).

У сонячних колекторах використовують три основні конструктивні типи абсорберів:

- пір'яний або ребристий (рис. 1.10);
- цільнолистовий (рис. 1.9);
- циліндричний.

Пір'яний складається з трубок, до яких прикріплені металеві пластини (ребра). Переваги:

- велика площа теплопередачі;
- хороша ефективність;
- рівномірний нагрів.

Недоліки:

- складність виготовлення;
- вища вартість.

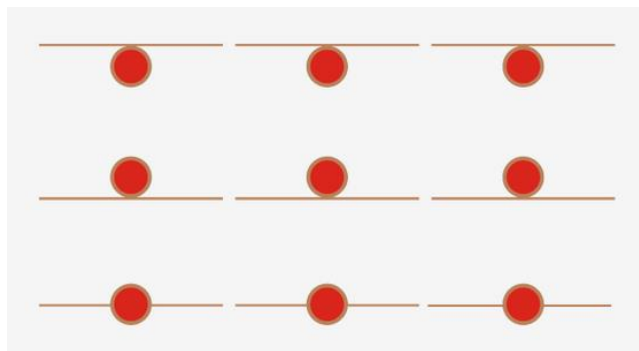


Рисунок 1.10 – Пір'яний (ребристий) абсорбер

Цільнолистий абсорбер представляє собою суцільну металеву пластину з інтегрованими трубками, має однорідну поверхню, яка абсорбує сонячне випромінювання у всьому своєму обсязі, використовується у багатьох сонячних теплових колекторах, де важлива широка поверхня абсорбера для максимального збору сонячної енергії.

Перевагами є максимально рівномірний нагрів, висока ефективність, мінімальні теплові втрати. Недоліками є те, що він дорожчий у виробництві і складніший технологічно.

Циліндричний складається з циліндричного або трубчастого елемента, який зазвичай має спеціальне (селективне) покриття. Використовується у вакуумних трубчастих сонячних колекторах або у системах з концентратором, де важлива висока концентрація сонячного випромінювання. Перевагами є висока ефективність абсорбції, здатність до концентрації сонячної енергії недоліками – складність виготовлення, вища вартість, можливі проблеми зі стійкістю та ефективністю у довгостроковому періоді.

Незмінним для всіх типів абсорбера є те, що він знаходиться на освітленій сонячним випромінюванням частини сонячного колектора.

Для максимального поглинання сонячного випромінювання на абсорбер наносять спеціальне поглинальне селективне покриття (рис. 1.11). Це покриття забезпечує максимально можливе поглинання сонячної енергії, що потрапляє на поглинач, та перешкоджає зворотному випромінюванню. Існують різні способи нанесення поглинального покриття на поверхню абсорбера:

- гальванічним способом (покриття типу «чорний хром»);
- шляхом напилення («сині шари»).

Селективне покриття для абсорберів сонячних колекторів характеризується рядом коефіцієнтів, які визначають його властивості. Основні коефіцієнти включають:

1. Коефіцієнт абсорбції або поглинальна здатність (α) – визначає, яку частину сонячного випромінювання абсорбує поверхня. Для селективних покриттів вони зазвичай мають високий коефіцієнт абсорбції, близький до 1.

2. Коефіцієнт емісії (ε) – визначає, наскільки ефективно поверхня випромінює тепло. Селективні покриття мають низький коефіцієнт емісії, менший за 0,1, що допомагає утримувати тепло всередині системи.

3. Спектральна селективність (α/ε) – відносний параметр, вказує на ефективність селективного покриття в певному діапазоні довжин хвиль сонячного випромінювання. Шляхом максимізації коефіцієнта абсорбції та мінімізації коефіцієнта емісії досягається висока спектральна селективність.

4. Тепловий коефіцієнт втрат (U) – визначає ефективність утримання тепла в системі, залежить від якості і теплопровідності селективного покриття.

Ці коефіцієнти можуть бути визначені експериментально або розраховані в результаті спеціалізованих випробувань та досліджень. Вищі значення коефіцієнтів абсорбції та нижчі значення коефіцієнтів емісії вказують на більш ефективне селективне покриття для абсорберів сонячних колекторів.

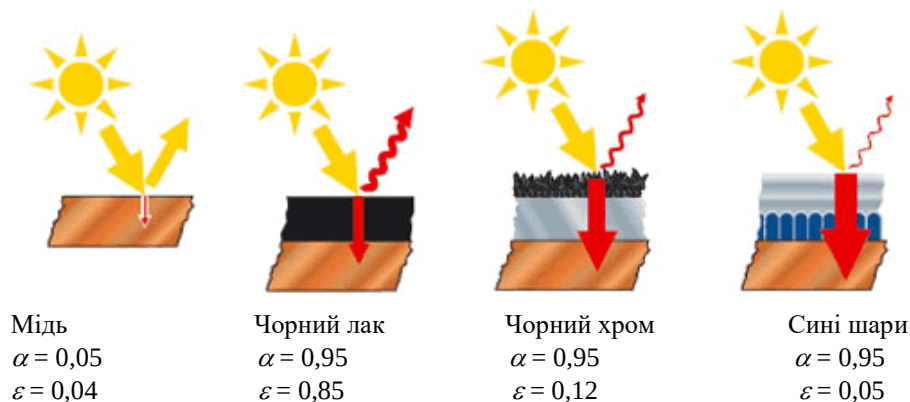


Рисунок 1.11 – Поглинальна і випромінююча здатність для різних типів покриттів абсорбера в процентах

Мідні трубки

Мідні трубки є елементом, через який безпосередньо відбувається передача тепла від абсорбера до теплоносія. Вони жорстко або пайкою з'єднані з абсорберною пластиною, що забезпечує ефективний тепловий контакт. При нагріванні абсорбера теплота швидко передається трубкам, а від них – теплоносію, що циркулює всередині. Мідь використовують завдяки своїм високим теплофізичним характеристикам, стійкості до корозії, високій

теплопровідності, що дозволяє мінімізувати температурні втрати при передачі тепла, тривалому терміну експлуатації.

Конструктивно трубки можуть розташовуватись у вигляді змійовика або паралельних каналів (рис. 1.12). Від геометрії розташування залежить рівномірність прогріву абсорбера та ефективність відбору тепла. Якість з'єднання трубок з абсорбером є критично важливою: будь-який повітряний зазор суттєво знижує ефективність теплопередачі.

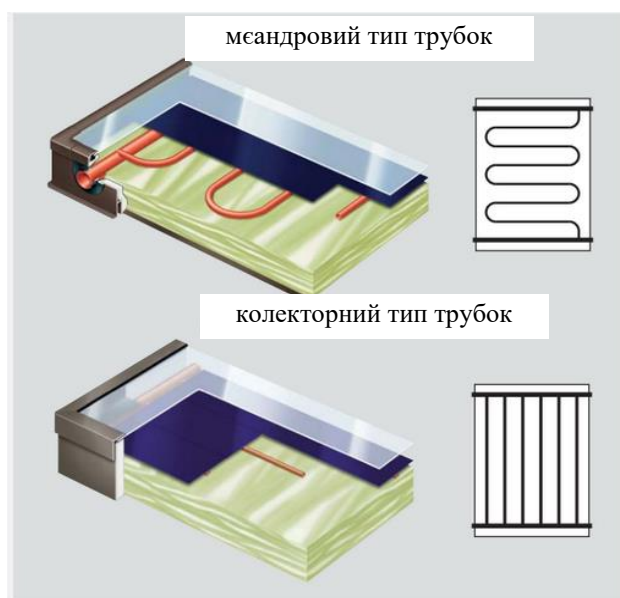


Рисунок 1.12 – Типи абсорбера

Теплоносій

Теплоносій виконує функцію перенесення теплової енергії від колектора до споживача або до бака-акумулятора. Саме він забезпечує зв'язок між джерелом тепла (сонячним колектором) і системою споживання.

До теплоносія висуваються певні вимоги: висока теплоємність, хороша теплопровідність, низька в'язкість, хімічна стабільність та безпечність для матеріалів системи. Важливо також, щоб теплоносій не викликав корозії та не утворював накипу.

У якості теплоносія найчастіше використовують воду або спеціальні незамерзаючі рідини (антифризи на основі гліколів). Вибір залежить від умов експлуатації: у регіонах з холодним кліматом застосування антифризу є обов'язковим, щоб уникнути замерзання та руйнування трубок.

Вода є одним з найпоширеніших теплоносіїв для сонячних колекторів. Вона використовується у сонячних теплових системах для нагрівання води для побутового використання або для опалення. Вода є екологічно чистим і дешевим теплоносієм. Глікольна суміш з водою використовується як теплоносій у системах замкнутого контуру, особливо в областях, де існують морозні умови. Гліколь дозволяє запобігти замерзанню теплоносія в холодну погоду. Також деякі сонячні колектори використовують спеціальні теплоносії на основі масел або силіконів, які можуть бути ефективними при високих температурах, оскільки мають високу теплопровідність і стійкі до високих температур. Для сонячних колекторів у парових теплових системах як теплоносій використовується пара, яка має високу теплопровідність, що дозволяє використовувати її для генерації електроенергії або для опалення.

Кожен з цих теплоносіїв має свої переваги та обмеження, і вибір залежить від конкретних вимог та умов проєкту сонячної теплової системи. Гліколь, зазвичай етиленгліколь або пропіленгліколь, використовується як теплоносій у сонячних теплових системах через ряд переваг:

- додавання гліколю до води створює ефект антифризу, що дозволяє системі функціонувати в холодному кліматі без ризику замерзання теплоносія та пошкодження колекторів або трубопроводів;
- гліколь має високу стабільність при високих температурах, що робить його ідеальним для застосування в сонячних системах, де температури можуть сягати дуже високих значень;
- деякі глікольні розчини містять інгібітори корозії, які захищають металеві деталі системи від корозії, що допомагає продовжити термін експлуатації системи і знизити витрати на обслуговування;
- завдяки своїм антифризовим властивостям, гліколь дозволяє розширити діапазон робочих температур системи, що забезпечує більш гнучке використання сонячних теплових систем у різних кліматичних умовах;

– при виборі екологічно чистих варіантів гліколю, таких як пропіленгліколь, можна досягти високого рівня біодеградації, що зменшує вплив на навколишнє середовище у випадку викидів.

Ефективність роботи всієї системи значною мірою залежить від швидкості циркуляції теплоносія: занадто повільний рух призводить до перегріву, а надто швидкий – до недостатнього нагріву.

Повітря / інертний газ

Простір між склом і абсорбером заповнюється повітрям або інертним газом і виконує важливу теплоізоляційну функцію. Основне його призначення – зменшення теплових втрат шляхом конвекції. У замкнутому об’ємі рух повітря обмежений, що знижує інтенсивність переносу тепла від нагрітого абсорбера до скла. Якщо використовуються інертні гази (наприклад, аргон), ефект ще кращий, оскільки вони мають нижчу теплопровідність, ніж повітря. Цей шар також впливає на формування температурного режиму всередині колектора. Чим менше теплових втрат через конвекцію, тим вища температура абсорбера і, відповідно, ефективність колектора. Важливо забезпечити герметичність цього простору: проникнення вологи або зовнішнього повітря може призвести до погіршення теплоізоляційних властивостей і навіть до конденсації, що негативно впливає на роботу колектора.

Теплоізоляція

Щоб мінімізувати втрати тепла, важливо зробити надійну теплоізоляцію між стінками корпусу та абсорбером. Теплоізоляційний шар суцільною плитою укладається зазвичай під пластиною-абсорбером. Теплоізоляція обмежує втрату тепла на сонячних колекторах та підвищує їхню ефективність. Товщина мінеральної ізоляції коливається в межах від 2 см до 6 см, залежно від моделі. Якісна теплоізоляція особливо важна на тильній (тіньовій) та бічних сторонах корпусу і призначена для мінімізації теплових втрат у навколишнє середовище, особливо через задню поверхню.

Оскільки абсорбер нагрівається до високих температур, без належної ізоляції значна частина тепла втрачалася б через задню стінку. Теплоізоляційний шар створює бар'єр для теплопередачі і дозволяє зберігати енергію всередині колектора.

Найчастіше використовують мінеральну вату, пінополіуретан або інші матеріали з низькою теплопровідністю. Важливими характеристиками є термостійкість, довговічність і стійкість до вологи. Якість теплоізоляції безпосередньо впливає на коефіцієнт корисної дії колектора, особливо в умовах низьких температур або сильного вітру. Недостатня ізоляція може звести нанівець ефективність навіть високоякісного абсорбера.

Матеріали для ізоляції:

- мінеральна вата (термостійка, не горить, добре ізолює; часто використовується в колекторах, але боїться вологи);
- скловата (дешевша альтернатива мінеральній ваті, легка, але менш міцна і гірше тримає форму);
- поліуретанова піна (має дуже низьку теплопровідність, добре заповнює простір, не боїться вологи, одна з найефективніших ізоляцій);
- пінополістирол (легкий і дешевий, але має обмежену термостійкість, тому застосовується рідше або з обмеженнями).

Вимоги до ізоляційного матеріалу:

- низька теплопровідність ($\lambda < 0.05 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$);
- стійкість до високих температур;
- стійкість до вологи та старіння;
- негорючість (особливо для дахових установок).

Корпус колектора. Листовий метал (задня стінка)

Задня стінка колектора, виконана з листового металу, є конструктивною основою, до якої кріпляться всі внутрішні елементи. Вона забезпечує жорсткість, форму та стабільність конструкції. Цей елемент також виконує захисну функцію: запобігає механічним пошкодженням, впливу вологи та

зовнішніх факторів. Часто задню стінку виготовляють із сталі або алюмінію з антикорозійним покриттям. Хоча листовий метал сам по собі не є теплоізолятором, він працює разом із шаром теплоізоляції, який розташований з внутрішнього боку. Тому важливо, щоб він мав достатню міцність і довговічність. Крім того, задня стінка повинна витримувати температурні деформації та навантаження від вітру, снігу та власної ваги конструкції. Взагалі задня стінка (листовий метал) – це все ж таки частина корпусу, але не весь корпус.

Корпус (металевий або полімерний кожух) є зовнішньою оболонкою колектора, яка об'єднує всі елементи в єдину герметичну конструкцію. Він забезпечує захист внутрішніх компонентів від впливу навколишнього середовища: вологи, пилу, вітру та механічних пошкоджень. Основна вимога до корпусу – герметичність. Вона необхідна для збереження теплоізоляційних властивостей і запобігання проникненню вологи, що може викликати корозію або погіршення роботи колектора. Зазвичай корпус виготовляється з алюмінію або сталі. Алюмінієві корпуси легші та стійкіші до корозії, тоді як сталеві – міцніші, але потребують захисного покриття. Також корпус виконує утримувальну функцію: він забезпечує можливість монтажу колектора на дахах або інших конструкціях. Від його якості залежить довговічність всієї системи та її здатність працювати в різних кліматичних умовах.

Корпус колектора – це вся зовнішня конструкція (рама, задня стінка ущільнення, кріплення), а задня стінка – це лише нижня (тильна) частина корпусу, до якої кріпиться теплоізоляція і внутрішні елементи

Переваги плоских колекторів

- низька вартість;
- легкість монтажу;
- доступність на ринку;
- висока якість;
- витривалість щодо ударів градин діаметром до 25 мм;
- добра термічна ізоляція;

- скло з високим коефіцієнтом світлопропускання;
- великий термін експлуатації;
- щільний, естетичний корпус.

Хоча плоскі СК мають численні переваги, вони також мають і недоліки:

- низька ефективність при високих температурах у порівнянні з іншими типами сонячних колекторів і це може бути проблемою в спекотних кліматичних умовах або при невірному розміщенні колектора;
- потреба у великій площі для збору значної кількості сонячної енергії і це може бути проблемою для обмежених просторів або в ситуаціях, де недостатньо місця для встановлення;
- зниження ефективності при забрудненні скла, що вимагає регулярного очищення і може бути проблематичним у важкодоступних місцях;
- залежність ефективності плоских СК від погодних умов (вони менш ефективні в умовах похмурої або хмарної погоди);
- підвищений ризик пошкодження, тобто вразливість плоских СК до ударів граду, подряпин тощо (призводить до потреби в ремонті або заміні деталей);
- значні втрати в холодну пору року навіть при герметичному корпусі і хорошему теплоізоляційному шарі, тому плоскі колектори має сенс використовувати переважно у літній період року.

Враховуючи ці недоліки, важливо уважно розглядати всі аспекти перед вибором та встановленням сонячних плоских колекторів.

Висновки

Плоский сонячний колектор – це ефективний і відносно простий пристрій для використання сонячної енергії. Його робота базується на чіткій взаємодії усіх елементів, але ключову роль відіграє абсорбер. Саме вибір матеріалу, конструкції та наявність селективного покриття визначають ефективність усього колектора. Орієнтовна вартість плоского колектора 8–20 тис. грн, а вартість повної системи (бак, насос, автоматика, трубопроводи, монтаж) складає 30–100 тис. грн. Отже, вартість самого колектора становить приблизно 30–50 % від вартості всієї системи.

1.2.3 Вакуумні трубчасті сонячні колектори

Вакуумний трубчастий колектор (далі – ВТК) є одним з типів сонячних колекторів, який використовується для збору сонячної енергії для перетворення сонячної енергії на теплову.

Він складається з ряду скляних трубок, кожна з яких містить абсорбер (поглинач), розташований у вакуумній оболонці, тобто для зменшення теплових втрат використовується глибокий вакуум між двома скляними трубками, що створює термосоподібну конструкцію. Трубчаста форма колби найбільш оптимальна для створення і утримання вакууму.

Основним елементом є вакуумна трубка, усередині якої розміщено абсорбер (поглинач сонячної енергії) та тепла трубка або інший теплопровідний елемент, що передає зібране тепло до теплоносія системи.

Основні риси:

- висока тепла ізоляція завдяки вакууму (у ВТК типу «термос» приблизно 10^{-3} – 10^{-5} Па);
- ефективна робота за будь-яких погодних умов, включно з холодним і похмурым кліматом;
- модульна конструкція, тобто трубки працюють незалежно, що спрощує обслуговування;
- використовуються для приготування гарячої води, опалення або підігріву басейнів;
- основними елементами окрім скляних трубок, абсорбера, теплової трубки є теплоносій, радіатор, ізоляція;
- теплові трубки передають тепло до колектора-теплообмінника (маніфолда), де тепла енергія далі поступає до циркуляційної системи з водою або антифризом.

Класифікація вакуумних трубчастих колекторів

Вакуумні трубчасті колектори можна класифікувати за двома основними конструктивними ознаками:

- за типом скляної трубки;
- та типом теплового каналу.

За типом скляної трубки ВТК поділяють на:

- ВТК із коаксіальною подвійною трубкою (тип Thermos);
- ВТК з єдиною скляною трубкою (із внутрішнім металевим абсорбером, тип Heat Pipe).



Рисунок 1.13 – Коаксіальна колба

Коаксіальна подвійна трубка складається з двох скляних трубок – внутрішньої та зовнішньої, між якими створено вакуум (рис. 1.13). Внутрішня трубка покривається селективним поглинаючим шаром, який захищено вакуумом від тепловтрат. Таким чином, коаксіальна вакуумна трубка із системою *U*-type – це тип ВТК,

в якому теплоносій циркулює по системі мідних або сталевих трубок у формі літери *U* з теплоносієм, розміщених усередині коаксіальних подвійних вакуумних скляних трубок (одна частина «літери *U*» веде донизу, інша повертається вгору – рисунки 1.14, 1.15).



Рисунок 1.14 – Коаксіальна вакуумна трубка із системою U-type

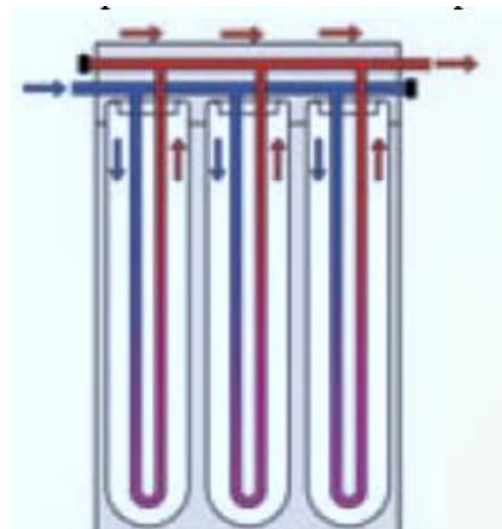


Рисунок 1.15 – Гідравлічна схема колектора

Вхід і вихід для теплоносія знаходяться з одного боку, що спрощує монтаж і обслуговування. Тепло передається через теплопровідну вставку (пластина на рис. 1.14) від абсорбера до трубки з теплоносієм. У системах типу U-type теплоносій циркулює всередині трубок, тому необхідний безперервний рух рідини (насосний або, рідше, гравітаційний), тобто теплоносій фізично проходить через всю трубку туди і назад, і передає тепло в маніфольд (теплообмінник).

Основні переваги полягають в простоті монтажу, підвищеній ремонтпридатності, бо трубку можна замінити окремо, недоліки – це складна конструкція та вища вартість, необхідність герметичної гідравлічної системи потреба у циркуляції теплоносія (насос).

Найпоширенішим типом ВТК з непрямою передачею тепла є ВТК з єдиною скляною трубкою і внутрішнім металевим абсорбером (тип Heat Pipe) (рис. 1.16).

Принцип дії:

- абсорбер поглинає сонячне випромінювання;
- робоча рідина (наприклад, спирт або інша низькотемпературної рідина) в тепловій трубці випаровується;
- пара піднімається до конденсатора і віддає тепло теплоносію;

– конденсат повертається вниз (стікає вниз по стінках теплової трубки), цикл повторюється.

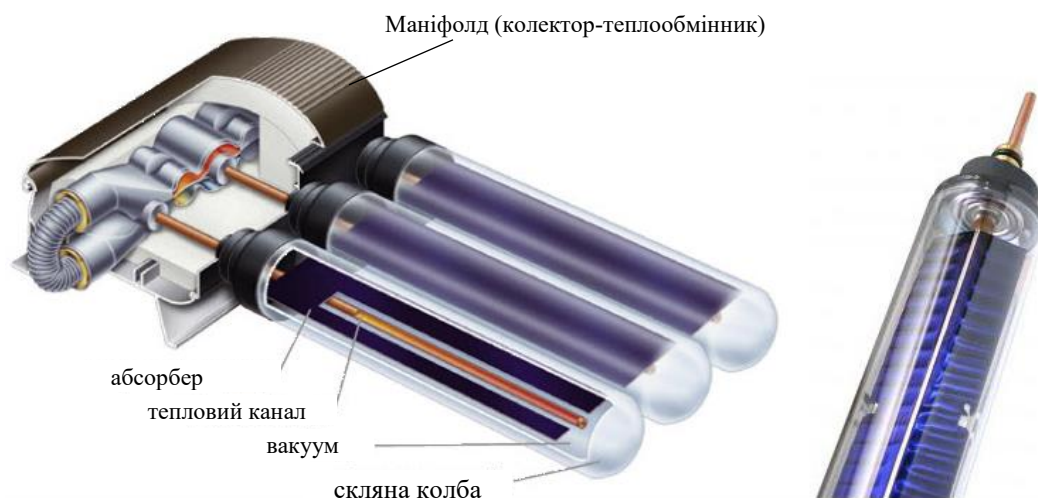


Рисунок 1.16 – ВТК із каналом Heat Pipe

Тут немає прямого потоку теплоносія через трубку. Замість цього працює фазовий перехід речовини всередині запаяної теплової трубки. Уся циркуляція відбувається всередині теплової трубки, а не через неї. Тобто ми маємо окрему герметичну систему теплоперенесення у кожній трубці, вода або антифриз не тече всередині скляної трубки і весь теплоносій циркулює лише в колекторному блоці (маніфольді).

Перевагами є висока ефективність при великих ΔT , стабільна робота в холодних умовах, можливість заміни окремих трубок без зливу системи, відсутність прямого контакту теплоносія зі скляною трубкою. Недоліками є необхідність нахилу ($25\text{--}30^\circ$) для повернення конденсату, вища вартість порівняно з прямоточними системами.

За типом теплового каналу ВТК поділяють так:

- вакуумні трубчасті колектори із прямою циркуляцією (Direct Flow, U-type);
- вакуумні трубчасті колектори із тепловою трубкою (Heat Pipe).

У системах із прямою циркуляцією теплоносій (вода або антифриз) циркулює безпосередньо всередині вакуумної трубки, проходячи через

вбудований мідний або інший металевий теплообмінний контур (існує прямий контакт теплоносія з абсорбером, рис. 1.17), тобто теплоносій безпосередньо протікає і нагрівається в кожній з трубок колектора. Такі колектори мають доволі складний процес передачі тепла: тепло передається кілька разів, від скла до алюмінієвих ребер, потім від алюмінію до самої теплової труби і тільки потім передається теплоносію геліосистеми. Тому в поєднанні з круглою формою абсорбуючої поверхні ефективність сонячного колектора цього типу невисока. Показники максимального оптичного ККД η_0 колектора сягають 65 %.

Перевагами таких вакуумних трубчастих колекторів є проста та дешевша конструкція, високий ККД при інтенсивному сонячному випромінюванні, а недоліками – те, що вони потребують постійної циркуляції теплоносія, складніші в обслуговуванні (ризик протікань) і менш ефективні при високих ΔT . Сфера застосування – сезонні системи ГВП, теплий клімат.



Рисунок 1.17 – Вакуумна коаксіальна трубка з прямоточним тепловим каналом: 1 – зовнішня скляна колба; 2 – високоселективне поглинальне покриття; 3 – алюмінієва вставка; 4 – тепловий канал з теплоносієм; 5 – вакуумний прошарок; 6 – внутрішня скляна колба

У вакуумних колекторах із тепловою трубкою Heat Pipe (рис. 1.18) передача тепла відбувається через випаровування-конденсацію всередині герметичної трубки за принципом: випаровування → підйом пари → конденсація → повернення рідини.

Основні переваги – висока ефективність при великих ΔT , стабільна робота, можливість заміни окремих трубок. Недоліки – вища вартість, необхідність нахилу (приблизно $25\text{--}30^\circ$). Застосування: цілорічні системи, холодний клімат.

Сонячний вакуумний колектор з трубкою типу Heat-pipe, тобто теплова труба, займає більшу частину ринку сонячних колекторів.

Колектор-теплообмінник («верхній колектор» або маніфолд) – це пристрій, який виступає як теплозбірник. Знаходиться у верхній частині вакуумного трубчастого колектора, з'єднаний з усіма трубками ВТК. Має вигляд горизонтального металевого блока, закритого кожухом із теплоізоляцією.

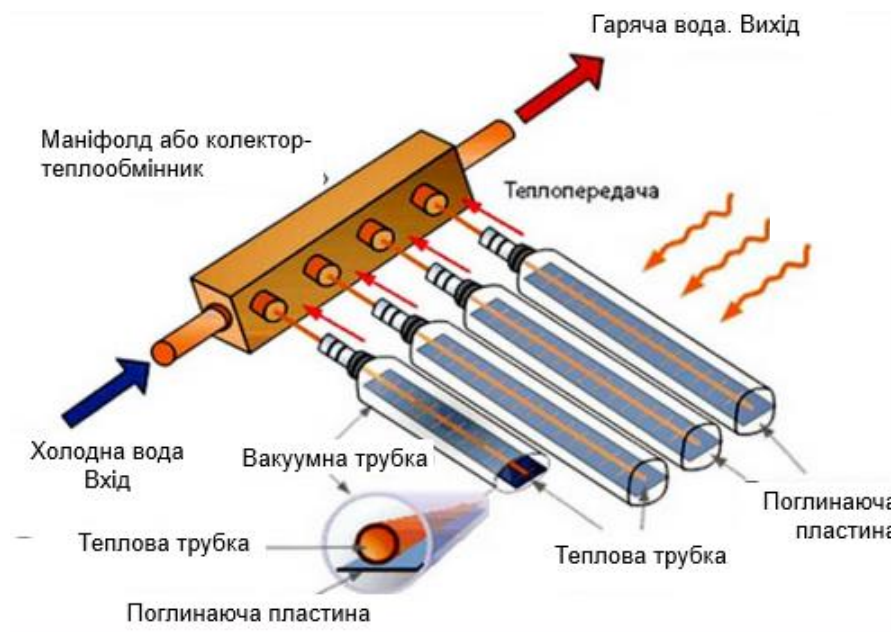


Рисунок 1.18 – Конструкція ВТК із каналом Heat Pipe

Функції маніфолду:

- приймає тепло від усіх теплових трубок;
- передає це тепло до теплоносія (зазвичай вода або антифриз), який

циркулює по системі (через бак-накопичувач, бойлер або теплообмінник у системі опалення).

Конструктивні особливості:

- Виготовлений із міді, нержавіючої сталі або алюмінію;
- має теплоізоляцію (мінеральна вата або пінополіуретан) навколо корпусу, щоби уникати втрат;
- усередині його система трубок або каналів, через які рухається теплоносій.

Іншими словами, маніфолд – це центральний вузол передачі тепла, який дає змогу об'єднати десятки трубок в одну систему (збирає всю енергію разом і передає далі в систему), з одним виходом тепла; якщо він працює неефективно, падає продуктивність усього колектора.

Різні форми теплових каналів поєднуються з різними форматами вакуумних колб. Наприклад, вакуумна коаксіальна трубка може поєднуватися з тепловим каналом типу «Heat-pipe». Цей сонячний вакуумний колектор є найбільш поширеним через свою низьку вартість і простоту заміни пошкоджених трубок (рис. 1.19).



Рисунок 1.19 – Вакуумна коаксіальна трубка в поєднанні з тепловим каналом «Heat-pipe»:

- 1 – зовнішня скляна колба; 2 – високоселективне поглинальне покриття;
- 3 – алюмінієві ребра; 4 – вакуумний прошарок; 5 – тепловий канал з рідиною, яка легко випаровується; 6 – внутрішня скляна колба

Коаксіальна вакуумна трубка так само може бути використана для колектора з прямоточним тепловим каналом – рисунок 1.20. У цих видах колекторів завдяки зменшенню кількості теплопередач (теплота від алюмінієвого шару передається відразу трубкам, у яких циркулює теплоносій геліосистеми), максимальний ККД може становити для деяких моделей до 76 %.

Недоліком може бути те, що при певному характері ушкодження, заміни може потребувати весь сонячний колектор, а не тільки колба.

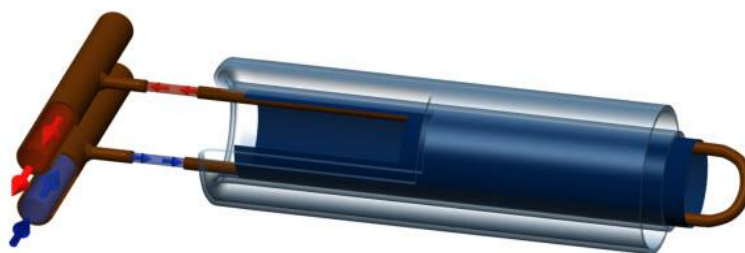


Рисунок 1.20 – Конструктивна особливість колектора з прямоточним тепловим каналом та U-подібною трубкою

Порівняльна таблиця характеристик вакуумних трубчастих колекторів з тепловою трубкою heat pipe та з прямоточним тепловим каналом (пряма циркуляція, U-type) наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця характеристик вакуумних трубчастих колекторів

Характеристика	Вакуумний трубчастий (U-type, прямоточний канал	Вакуумний трубчастий (Heat Pipe)
1	2	3
ККД	Вищий (менше проміжних втрат)	Трохи нижчий (через стадію випаровування-конденсації)
Обслуговування	Складніше: при пошкодженні трубки треба розбирати контур	Просте: трубку можна легко замінити окремо

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Робота взимку	Менш ефективний	Краще працює в мороз, має властивість самоочищення снігом
Надійність	Менш зручний у ремонті, вразливий при витоках	Більш надійний завдяки незалежності трубок
Ціна	Дешевший	Дорожчий
Нахил	Обов'язкового нахилу не вимагають, циркуляція теплоносія забезпечується насосом або природною конвекцією, їх можна розміщувати горизонтально або вертикально залежно від проєкту	Нахил обов'язковий, бо конденсат має стікати самотливом назад у трубку

1.2.4 Вакуумні плоскі сонячні колектори

Кроком уперед в технологіях використання сонячної енергії став плоский вакуумний колектор, що поєднує у собі переваги технології плоских колекторів і вакуумної ізоляції, застосовуваної в трубчастих вакуумних колекторах. Прикладом такої конструкції є колектор із серії Heliostar словацької фірми Thermo-Solar (у Польщі відомої як Solar-Pro). Вакуум отримують при відкачуванні повітря з простору між абсорбером та склом. Завдяки такій конструкції ефективність установки зростає у порівнянні з конвенційними плоскими колекторами до 75 %, бо він має значно менші теплові втрати в навколишнє середовище, оскільки вакуум є ідеальним теплоізолятором.

Основні особливості цього типу колектора:

- під абсорбером знаходиться вакуумна камера, яка допомагає зберігати тепло, утримуючи теплопровідність між абсорбером та навколишнім середовищем на мінімальному рівні;
- камера зазвичай виготовлена з високоякісного матеріалу, що має високу герметичність і стійкість до високих температур (створення вакууму в камері забезпечується за допомогою вакуумного насоса);

– створений вакуум (приблизно 10^{-2} до 10^{-4} Па або від 10^{-7} до 10^{-5} мм рт. ст.) стає ідеальним утеплювачем, що дозволяє мінімізувати втрати тепла через конвекцію або теплопровідність;

– досягнення зазначеного тиску у плоскому вакуумному колекторі через велику площу абсорбера є складнішим, ніж у трубчастому, бо вимагає надійного герметичного корпусу, спеціального вакуумного вікна з низькою теплопровідністю, стабілізації тиску з часом.

Переваги вакуумних плоских колекторів:

– вакуумні плоскі колектори відзначаються високою ефективністю збору сонячної енергії, бо вакуумна камера допомагає зберігати тепло всередині колектора, запобігаючи втратам тепла через конвекцію або теплопровідність;

– вакуумні плоскі колектори можуть працювати в широкому діапазоні температур, від низьких до високих значень (адаптивність), що дозволяє їм бути ефективними як у холодних, так і у спекотних кліматичних умовах;

– вакуумні плоскі колектори стійкі до погодних умов, таких як дощ, сніг, вітер тощо, завдяки міцному абсорберу.

Порівняльна характеристика вакуумного трубчастого і плоского колектора наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння вакуумного трубчастого і плоского колектора

Параметр порівняння	Тип колектора	
	Плоский	Вакуумний трубчастий
Конструкція	Становить плоску конструкцію з пластиною абсорбером під скляною панеллю	Складається з окремих скляних трубок з вакуумною ізоляцією
Ефективність	<ul style="list-style-type: none"> – нижчий ККД при низьких температурах повітря (40–60 %); – більші теплові втрати; – найкраща ефективність у теплу пору року 	<ul style="list-style-type: none"> – вищий ККД при низьких температурах (60–85 % залежно від модифікації); – менші теплові втрати завдяки вакуумній ізоляції; – ефективний при слабкому сонячному випромінюванні та в холодну пору року
Практичне застосування	<ul style="list-style-type: none"> – дешевший у виробництві; – простіша конструкція; – більш стійкий до механічних пошкоджень; – краще підходить для регіонів з теплим кліматом 	<ul style="list-style-type: none"> – краще підходить для холодних регіонів; – ефективніший узимку та в похмуру погоду; – менша площа для тієї ж потужності; – легка заміна окремих трубок у разі пошкодження
Вартість	Дешевший, але потребує більшої площі для отримання такої ж кількості енергії	Дорожчий, але ефективніший у складних кліматичних умовах
Практичне застосування	<ul style="list-style-type: none"> – дешевший у виробництві; – простіша конструкція; – більш стійкий до механічних пошкоджень; – краще підходить для регіонів з теплим кліматом 	<ul style="list-style-type: none"> – краще підходить для холодних регіонів; – ефективніший узимку та в похмуру погоду; – менша площа для тієї ж потужності; – легка заміна окремих трубок у разі пошкодження
Вибір між вакуумним трубчастим і плоским колектором залежить від конкретних умов експлуатації, клімату регіону та бюджету. Для територій з холодним кліматом та обмеженим сонячним випромінюванням вакуумні трубчасті колектори є більш оптимальним рішенням, незважаючи на вищу вартість.		

1.2.5 Відкриті сонячні колектори

Це найпростіший вид сонячних колекторів (рис. 1.21). Він є пластиковою ємністю з водою і поверхнею з пластику або гуми, які добре поглинають сонячні промені. Зазвичай відкриті колектори використовуються лише у літній період у приватних будинках, на дачах для підігріву води у басейні чи літньому душі. Поверхня такого колектора склом не покривається. При низькій вартості і простоті конструкції колектор цього виду має низький ККД, а також невеликий термін експлуатації (від 1 до 3 років). Оскільки продуктивність колектора цього виду безпосередньо залежить від погодних умов та температури навколишнього середовища, його доцільно використовувати лише у південних регіонах країни.

Для опалення басейну влітку найпростішим і ефективним рішенням є використання відкритих сонячних колекторів. Вони працюють на принципі простого нагрівання води за допомогою сонячного випромінювання.

Основні переваги використання відкритих сонячних колекторів для басейнів порівняно з іншими системами включають:

- простота у встановленні та експлуатації, тобто не потребують складних технічних знань для встановлення або обслуговування;
- ефективність влітку для ефективного нагрівання води у басейнах без необхідності використання додаткових джерел енергії;
- невелику вартість у порівнянні з іншими системами опалення басейнів;
- екологічність використання з точки зменшення викидів вуглекислого газу і споживання електроенергії;
- надійність в експлуатації.

У системі відкритих СК для опалення басейну використовується насос, який відповідає за циркуляцію води через сонячний колектор і басейн, забезпечуючи тим самим нагрівання води сонячним випромінюванням. Використання насоса забезпечує ефективну циркуляцію води через СК, що дозволяє максимально використовувати сонячне тепло. Отже, для опалення

басейну влітку найпростіші СК є ефективним та економічно вигідним рішенням.



Рисунок 1.21 – Відкриті сонячні колектори для підігріву басейну

1.2.6 Фокусувальні сонячні колектори

У фокусувальних (концентрувальних) сонячних колекторах застосовуються різні системи дзеркал або лінз для збільшення щільності потоку сонячного випромінювання, що надходить на поглинальну поверхню плоских або трубчастих поглиначів (рис. 1.22). Крім параболічних дзеркал використовують також плоскі та циліндричні дзеркала. Концентрувальні сонячні колектори характеризуються відносно невеликими розмірами поглинальної поверхні та високою щільністю сконцентрованої сонячної енергії. Для забезпечення максимальної ефективності вони повинні бути орієнтовані перпендикулярно до напрямку падіння сонячних променів, тому оснащуються системами автоматичного стеження за рухом Сонця. Такі колектори можуть мати потужність від кількох десятків до кількох сотень ват і використовуються для отримання теплової енергії, зокрема для підігріву води.

Одним із прикладів концентрувальних установок є система, розроблена фахівцями німецького інституту Fraunhofer. У цій установці як концентратор використовується лінійне дзеркало Френеля (Fresnel), а теплоносієм є вода. Під дією сконцентрованого сонячного випромінювання вода нагрівається та випаровується, після чого пара може подаватися на турбіну для виробництва електроенергії. Відбиті від дзеркал сонячні промені спрямовуються на поглинач, який становить трубопровід довжиною близько 100 м, розташований

на висоті кількох метрів над полем дзеркал (рис. 1.22).

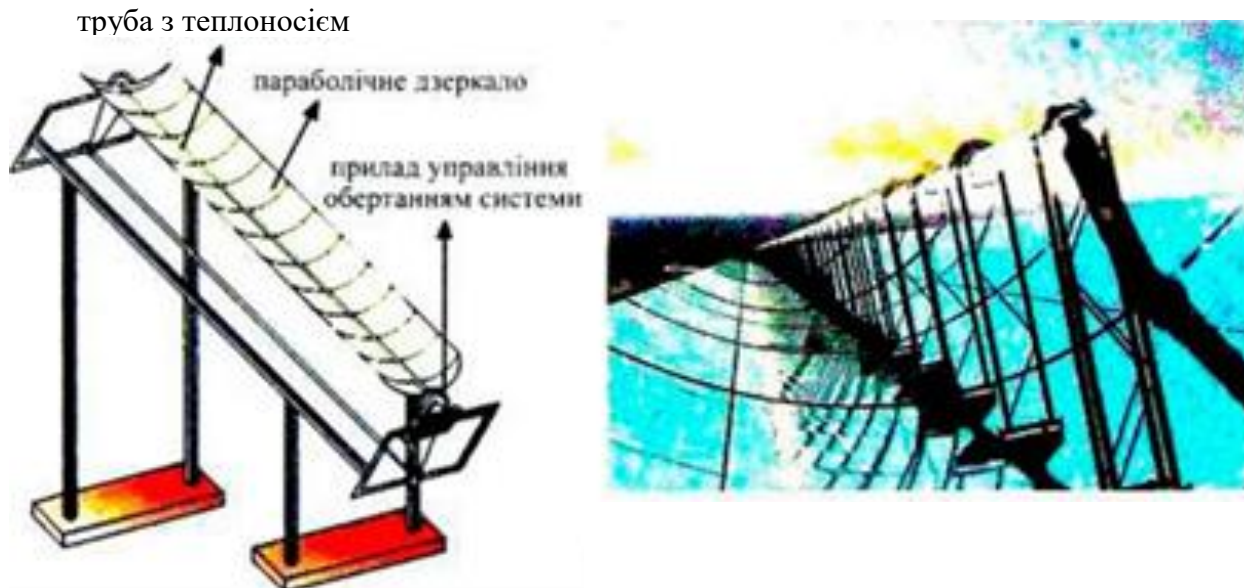


Рисунок 1.22 – Схема та вигляд концентрувального сонячного колектора

Конструкція концентрувального геліоприймача (параболічного концентратора) подана на рисунку 1.23.

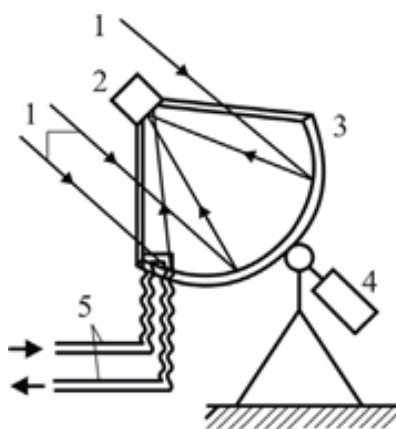


Рисунок 1.23 – Концентрувальний геліоприймач: 1 – сонячні промені;

2 – теплоприймальний елемент(сонячний колектор); 3 – дзеркало;

4 – механізм стеження; 5 – трубопроводи, що підводять і відводять теплоносій

Концентрувальні геліоприймачі становлять сферичні або параболічні дзеркала, виготовлені з полірованого металу чи інших матеріалів з високою відбивною здатністю. У фокусі дзеркала розміщується теплоприймальний елемент (сонячний котел), через який циркулює теплоносій – вода або

незамерзаюча рідина. При використанні води як теплоносія в холодний період року систему необхідно спорожнювати для запобігання замерзанню.

Для забезпечення високої ефективності уловлювання та перетворення сонячної енергії концентрувальний геліоприймач повинен постійно бути орієнтований на Сонце. З цією метою установка оснащується системою стеження, до складу якої входять датчик положення Сонця, електронний блок керування та електродвигун з редуктором, що забезпечує поворот конструкції у двох площинах.

На рисунку 1.24 подана принципова схема рідинної комбінованої двоконтурної низькотемпературної системи сонячного опалення з параболоциліндричним концентратором і рідинним теплоаккумулятором. У контурі геліоприймача як теплоносієм використовується антифриз, а в контурі системи опалення – вода. Перевагою систем із концентрувальними геліоприймачами є можливість отримання теплоносія з відносно високою температурою (до 100 °С і вище), а також виробництва пари. До недоліків належать висока вартість обладнання, необхідність регулярного очищення відбивних поверхонь від пилу та забруднень, потреба у використанні систем стеження за Сонцем і додаткові витрати електроенергії на їх роботу. Крім того, такі установки ефективно працюють переважно за наявності прямого сонячного випромінювання. Зазначені фактори обмежують широке застосування концентрувальних геліоприймачів у низькотемпературних системах тепlopостачання. Тому для більшості систем ГВП та сонячного опалення найчастіше використовують плоскі сонячні колектори.

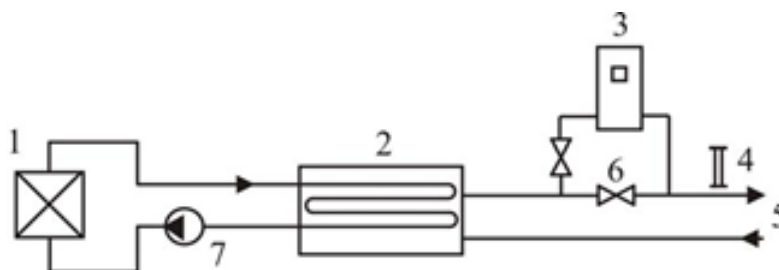


Рисунок 1.24 – Рідинна комбінована двоконтурна низькотемпературна система сонячного опалення з параболоциліндричним концентратором і рідинним теплоаккумулятором: 1 – параболоциліндричний концентратор; 2 – рідинний теплоаккумулятор; 3 – додаткове джерело тепла; 4 – термометр; 5 – контур системи опалення; 6 – регулювальний вентиль; 7 – циркуляційний насос

2 ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ І ОПАЛЕННЯ

2.1 Конструкція, налагодження, введення в експлуатацію та обслуговування геліоколекторних установок

2.1.1 Конструкція геліоколекторних установок

Поле колекторів, теплотраси з відповідним устаткуванням і теплообмінником (чи солярний накопичувач з теплообмінником) утворюють основу геліоколекторної установки (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Поле геліоколекторів на плоскому даху

Солярне устаткування по кількості контурів, що підключаються до колекторного поля, підрозділяють на одно-, двох- чи багато- контурне. Чим більше контурів, тим краще утилізує система енергію, отриману колекторами. Звичайно, вони є дорожчими і зазвичай їх доцільно використати у разі застосування більш ніж трьох колекторів. За способом забезпечення циркуляції в первинному контурі вони підрозділяються на:

- термосифонні (гравітаційні) системи, в яких теплоносій приводиться в рух на основі різниці питомих ваг гарячого і холодного теплоносія;
- системи з примусовою циркуляцією за допомогою насоса.

Термосифонна циркуляція застосовується переважно в одноконтурних системах. Колектори зі змієподібним абсорбером, тобто теплові ряди уніфікованих колекторів не годяться для термосифонних систем. Для таких систем використовуються колектори в комплекті з усім устаткуванням, включаючи бойлер і опорну конструкцію. Термосифонні установки досягають меншого енергетичного річного прибутку, ніж системи з примусовою циркуляцією, що пов'язано зі зниженою швидкістю циркуляції при малих потужностях.

Приладдя колектора

До приладдя колектора відносяться ті частини первинного контуру, якими колектори приєднуються один до одного і до інших деталей солярного устаткування. До цієї групи також відносяться пристрій для виведення повітря, який встановлюється прямо на колектор, і гільза для датчика температури.

При підключенні солярного устаткування з мідними трубопроводами для пайки використовують такий фітинг:

- патрубок;
- Т-подібне відгалуження (трійник);
- пробка;
- пробка з пристроєм для виведення повітря;
- кутове відведення.

У разі застосування трубопроводів з чорної сталі потрібні також латунні перехідники з різьбленням, які підключаються до колекторів пайкою:

- Т-подібне відгалуження (трійник);
- роз'ємне з'єднання кутове;
- роз'ємне з'єднання пряме;
- перехідник.

Пристрої для виведення повітря, що монтуються на колекторах, застосовуються в такому вигляді:

- пробка з пристроєм для видалення повітря;

– повітрозбірник з вентилям.

Датчик температури зазвичай монтується на останній колектор в гільзу, яка безпосередньо притиснута до абсорбера, або у вихідний патрубок.

Опорні конструкції

Опорну конструкцію з колекторами здебільшого поміщають у відносно недоступних місцях, де вона перебуває під постійним атмосферним впливом. Конструкції з анодованого алюмінію не потребують обслуговування, і їхній термін використання співпадає з колекторами. Передбачаються варіанти конструкції для монтажу колекторів на плоский і похилий дахи або для монтажу в дах, коли колектори слугують одночасно і покриттям.

Опорні конструкції поставляються для систем до 8 метрів або для посиленних систем – до 20 метрів над рівнем землі. Для великих систем або у разі монтажу систем понад 20 метрів розробляється уточнений проєкт, в який входить статичний розрахунок. Документи, в які включені основні принципи монтажу і керівництво по монтажу, додаються до кожного набору конструкції.

Теплообмінники, солярні бойлери та накопичувачі тепла

Для невеликих сонячних установок використовуються бойлери зі збільшеною теплообмінною поверхнею, порівняно із вживаними в системах центрального опалювання. Зазвичай їх називають «солярний бойлер». Його об'єм вибирають на основі розрахункової або передбачуваної витрати гарячої води. Об'єм бака і площа теплообмінника у кожному конкретному випадку розраховуються відповідно до кількості колекторів. Орієнтовно, для сонячних колекторів до 12 м² на кожен квадратний метр колектора доводиться 50 літрів об'єму і теплообмінник площею 0,3 м². Іншою важливою особливістю солярного бойлера, з погляду його терміну використання, є антикорозійна обробка внутрішньої поверхні. До кращих покриттів відносяться тефлон і кераміка.

Окремі елементи сонячного устаткування необхідно вибирати так, щоб виключити комбінацію матеріалів, що створюють електрокорозію. Допускаються наступні комбінації матеріалів для складових частин солярного устаткування з сучасними колекторами:

- трубопроводи: мідь, чорна сталь;
- теплообмінник: мідний, з нержавіючої сталі з латунним перехідником, сталевий з латунним перехідником.

Для великих солярних установок або в тих випадках, коли необхідно відокремити різні контури, застосовуються пластинчаті протитечієві теплообмінники. Їхня перевага:

- велика потужність і підвищений ККД;
- невеликі габарити.

Перш ніж монтувати складні, великі сонячні установки, необхідно визначити їхній оптимальний розмір. При використанні дублікатів (подвійний корпус) або простих трубчастих теплообмінників, вбудованих у бойлер, виходить нижчий коефіцієнт корисної дії (ККД). Коефіцієнт теплопередачі в цьому випадку істотно менше, що спричиняє за собою падіння ККД залежно від різниці температур. Таке рішення застосовне в невеликих сонячних установках для підігрівання води, оскільки вони не потребують циркуляційного насоса і обходяться дешевше за капітальними витратами і в експлуатації.

У разі монтажу сонячної установки у будівлі, в якій вже існує бойлер для гарячої води, доцільно перед цим бойлером підключити ще солярний бойлер. Послідовне підключення двох бойлерів (накопичувачів) вигідніше, оскільки недостатнє розшарування гарячої і холодної води в одному бойлері (накопичувачі) робить негативний вплив на ККД.

Холодна водопровідна вода підігрівається в солярному бойлері починаючи з 10–15 °С до 25–50 °С навіть в період зниженої інтенсивності сонячного випромінювання. Класичний бойлер доводить температуру до необхідного рівня (55 °С) з істотно меншими витратами.

При великих солярних бойлерах і накопичувачах тепла необхідно враховувати і небезпеку появи бактерій типу «легіонелла». Ці бактерії мають циліндричну форму і є природною складовою частиною будь-якої прісної води. Їх існує більше 30 видів. Для здоров'я людини небезпечні тільки ті види бактерій, які розмножуються найшвидше при температурі 30–45 °С. Людина може заразитися при потраплянні крапель води, що містять ці бактерії, в організм. Суть боротьби з бактеріями полягає в тому, що бойлери місткістю більше 400 літрів обов'язково один раз в добу підігрівують до температури 60 °С, при якій бактерії знищуються. У спеціальній літературі наведені гідравлічні схеми великих солярних установок, принцип розрахунку яких полягає у відділенні великого накопичувача від робочого бойлера гарячої води об'ємом не більше 400 літрів за допомогою теплообмінника.

Циркуляційний насос та зворотний клапан

Циркуляційний насос забезпечує рух теплоносія між колекторами і теплообмінником. Зазвичай колектори в кількості до 10 штук в одному ряду підключаються паралельно. При цьому при витраті теплоносія 70 літрів на годину і його температурі 50 °С перепад тиску складає приблизно 3 кПа. Ці вимоги здійсненні будь-яким насосом за умови, якщо його можна використати для роботи на розчині пропіленгліколю. Дуже надійними в цьому відношенні є насоси простого монтажу з регулюванням потужності до декількох мір.

Оскільки витрата тепла більшістю насосів перевищує потрібну величину, в контур насоса включається регулювальний елемент. Кращими з них є кульовий вентиль або засувка. Щоб виключити циркуляцію теплоносія у зворотному напрямі, в контур монтують (в обов'язковому порядку) зворотний клапан. На роботу системи клапан не робить ніякого впливу, чи буде він горизонтального або вертикального типу.

Трубопроводи та теплоізоляція

Трубопроводи первинного контуру повинні витримувати температуру 180 °С і тиск залежно від типу використаного запобіжного клапана. Діаметр

трубопроводів визначається на основі їх довжини і кількості колекторів. Застосовуються труби з міді або чорної сталі.

Для первинних контурів з металевими абсорберами не рекомендується використовувати пластмасові труби. Проблематичним є і застосування оцинкованої сталі, оскільки теплоносій повинен містити в цьому випадку відповідні інгібітори корозії.

Для великих відстаней або більшої кількості колекторів діаметри труб визначають розрахунком. Теплоізоляція первинного контуру дуже важлива, тому що втрати тепла можуть різко знизити ККД солярної установки. Вимоги по теплоізоляції такі ж, як і у разі інших теплотрас з урахуванням того, що вживаний матеріал не повинен вбирати вологість і бути стійким до ультрафіолетового випромінювання. Одночасно необхідно враховувати той факт, що у разі збою електроживлення і пов'язаного з ним відключення насоса, в деяких місцях контуру досягається температура 160–180 °С. З цієї причини трубопровід між колекторами і теплообмінником не рекомендується ізолювати матеріалами, виготовленими з пластиків, а тільки на основі мінеральних волокон. Цим вимогам повністю задовольняють ізоляційні прошарки із скловолосна. Вони зазвичай покриті армованою алюмінієвою фольгою і закріплюються самоклеючою стрічкою. У разі потреби, для механічного захисту ізоляції, застосовуються міцніші матеріали.

З пластмасових теплоізоляційних матеріалів найбільшу температурну стійкість мають матеріали, виготовлені на базі синтетичного каучуку. Ці матеріали застосовують на виході з колектора як другий шар, тоді як першим шаром слугує скляна стрічка або інший термостійкий матеріал.

Деаерація и видалення повітря

Основною передумовою хорошої циркуляції теплоносія є повне видалення повітря з контуру. Пристрій для виведення повітря використовується при заповненні системи рідиною, з якої поступово, під впливом підігрівання, звільняється розчинене повітря.

Застосовують також ручний пристрій для виведення повітря, деаераційний бачок з ручним вентилям або відповідний автоматичний пристрій для виведення повітря. Потрібно враховувати, що при монтажі на колектор або пряму гілку перед теплообмінником, вони повинні працювати при 160–180 °С. Зазвичай деаераційний бачок підключають у вищій точці устаткування (на виході з колектора) з виведенням і запірним краном на горищі або в машинному залі.

У такому разі дуже зручно заповнювати, перевіряти на щільність і деаерувати контур з одного місця. У вищій точці устаткування підключають і ручний пристрій для виведення повітря, який використовується при заповненні контурів. У машинному залі, за циркуляційним насосом, підключають і автоматичний абсорбуючий пристрій для виведення повітря.

Застосовуючи стандартну запірну і регулювальну арматуру, різьбові з'єднання, розширювальні баки з гумовою мембраною, неможливо виключити повільне, але постійне проникнення повітря дифузією в закритий первинний контур. У результаті теплоносій поступово насичується повітрям. Це насичення пропорційно абсолютному тиску повітря над рідиною і збільшується з підвищенням температури.

Негативний вплив повітряних бульбашок в первинному контурі полягає в такому:

- пониження ККД установки в результаті збільшення витрат;
- погіршення теплопередачі в колекторах і теплообміннику (зменшення поверхні теплообміну);
- прискорення корозійних процесів з подальшим скороченням терміну використання устаткування;
- ушкодження циркуляційного насоса (ерозія лопаток через кавітацію, знос підшипника).

Окрім стандартних способів видалення повітря, заснованих на застосуванні різних вентилів, існує також інші методи, наприклад, шляхом різкого зниження швидкості рідини в камері, заповненій спеціальними

кільцями. Через пониження рівня рідини поплавець відкриває вентиль, і зайве повітря викидається в атмосферу. Потім рівень рідини піднімається до норми, і поплавець закриває вентиль. В результаті вдається видалити усі повітряні бульбашки, що сприятливо впливає на правильну роботу первинного контуру.

Насос підживлення

Цей насос використовується для заповнення первинного контуру теплоносієм, або у разі несправності в контурі, яка виникає внаслідок появи повітря в системі або скидання рідини. Застосовується будь-який ручний або електричний насос з тиском. Зазвичай в системах із запобіжником, що розрахований на тиск 600 кПа, заповнений тиск дорівнює 350 кПа.

Розширювальний бак та запобіжний клапан

Первинний контур геліоколекторної установки монтується лише як закритий з розширювальним напірним баком. Останній компенсує об'ємні зміни, які виникають при зміні температури теплоносія. Якщо об'єм розширювального бака занадто малий, то при охолодженні теплоносія може виникнути підсос в контурі. Це спричиняє за собою підсос повітря через нещільність в арматурі. При збої електроживлення, температура теплоносія може досягти точки кипіння, тобто утворюється пара, і в результаті відбувається скидання рідини через запобіжний клапан. У обох випадках з'являється повітря в первинному контурі, і це може викликати уповільнення циркуляції теплоносія, а також підвищену корозію усіх металевих елементів.

Щоб уникнути цього ефекту, необхідно раціонально підбирати об'єм розширювального бака і правильно його підключити до первинного контуру. При розрахунку об'єму розширювального бака враховують не лише вплив припинення циркуляції теплоносія в первинному контурі, а також можливість його закипання в колекторах.

Запобіжний клапан підбирають з урахуванням граничного робочого тиску первинного контуру, який найчастіше визначається граничним тиском колектора або вживаного устаткування (частіше за увесь напірний розширювальний бак).

Інші елементи первинного контуру

Це елементи, які в деякій мірі покращують роботу сонячної установки, але не є обов'язковими в її структурі:

- фільтр механічних забруднень уловлює тирсу та інші механічні домішки, які можуть з'явитися в устаткуванні, передусім під час монтажу; існує велика кількість різних типів таких фільтрів, основним критерієм яких є діаметр трубопроводу;

- манометр, яким користуються під час пуску системи та впродовж експлуатації для контролю; зазвичай, застосовують манометри, робочий діапазон яких вибирають залежно від максимального тиску контуру;

- термометри, з яких найбільш відповідними є біметалічні (вимірюють температуру до 150 °С); їх вставляють в гільзу на трубопроводі в прямій і зворотній гілках, а якщо застосовується регулятор з відображенням температури на дисплеї, окремі термометри не потрібні;

- витратомір, який використовується для зручного і швидкого налаштування робочих параметрів сонячної системи.

Вузол керування

Це силовий електронно-механічний блок забезпечення роботи геліоколекторних установок. Він сприяє простому і зручному монтажу геліоколекторної установки і знижує вимоги до рівня професійної підготовки і витрат робочого часу. Блоки поставляють декількох видів для різних типів насосів, з витратоміром або кульовим вентилем. За бажанням замовника контролер можна обладнати приладом для виміру поточної і загальної кількості енергії сонця.

Електронні регулятори

Регулятор за заданим законом управління, включає циркуляційні насоси тоді, коли температура колекторів перевищує температуру споживачів тепла (у

більшості випадків у бойлері гарячої води). Регулятори багатоконтурних систем, крім того, управляють триходовими кранами, які у свою чергу перемикають окремі контури.

Алгоритм перемикання контурів наступний. Насамперед заряджається теплом контур з найбільш високою температурою. Після досягнення граничної температури цього контуру або при пониженні інтенсивності сонячного випромінювання нижче необхідного рівня відбувається перемикання на другий або подальший контур. Першим контуром здебільшого є бойлер гарячої води. Другим може бути система опалювання або підігрівання води у басейні, третім – підігрів води у басейні.

2.1.2 Налагодження та введення в експлуатацію геліоколекторних установок

Сучасні серійні сонячні колектори компактні, вони стійкі до зовнішніх механічних дій, а їх монтаж дуже простий. Проте є декілька важливих вимог, які необхідно враховувати при поводженні з колекторами. Транспортують колектори в горизонтальному положенні не більше 15 штук, укладених один на одного. Під час транспортування вони мають бути закріплені, а скло захищене картоном. Якщо колекторів більше трьох штук в штабелі, необхідно обов'язково застосовувати розпірки відповідно до рекомендацій виробника.

У складських приміщеннях при температурі повітря вище 0 °C термін зберігання колекторів не обмежений. Не допустиме попадання прямого сонячного світла на абсорбер колекторів. Різкі зміни температури викликають конденсацію води усередині колекторів.

Для монтажу колекторів найбільш підходить тепла суха погода, але небажано їх монтувати під час інтенсивного сонячного випромінювання. Якщо цього не уникнути, то до заповнення колекторів теплоносієм необхідно застосувати будь-які захисні покриття.

Монтаж вакуумних трубок

Скляну вакуумну трубку встановлюють у нижній тримач, після чого підтягують до збірного колектора. При цьому трубку можна обертати по подовжній осі без наслідків для неї (фіксатор на тій, що направляє має бути відкритий). Після установки трубки необхідно защипнути фіксатор.

Перед установкою виконуються такі операції:

- термобалон (конденсатор) теплової трубки змащують термопастою перед встановленням у збірний колектор;
- контролюють положення термобалона в посадочному отворі, він повинен повністю входити в цей отвір;
- щільно затягують усі з'єднання.

Рекомендується починати монтаж установки з підготовки каналів трубопроводів. Далі ведеться монтаж рами і настановного колектора. Після завершення операцій по з'єднанню елементів встановлюють вакуумні трубки (рис. 2.2).



Для установки колекторів рекомендується застосовувати опорні конструкції, виготовлені з використанням анодованого алюмінію, які доволі різноманітні. Ці конструкції встановлюють:

- на даху зі схилом;
- на рівному даху малої висоти або на поверхню землі;
- на рівному даху великої висоти;
- можуть бути інтегровані в дах з схилом.

Рисунок 2.2 – Монтаж теплових трубок

Трубки, що виходять з колекторів, не мають бути навантажені такими моментами, що їх вигинають і обертають.

Найбільша кількість колекторів в одному ряду зазвичай не повинна перевищувати 10 штук.

При використанні додаткової теплоізоляції на базі мінеральних волокон необхідно уникати утворень зон конденсації на поверхні корпусу колектора. Така конденсація може викликати корозійні ушкодження виробу. Небезпека полягає в застосуванні лужних добавок в процесі виробництва мінеральних ізоляцій. Цю вимогу необхідно виконати також при ізоляції вхідних і вихідних трубопроводів. Рекомендується відступити на 5 мм від корпусу колектора. Колектори можна монтувати самостійно, але зазвичай для повного використання їх можливостей потрібно кваліфікований монтажний персонал і, у разі застосування складніших установок, розробка відповідного проєкту.

Монтаж колекторів на похилий дах.

Для установки колекторів на похилий дах застосовують типову опорну конструкцію, що дозволяє зручний і швидкий монтаж. Здебільшого не потрібно здійснювати ніяких додаткових ущільнень покриття завдяки спеціальним кріюкам, на яких встановлюється уся конструкція. Поставляються конструкції на два або три колектори з можливістю утворення рядів до десятка колекторів. Для з'єднання конструкцій один з одним передбачаються спеціальні сполучні елементи. Усі окремі елементи конструкції упаковують разом з інструкцією по монтажу. Якщо нахил даху різко відрізняється від необхідного кута 45° , передбачають профілі різної довжини, які використовуються для коригування цього кута.

Монтаж колекторів на плоский дах

Для монтажу колекторів на плоскому даху або будь-якій горизонтальній поверхні передбачають особливу конструкцію. У разі монтажу колекторів на землі необхідно забезпечити висоту нижньої грані колекторів мінімум 0,5 м. Опорні конструкції для монтажу на плоскому даху уніфікують в двох видах:

- на малу висоту (8–10 м);
- на велику висоту (20 м і більше над рівнем землі).

Конструкції виконуються модульними з можливістю з'єднання до 10 колекторів. Для з'єднання конструкцій один з одним передбачені спеціальні сполучні елементи. Здебільшого опорну конструкцію закріплюють до даху за допомогою великих шурупів. Опорну конструкцію до 8–10 м над рівнем землі допускається закріплювати до бетонних балок завдовжки 1 500 мм. Останні повинні забезпечити навантаження в розмірі 170 кг для кожного 1 м² колектора.

Колекторні поля, що складаються з чотирьох і більше колекторів, варто кріпити під крайніми колекторами вітряними кріпленнями. Для систем з двох або трьох колекторів достатньо одного кріплення.

Монтаж колекторів, що вбудовані в дах

Цей спосіб монтажу найбільш прийнятний в тих випадках, коли одночасно зводять будинок і сонячну установку або при реконструкції даху. Тоді колектори одночасно служать як покриття. Для такого монтажу передбачається профіль з анодованого алюмінію. Ущільнення вертикальних проміжків між колекторами в одному ряду здійснюється за допомогою алюмінієвого U-подібного профілю і мастики на основі силікону. Горизонтальні проміжки між колекторами і покриттям даху закривають бляшаними пластинами.

Трубопровід для теплоносія

Теплоносій, який використовується в цих системах, є спеціально підготовленою рідиною на глікогелевій основі для сонячних систем нагріву. Для надійної роботи установки використовуються тільки рекомендовані виробником рідини. У літній період року і у разі, якщо теплоаккумулятор повністю нагрітий, температура в сонячному колекторі може підніматися до 200 °С. Максимальний робочий тиск теплоносія в системі складає до 0,6 МПа. З цієї причини при монтажі необхідно забезпечити високоякісні з'єднання

трубопроводів. Для з'єднання колекторів, а також з'єднання жорстких трубопроводів з колектором використовуються тільки гофровані металеві патрубки.

Трубопроводи необхідно прокладати як можна коротшим шляхом від колектора до теплоаккумулятора і без перепадів, які можуть створити місце для скупчення повітря. Якщо цього не можна досягти, то і в цих місцях встановлюються ручні пристрої для виведення повітря.

Монтаж первинного контуру

Монтаж гідравлічних елементів розпочинається із закріплення бойлерів, насосів, теплообмінників або вузла управління. Окремі компоненти розміщують так, щоб вони були доступні для контролю і обслуговування (крани, пристрої для виведення повітря, термометри, манометри). Сполучні трубопроводи виконуються з міді або сталі. При монтажі рекомендується застосовувати м'яку осмотичну пайку. Спеціальну пасту, олово і увесь необхідний сполучний фітинг, а також газовий пальник включають у перелік монтажного устаткування.

Монтаж сталевих труб здійснюють за допомогою зварювання або різьбових з'єднань. Колектори підключають так, щоб подавати холодний теплоносій до нижнього входу і відводити його через верхній протилежний патрубок. Під час монтажу треба уникати попадання тирси й інших забруднень в труби. Температурне розширення трубопроводів досягає величини 2 мм на 1 м, і тому необхідно прийняти відповідні заходи для компенсації цих розширень.

Розширювальний бак підключають після теплообмінника так, щоб між ним і колекторами не було ніякого запірного елемента.

Датчик температури бойлера встановлюють в його нижній частині.

Абсорбційний пристрій для виведення повітря належить підключати до трубопроводу за теплообмінником. Якщо в системі знаходиться тільки ручний

пристрій для виведення повітря, доцільно вивести трубку в машинний зал. Це значною мірою полегшує видалення повітря з контуру. Можливо також вивести його під дах на горище.

Насос підживлення може бути підключений до системи постійно, але в цьому немає необхідності. У будь-якому випадку він підключається через запірну арматуру. Циркуляційні насоси можуть працювати тільки по замкнутому контуру. На це треба звернути увагу передусім при монтажі насосів вторинних контурів (наприклад, у басейні) і розташувати їх в місцях, де немає засмоктування повітря. Вісь обертання повинна знаходитися в горизонтальному положенні.

У найнижчій точці устаткування рекомендується підключити зливний кран. Це полегшить роботу при заміні теплоносія. Застосування вузла управління істотним чином спрощує монтаж. У ньому зосереджені майже усі елементи первинного контуру та його можна просто закріпити на стіні з мінімальними вимогами по площі. До розміщення окремих елементів гідравлічного контуру немає особливих вимог, але рекомендують зосередити їх в одному місці. Зазвичай їх встановлюють біля бойлера або накопичувача тепла. Після перевірки на щільність усі трубопроводи необхідно ізолювати.

Монтаж регулювального та електричного обладнання

До регулятора сонячної установки підключають:

- живлення напругою 220 В частотою 50 Гц;
- виводи циркуляційних насосів;
- датчики температур;
- виводи (виведення) триходових вентилів.

Конкретні схеми підключення разом з інструкцією по монтажу додаються до кожного регулятора.

Основні вимоги по монтажу

Регулятор поміщають ближче до устаткування і захищають його від попадання вологи. Термoeлектричне управління триходовими вентилями

підключають до напруги 220 В. В складних системах, коли не обійтися без допоміжних реле, рекомендується застосовувати реле з котушкою на 220 В змінного струму. Усі дроти на 220 В мають бути захищені стандартною ізоляцією, з мінімальним перерізом 0,51 мм². Усі електроприлади на 220 В обов'язково підключають до заземлення або занулення. Датчики температури підключаються двопровідними кабелями. Особливу увагу варто приділяти підключенню датчика температури колектора. Його з'єднання з кабелем має бути стійким до атмосферних умов. Мінімальні перерізи дротів від температурних датчиків необхідно враховувати у разі застосування систем з опором 100 Ом і кабелем завдовжки більше 10 м.

М'яка пайка мідних трубопроводів

Перед пайкою необхідно механічно зачистити усі стики. Рекомендується застосовувати дротяну щітку, а елементи, що потім сполучаються, покрити шаром спеціальної пасти і з'єднати. За допомогою газового пальника нагрівається місце стику. При появі сріблястих бульбашок необхідно додати м'яку олов'яну пайку у вигляді дроту (рис. 2.3). Процес пайки потрібно робити з урахуванням усіх заходів пожежної безпеки, не пошкоджуючи частини (наприклад, ущільнення), що сполучаються. Пайка може здійснюватися також електричним підігріванням.



Рисунок 2.3 – Пайка вакуумованих геліоколекторів

Типові схеми сонячних установок

Існує ряд типових схем підключення. Підключення фотоелектричної батареї безпосередньо до циркуляційного насоса з двигуном постійного струму, що використовується як основне або запасне джерело циркуляції теплоносія. Окрім термосифонних установок це єдино можливий спосіб застосування сонячних колекторів у районах без електричної мережі. У випадках такого підключення як запасне джерело, це рішення виявляється дорожчим в порівнянні з відповідним збільшенням об'єму розширювального бака.

Відомі також підключення, в яких теплоносій з колекторів подається безпосередньо в опалювальні прилади. Перевагою такого рішення є нижчі капітальні витрати (не потрібні теплообмінник і акумулятор тепла). Недоліками цієї схеми є відсутність теплової енергії під час хмарної погоди і великий об'єм теплоносія. Таке рішення доцільне у будівлях з великою теплоакумуючою здатністю, наприклад, в старих будинках з потужними кам'яними стінами.

2.1.3 Обслуговування та поточний ремонт геліоколекторних установок

Заповнення первинного контуру теплоносієм

Геліоколекторні установки заповнюють виключно теплоносієм на базі антифризу. Лише під час перевірки на щільність допустиме застосування чистої води при додатній температурі навколишнього середовища. Для систем, що мають вузол управління, додається інструкція по її заповненню.

За допомогою манометра перевіряють тиск в розширювальному баку. У разі потреби тиск підкачують або здійснюють його скидання до 250 кПа. Ручним насосом підживлення закачують теплоносій через запірний кран до тих пір, поки з другого крану почне витікати постійний потік рідини. Тоді другий кран закривають і доводять тиск до 350 кПа. Потім відкривають головну запірну арматуру між входом і виходом заповнення і видаляють повітря з насоса поворотом болта. Включивши насос, через деякий час видаляють повітря у вищій точці системи. Для надійної роботи системи видалення повітря з системи потрібно робити три-чотири рази. На цьому закінчується уся підготовка системи до експлуатації у контурах з абсорбційним пристроєм для виведення повітря. Інакше після одного-двох днів роботи системи необхідно здійснювати повторне видалення повітря, яке звільнилося з рідини.

Під час видалення повітря спостерігають за тиском системи і у разі його падіння підкачують теплоносій. Вказаний тиск відноситься до систем з граничним робочим тиском 600 кПа.

Перевірка на щільність

Перевірку на щільність потрібно здійснювати після закінчення монтажу при нормальних робочих умовах. Випробувальний тиск становить 550 кПа. У літній період рекомендується використовувати для перевірки чисту воду, яку потім замінюють антифризом. Із заповненої системи видаляють повітря і її доводять до нормального робочого тиску.

Налаштування робочих параметрів сонячної установки

Властивості солярного устаткування пов'язані з технічними параметрами використовуваних елементів (розмір колекторного поля, об'єм бойлера та ін.). Оптимальна експлуатація системи залежить від налаштування електронного регулятора і витрати циркуляційного насоса. Одноконтурні регулятори поставляються зазвичай з двома регулювальними кнопками, використовуючи які, дізнаються про граничну температуру води у бойлері та різницю температур.

У одному і тому ж об'ємі води при більш високій температурі (але не вище 65 °C) можна накопити більшу кількість енергії. Для безпеки не можна в трубопроводі подавати гарячу воду більше 65 °C та потрібно уникати утворення накипу. Різницю температур налаштовують залежно від довжини трубопроводу між колекторами і теплообмінником.

У разі багатоконтурних установок налаштовують різницю температур так само, враховуючи правило, що кожен подальший контур має меншу граничну температуру, ніж попередній. Витрату теплоносія налаштовують на рівні 30–100 л/г на один колектор залежно від схеми підключення. Якщо є можливість регулювання витрати насоса, то настроюють мінімально допустиме значення. Для точнішого налаштування застосовуються кульові вентиля у вузлі управління. Налаштування витрат дуже зручне у разі застосування витратоміру.

Контроль сонячної установки

Сонячній установці потрібний мінімальний час обслуговування. Рекомендується регулярний контроль устаткування для своєчасного виявлення можливих несправностей і забезпечення оптимальної експлуатації. Після пуску в експлуатацію впродовж двох тижнів здійснюють контроль через кожні 2–3 дні. Якщо за цей період не виникнуть ніякі несправності, то надалі достатньо контролювати установку один раз в 3–4 місяці. Контролю підлягають:

- тиск, який не повинен знижуватися, хоча залежно від температури з'являються невеликі коливання;

- температура в різних місцях устаткування, яка залежить від потужності і не повинна перевищувати гранично допустимих значень;
- наявність повітря в устаткуванні, його перевіряють короточасним відкриттям пристрою для виведення повітря (через два-три дні повітря з теплоносія виходить);
- робота насоса, який повинен обертатися завжди, коли спалахує відповідна контрольна лампочка регулятора, під час роботи насос злегка вібрує, в чому можна переконатися простим дотиком долоні;
- теплоізоляція, яка має бути сухою і без ушкоджень.

Поточний ремонт

Термін використання колекторів складає більше 20 років. Якщо вибір усіх компонентів устаткування відповідає рекомендаціям розробника і устаткування грамотно змонтоване, то упродовж усього терміну використання система вимагає мінімального догляду. Для забезпечення тривалої безперебійної роботи потрібні:

- заміна або контроль теплоносія після шести років експлуатації;
- перевірка працездатності запобіжного клапана один раз в чотири місяці;
- ревізія електричного устаткування відповідно до місцевих норм.

Вимоги з техніки безпеки

Сонячні колектори і всі компоненти солярного устаткування, фірмового постачання відносяться до безпечних виробів. Вимоги безпеки під час монтажу, обслуговування і маніпуляції є такими:

- патрубки сонячного колектора (навіть якщо він не підключений) мають достатньо високу температуру, тому їх не можна торкатися;
- сонячний колектор переносять завжди два робітників, тримаючи його за край корпусу;
- під час роботи на даху необхідно особливо строго дотримуватися правил техніки безпеки на висоті;

- під час роботи з газовим пальником необхідно дотримуватися правил пожежної безпеки;
- підключення і ремонт електричного устаткування виконує тільки кваліфікований персонал.

2.2 Основи проєктування систем сонячного теплопостачання

2.2.1 Розрахунок сонячної радіації, що падає на колектор

Для перетворення сонячної енергії в теплову використовується як пряме, так і розсіяне випромінювання. Річний розподіл цих складових подано на рисунку 2.4.

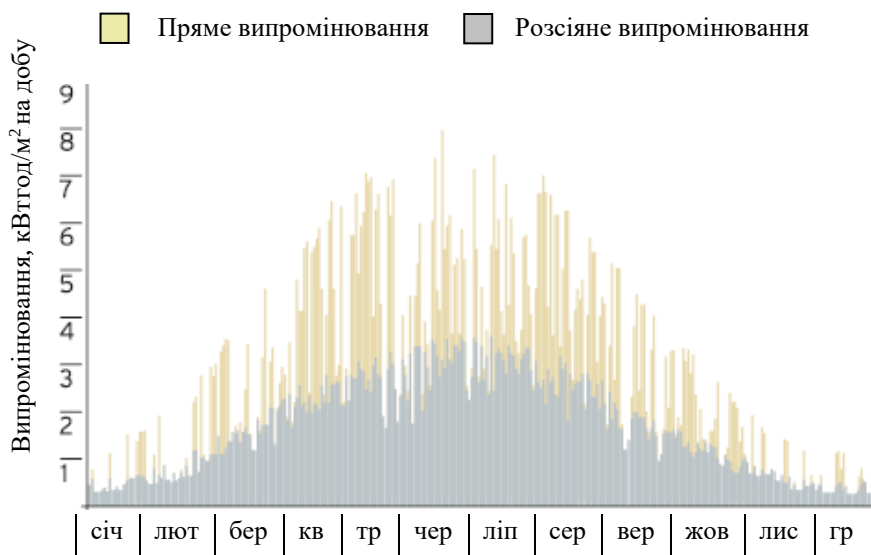


Рисунок 2.4 – Річний розподіл випромінювання

ККД сонячного колектора – це відношення корисної теплової енергії, відведеної теплоносієм, до загальної кількості сонячної енергії, що впала на поверхню колектора. Розрізняють оптичні і теплові втрати. Оптичний ККД показує, яка частина випромінювання через прозоре покриття реально досягає абсорбера і поглинається ним.

У першому наближенні ККД колектора розраховують за формулою:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k \cdot \Delta T}{I}, \quad (2.1)$$

де η_0 – номінальний ККД установки при нормальних умовах;

k – коефіцієнт теплових втрат, що залежить від типу і теплоізоляції колектора;

ΔT – різниця середньої температури теплоносія в колекторі і навколишнього повітря, °С;

I – щільність сонячного потоку (інтенсивність сонячного випромінювання), Вт/м².

Для сучасних колекторів використовують уточнену формулу, що враховує нелінійний характер втрат:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k_1 \cdot \Delta T}{I_g} - \frac{k_2 \cdot \Delta T^2}{I_g}, \quad (2.2)$$

де I_g – щільність сумарного сонячного випромінювання, що падає на колектор, Вт/м²;

η_0 – ККД колектора при $\Delta T = 0$ °С (немає різниці температур між теплоносієм і повітрям);

k_1, k_2 – коефіцієнти теплових втрат, що залежать від конструкції колектора.

Фізичний зміст η_0 – приблизно дорівнює добутку коефіцієнтів пропускну здатності скла і поглинальної здатності абсорбера. Значення k_1 і k_2 визначаються експериментально виробником для кожної конструкції колектора.

Важливо розуміти, що ККД колектора не є постійною величиною. Він змінюється протягом дня і протягом року, оскільки залежить від:

- температури теплоносія та навколишнього повітря;
- інтенсивності сонячного випромінювання.

Типовий графік зміни ККД плоского колектора при різних рівнях інсоляції ($I = 300, 800, 1\,000$ Вт/м²) наведено на рисунку 2.5. Зі збільшенням різниці температур ΔT ККД знижується, і тим швидше, чим менша інтенсивність сонячного випромінювання. Сучасні виробники колекторів

вимірюють ККД експериментально для кожної конкретної конструкції.

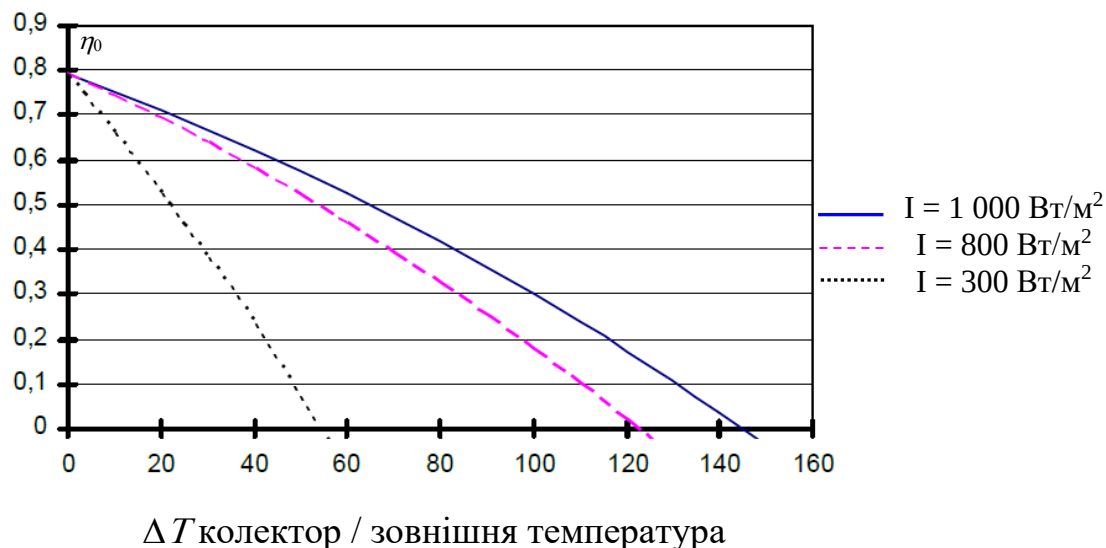


Рисунок 2.5 – Зміна ККД плоского колектора

Розрахунок інтенсивності сонячної радіації на поверхні колектора

Розрахунок теплопродуктивності геліоустановки виконується за годинними значеннями прямої та розсіяної радіації і температури зовнішнього повітря. Інтенсивність сонячної радіації для будь-якого просторового положення колектора визначається за формулою:

$$I = P_S \cdot I_S + P_D \cdot I_D, \quad (2.3)$$

де I_S – інтенсивність прямої сонячної радіації, що падає на горизонтальну поверхню, Вт/м²;

I_D – інтенсивність розсіяної сонячної радіації, що падає на горизонтальну поверхню, Вт/м²;

P_S і P_D – коефіцієнти положення колектора для прямої і розсіяної радіації відповідно.

Коефіцієнт положення сонячного колектора для розсіяної радіації необхідно визначати за формулою:

$$P_D = \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (2.4)$$

де β – кут нахилу сонячного колектора до горизонту.

Наведена інтенсивність поглиненої радіації (з урахуванням оптичних втрат прозорого покриття) визначається за формулою, Вт/м²:

$$q_{\theta} = 0,96 \cdot (P_s \cdot \tilde{S} \cdot I_s + P_d \cdot \tilde{D} \cdot I_d), \quad (2.5)$$

де $\tilde{S}$ і $\tilde{D}$ – наведені (ефективні) оптичні характеристики колектора для прямої та розсіяної сонячної радіації, які враховують сукупний вплив оптичних втрат у колекторі (коефіцієнт пропускання прозорого покриття, коефіцієнт поглинання абсорбера, кут падіння сонячних променів, інші оптичні втрати).

За відсутності паспортних даних виробника значення оптичних характеристик можна прийняти:

- $\tilde{S} \approx 0,74$; $\tilde{D} \approx 0,64$ – для колекторів з одним склом;
- $\tilde{S} \approx 0,63$; $\tilde{D} \approx 0,42$ – для колекторів з двома стеклами.

Оптимальна температура системи опалення з сонячними колекторами

Оптимальні умови роботи геліоустановки для підтримки опалення досягаються при температурному графіку системи – 50/30 °С. Цей графік забезпечує ефективну роботу колекторів незалежно від хмарності і висоти сонця. Обов'язковим є балансування контурів опалення для підтримання низьких розрахункових температур у зворотній лінії (рис. 2.6).

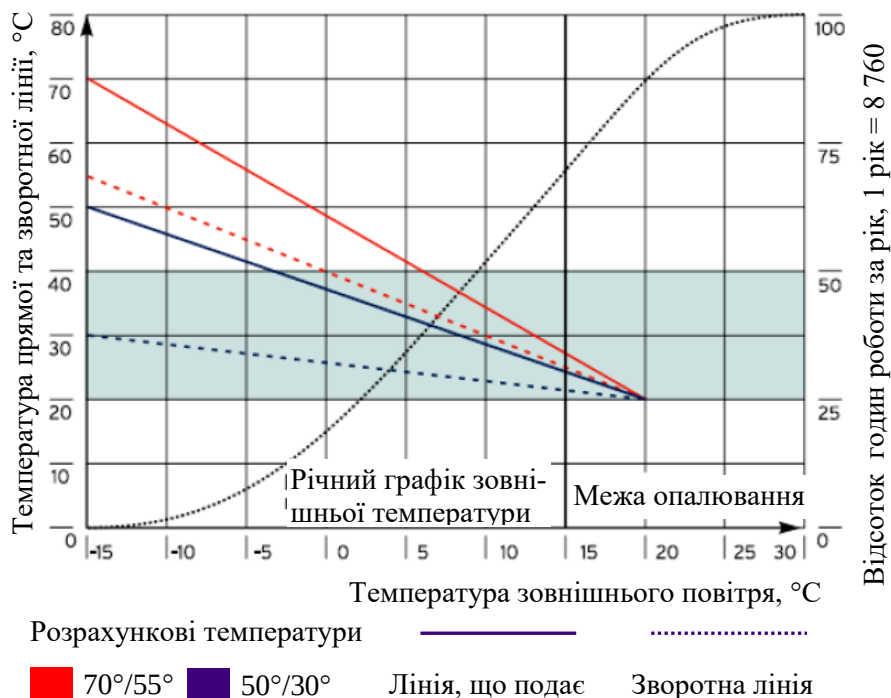


Рисунок 2.6 – Оптимальна розрахункова температура системи опалення під час використання сонячних колекторів

Річний (сезонний) ККД геліоустановки визначається залежно від двох безрозмірних показників, що характеризують співвідношення площі колекторів і об'єму бака-акумулятора до добового теплового навантаження системи ГВП. Ці показники обчислюються як:

$$A^* = \frac{10^6 \cdot A}{c \cdot G \cdot (t_{w2} - t_{w1})}, \quad (2.6)$$

$$V^* = \frac{10^6 \cdot V}{c \cdot G \cdot (t_{w2} - t_{w1})}, \quad (2.7)$$

де A – площа колекторів, м^2 ;

V – об'єм бака-акумулятора, м^3 ;

G – добова витрата гарячої води, кг ;

t_{w1}, t_{w2} – температура холодної і гарячої води, $^{\circ}\text{C}$.

c – питома теплоємність води, $4,2 \text{ кДж /кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$;

Сумарна тепла енергія, вироблена установкою за рік Q ($\text{кВт} \cdot \text{год}$) визначається за формулою:

$$Q = A \cdot \eta \cdot H_{\Sigma}, \quad (2.8)$$

де A – площа колекторів, м^2 ;

η – середній ККД колектора за розрахунковий період;

H_{Σ} – сумарна сонячна енергія, що надходить на 1 м^2 похилої поверхні колектора за рік, $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$.

Для добре теплоізованих будівель опалювальний період скорочується, в перехідний сезон найчастіше опалювання не потрібно. Тому геліоустановка для таких будинків має менше число колекторів і зазвичай покриває 5–15 % потреби в опаленні, а загальна міра покриття з урахуванням ГВП складає 15–30 %. Характер покриття енерговитрат при різній теплоізоляції будинку наведений на рисунку 2.7.

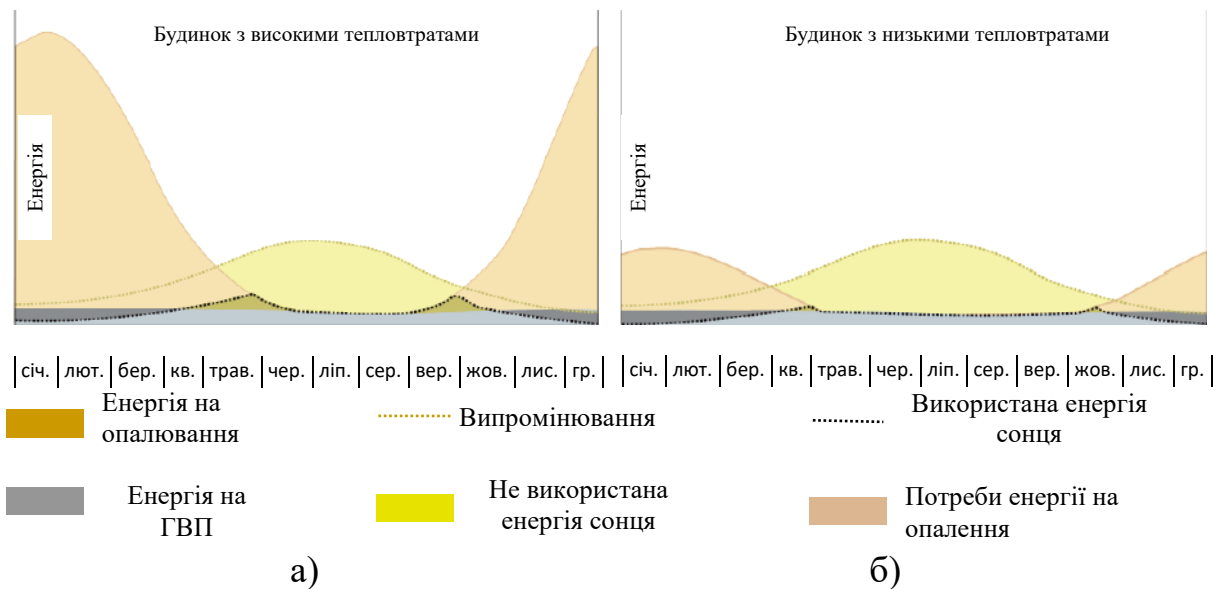


Рисунок 2.7 – Ступінь покриття енерговитрат при різній теплоізоляції дому:

а – для будинку з високими тепловтратами;

б – для будинку з низькими тепловтратами

2.2.2 Тепловий розрахунок системи сонячного теплопостачання

Визначення теплового потоку в сонячних колекторах

Корисна енергія, що відводиться з колектора, – це різниця між поглиненою сонячною енергією і тепловими втратами в навколишнє середовище. Для розрахунку більшості конструкцій плоского колектора використовується рівняння:

$$Q = F_R \cdot A \cdot [I(\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_i - T_0)], \quad (2.9)$$

де Q – корисна теплова потужність колектора, Вт;

A – площа колектора, м²;

F_R – коефіцієнт відведення тепла з колектора (враховує, що пластина гарячіша за рідину на вході);

I – щільність потоку сумарної сонячної радіації в площині колектора, Вт/м²;

τ – пропускна здатність прозорих покриттів;

α – поглинальна здатність пластини абсорбера;

U_L – повний коефіцієнт теплових втрат колектора, Вт/(м² · °С);

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

T_0 – температура навколишнього середовища, °С.

Добуток $I \cdot \tau \cdot \alpha$ – це кількість енергії, що реально поглинається абсорбером за одиницю часу. Добуток $U_L \cdot (T_i - T_0)$ – це теплові втрати від абсорбера в навколишнє середовище. Різниця між ними і є корисним тепловим потоком.

Коефіцієнт F_R враховує той факт, що температура пластини абсорбера вища за температуру теплоносія на вході в колектор. При русі теплоносія через колектор пластина нагрівається нерівномірно, тому реальні теплові втрати більші, ніж у випадку однакової температури всієї поверхні. Для ідеального колектора $F_R = 1$ однак на практиці $F_R < 1$ і залежить від конструкції колектора та витрати теплоносія.

Повний коефіцієнт втрат U_L включає:

- втрати через прозоре покриття (конвекція та випромінювання);
- втрати через теплоізоляцію дна і бокових стінок.

Для добре спроектованого колектора втрати через дно і бічні стінки разом складають 0,5–0,75 Вт/(м² · °С).

Енергетичний баланс системи сонячного теплопостачання

Енергетичний баланс системи сонячного теплопостачання за місяць можна записується у вигляді:

$$Q_c = L + Q_d \pm \Delta Q_{ак}, \quad (2.10)$$

де Q_c – теплопродуктивність сонячної установки за місяць;

L – сумарне теплове навантаження системи опалення та ГВП за місяць;

Q_d – кількість енергії від дублюючого (резервного) джерела тепла;

$\Delta Q_{ак}$ – зміна кількості енергії в акумуляторі за місяць.

Оскільки ємність акумуляторів у типових системах невелика, величиною $\Delta Q_{ак}$ зазвичай нехтують. Тоді частка місячного навантаження, що покривається сонячною енергією f , визначається як:

$$f = Q_c / L. \quad (2.11)$$

Коефіцієнт заміщення f залежить від двох безрозмірних комплексів – X (характеризує теплові втрати колектора) і Y (характеризує поглинуту сонячну енергію):

$$X = F_R' \cdot U_L \cdot A \cdot (T_{ref} - \bar{T}_e) \cdot t / L, \quad (2.12)$$

$$Y = F_R' \cdot (\tau\alpha)^- \cdot H_\Sigma \cdot A / L, \quad (2.13)$$

де A – площа сонячного колектора, м²;

F_R' – ефективний коефіцієнт відведення тепла з урахуванням теплообмінника;

U_L – повний коефіцієнт теплових втрат, Вт / (м² · °С);

t – тривалість місяця, с;

T_{ref} – базисна температура, дорівнює 100 °С (умовна, для розрахунку X);

$\bar{T}_e$ – середньомісячна температура зовнішнього повітря, °С;

L – повне теплове навантаження за місяць, Дж;

H_Σ – сумарна сонячна енергія, що надходить на 1 м² похилої поверхні колектора за розрахунковий місяць, Дж/м²;

$(\tau\alpha)^-$ – приведений коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання.

Фізичний зміст комплексів:

– Y – відношення енергії, поглиненої абсорбером за місяць, до повного теплового навантаження;

– X – відношення умовних теплових втрат колектора при базовій температурі до повного теплового навантаження.

Частка місячного навантаження f визначається за f -графіками (рис. 2.9) або за аналітичною залежністю (2.14):

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3. \quad (2.14)$$

Формула застосовна при $0 < X < 1,8$ та $0 < Y < 3$.

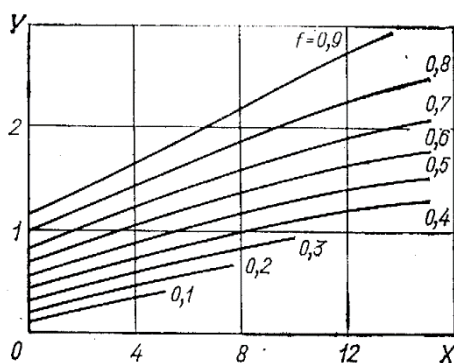


Рисунок 2.8 – f -графіки для системи з рідинним теплоносієм

Поправочний коефіцієнт на теплообмінник

У районах з можливим замерзанням рідини геліоустановки виконуються двоконтурними: контур колектора – антифриз, контур акумулятора – вода. Теплообмінник між контурами дещо знижує ефективність системи. Поправочний коефіцієнт, що враховує цей вплив, визначається за формулою:

$$F_R' / F_R = [1 + F_R \cdot U_L \cdot A / (\varepsilon \cdot \dot{C}_{min})]^{-1}, \quad (2.15)$$

де F_R – коефіцієнт відведення тепла для колектора без теплообмінника;

ε – ефективність теплообмінника;

$\dot{C}_{min}$ – менший з двох водяних еквівалентів (добуток масової витрати на теплоємність рідини) у теплообміннику.

Якщо масові витрати в обох контурах однакові, то $\dot{C}_{min}$ зазвичай відповідає контуру колектора, оскільки теплоємність антифризу менша за теплоємність води.

Оптимальний кут нахилу колектора

Оптимальний кут нахилу сонячного колектора залежить від пори року і призначення системи (рис. 2.9):

– для систем ГВП, що працюють протягом року, рекомендується кут нахилу 30–45°;

– для систем підтримки опалення кут складає 45–60°, що забезпечує кращу інсоляцію в зимовий та перехідний сезони при нижчому положенні сонця.

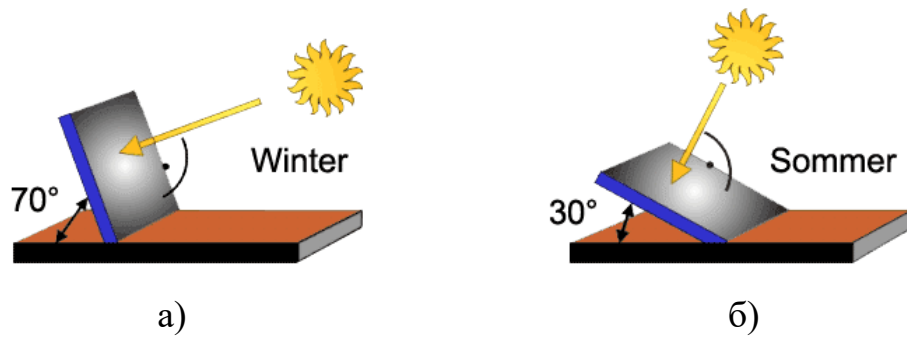


Рисунок 2.9 – Оптимальний кут нахилу:

а – взимку; б – влітку

Розсіяна складова випромінювання надходить рівномірно з усього небосхилу. Тому її частка на похилій поверхні колектора визначається за формулою (2.16)

$$I_D = I_{D\text{MAX}} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (2.16)$$

де I_D – інтенсивність розсіяної сонячної радіації на похилій поверхні колектора, Вт/м²;

$I_{D\text{MAX}}$ – інтенсивність розсіяної сонячної радіації на горизонтальній поверхні, Вт/м²;

β – кут нахилу колектора до горизонту, град.

Якщо кут нахилу колектора знаходиться в межах від $(\varphi - 15^\circ)$ до $(\varphi + 15^\circ)$, а орієнтація відрізняється від південної не більше ніж на 15° , то для колекторів з одинарним склінням – відносний оптичний коефіцієнт колектора $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n \approx 0,96$; для колекторів з подвійним склінням – $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n \approx 0,94$.

Кути положення сонця

Для точного розрахунку падаючої радіації потрібно знати положення сонця. Кут схиляння δ (кутове положення сонця відносно площини екватора в сонячний полудень) визначається за формулою Купера:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin \left[360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365} \right], \quad (2.17)$$

де n – порядковий номер дня року (відлік з 1 січня; для місячних розрахунків береться 15-й день місяця).

Годинний кут руху сонця (відхилення від сонячного полудня в градусах):

$$\omega = 15 \cdot (T_{\text{сон}} - 12), \quad (2.18)$$

де $T_{сон}$ – фактичний місцевий сонячний час.

Поправка на різницю між поясим і сонячним часом залежить від різниці між фактичною і середньою довготою часового поясу.

Міра використання системи і навантаження на колектор

Міра використання системи сонячних колекторів – це відношення кількості теплової енергії, переданої системі тепlopостачання, до загальної кількості енергії сонячного випромінювання, що впала на поверхню колекторів. Зі збільшенням міри покриття енерговитрат міра використання сонячної енергії знижується.

Орієнтовні значення для систем ГВП:

- при інсоляції $1\,000\text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ на рік корисно використовується $300\text{--}400\text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ на рік (міра використання 30–45 %);
- установки попереднього нагріву можуть забезпечити до $600\text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ на рік.

Для систем з підтримкою опалення і ГВП покриття загальних енерговитрат зазвичай складає 10–30 %. У добре теплоізованих будівлях з великими накопичувачами міра покриття може перевищувати 30 %.

Навантаження на колектор (витрата ГВП за добу на 1 м^2 колектора):

- 30–40 л/($\text{м}^2 \cdot \text{добу}$) для малих установок;
- близько 70 л/($\text{м}^2 \cdot \text{добу}$) для великих установок.

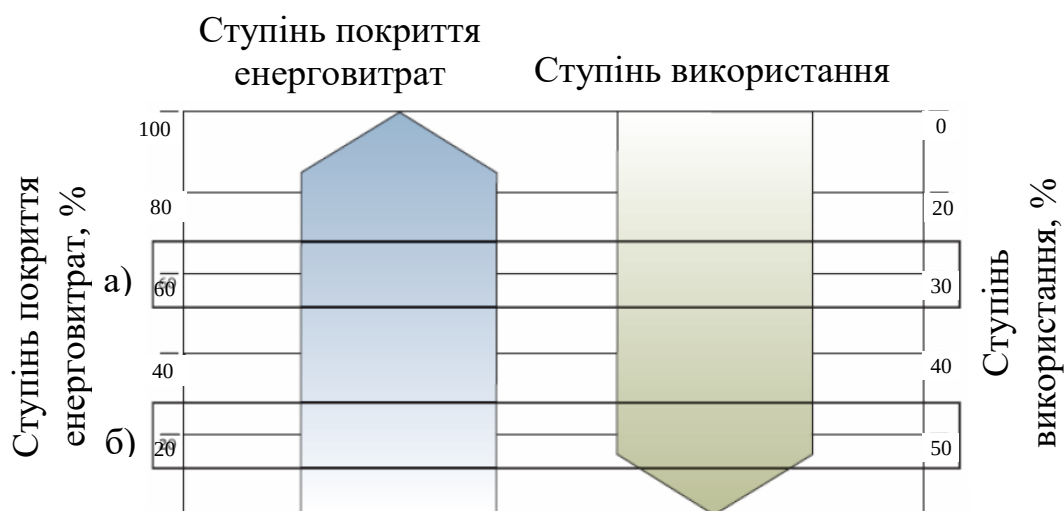


Рисунок 2.10 – Ступінь покриття та використання системи сонячних колекторів:

а – типовий будинок на одну/дві сім'ї; б – установка попереднього підігріву

2.2.3 Розрахунок системи гарячого водопостачання за рахунок геліоколекторних установок

При використанні плоских сонячних колекторів тільки для ГВП ефективно використовується 30–45 % річної енергії сонячного випромінювання. При застосуванні вакуумних трубчастих колекторів ця частка підвищується до 40–50 %.

У літній період можна повністю (100 %) покрити потребу в гарячій воді, а в середньому за рік за рахунок сонячних колекторів покривається близько 60 % річної потреби в ГВП.

Необхідна площа сонячних колекторів A для заданого об'єму ГВП розраховується за формулою:

$$A = \frac{1,16 \cdot G \cdot (t_{w2} - t_{w1})}{\eta \cdot H}, \quad (2.19)$$

де G – маса води, що нагрівається, кг;

t_{w1} – початкова температура холодної води, °C;

t_{w2} – необхідна температура гарячої води, °C;

H – сумарна сонячна енергія, що надходить на 1 м² похилої поверхні колектора за добу, Вт · год/м²;

η – ККД колектора, враховуються лише втрати самого колектора.

Коефіцієнт 1,16 враховує питому теплоємність води c та перехід від теплової енергії, вираженої в кДж, до Вт · год ($1,16 \approx 4,186/3,6$).

ККД сонячного колектора залежить від конструкції колектора, інтенсивності сонячного випромінювання, температури теплоносія та температури навколишнього середовища. Для практичних розрахунків значення ККД зазвичай приймають за паспортними даними виробника або визначають за експериментальними характеристиками колектора.

Годинна продуктивність установки (кг/м²):

$$g_i = 0,86 \cdot U \cdot \ln[(t_{max,i} - t_1)/(t_{max,i} - t_2)] \quad (2.20)$$

де U – коефіцієнт тепловтрат, Вт/(м² · °C).

За відсутності паспортних даних приймається: $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ для колекторів з одним склом, $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ – з двома стеклами.

Рівноважна температура колектора кожної години (температура, до якої нагрівся б колектор за відсутності відведення тепла):

$$t_{\max,i} = I_{\text{abs},i}/U + t_{e,i}, \quad (2.21)$$

де $I_{\text{abs},i}$ – інтенсивність поглиненої сонячної радіації, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$t_{e,i}$ – температура зовнішнього повітря, $^\circ\text{C}$.

Температура теплоносія на виході колектора визначається за формулою:

$$t_2 = t_{w2} + 5 ^\circ\text{C}, \quad (2.22)$$

де t_{w2} – необхідна температура гарячої води.

Температура на вході колектора визначається за формулою:

$$t_1 = t_{w1} + 5 ^\circ\text{C}, \quad (2.23)$$

де t_{w2} – температура холодної води.

В одноконтурних системах приймають – $t_1 = t_{w1}$, $t_2 = t_{w2}$.

Площа сонцепоглиняльної поверхні (якщо не вказана виробником) приймається в межах 0,90–0,95 від габаритної площі колектора.

Для установок з дублером (резервним джерелом тепла) площа колекторів:

$$A = 1,16 \cdot G \cdot (t_{w2} - t_{w1}) / (H \cdot \bar{\eta}) \quad (2.24)$$

де $\bar{\eta}$ – середній ККД установки ГВП, він враховує не тільки колектор, а й втрати в трубопроводах, в теплообміннику; втрати в баку-акумуляторі; зміну ККД протягом дня (зазвичай $\bar{\eta} < \eta$).

Об'єм баку-акумулятора визначається за добовими графіками підігріву і водоспоживання. За відсутності графіків:

$$V = (0,06 \div 0,08) \cdot A, \quad (2.25)$$

де 0,06 (менше значення) – для II кліматичного району,

0,08 (більше значення) – для IV кліматичного району.

Розрахунок економії умовного палива B за рахунок сонячної енергії:

$$B = 0,0342 \cdot Q / \eta_{\text{пот}}, \quad (2.26)$$

де Q – сумарна теплопродуктивність установки за рік, ГДж /рік;

$\eta_{\text{пот}}$ – ККД джерела теплоти, яке заміщається;

0,0342 – коефіцієнт переведення теплоти (ГДж) в умовне паливо (т у. п.), що відповідає теплотворній здатності 1 т умовного палива, рівній приблизно 29,3 ГДж.

На практиці зазвичай для визначення необхідної площі сонячних колекторів для потреб гарячого водопостачання використовують два основні методи: емпіричний метод та розрахунковий.

Емпіричний метод заснований на тому, що у географічних широтах центральної України для покриття потреби в гарячій воді приватного житлового будинку з розрахунку 50 % покриття, площа сонячних колекторів на 1 мешканця повинна складати:

- 1,0–1,5 м² у разі використання плоских колекторів;
- близько 0,8 м² у разі використання вакуумних трубчастих колекторів.

Незважаючи на певну умовність такого методу, він достатньо адекватний. Річ у тому, що необхідна площа сонячних колекторів для житлового будинку з 3–4 мешканцями невелика (в середньому, до 5 м²) і, зрештою, підбір все одно здійснюється з готових колекторів. Оскільки мінімальна площа колекторів – близько 2 м², все одно мова не йде про точний підбір в повній відповідності з розрахунковими даними. До того ж, продуктивність сонячного колектора – величина непостійна і залежить від великого числа сезонних, кліматичних і таких, що важко піддаються обліку чинників (наприклад, зовнішні або внутрішні забруднення). Навіть для розрахункових методів, в більшості випадків, прийнятними вважаються відхилення до 20 % від розрахункових даних.

При розрахунковому методі визначається необхідна кількість тепла на потреби ГВП по відомій формулі:

$$Q_n = m \cdot c \cdot t, \quad (2.27)$$

де Q_n – необхідна кількість теплоти на потреби ГВП, кВт · год/добу;

m – необхідна кількість гарячої води, л/добу;

c – питома теплоємність води, 4,2 кДж/(кг · °С);

t – різниця температур входу і виходу гарячої води, °С.

Для визначення необхідної площі сонячних колекторів A (м²) використовують наступну формулу:

$$A = (\eta_n \cdot Q_n) / (\eta_e \cdot K_{op} \cdot Q), \quad (2.28)$$

де η_n – коефіцієнт покриття за рік;

K_{op} – коефіцієнт поправки на орієнтацію колектора (табл. 2.1);

η_e – коефіцієнт ефективності використання за рік;

Q_n – річна потреба в тепловій енергії на ГВП, кВт·год/рік;

Q – річна кількість сонячної енергії, що надходить на 1 м² поверхні колектора, кВт · год/(м² · рік);

Найбільш вигідною з точки зору отримання максимальної кількості теплової енергії є орієнтація сонячних колекторів на південь під кутом нахилу 30° до горизонталі. За можливості саме такої орієнтації потрібно дотримуватися під час проєктування та монтажу системи. Якщо забезпечити точну орієнтацію на південь неможливо, під час розрахунків враховують поправки на відхилення колектора від оптимального напрямку. Аналогічні поправки застосовують і для врахування впливу кута нахилу колектора. У таблиці 2.1 наведено значення відповідних поправочних коефіцієнтів, отриманих компанією Immergas для сонячних колекторів власного виробництва. Ці коефіцієнти дають змогу одночасно враховувати вплив орієнтації та кута нахилу колектора, визначаючи загальний поправочний коефіцієнт для оцінювання його енергетичної ефективності.

Коефіцієнт покриття – це частка енергетичних витрат на гаряче водопостачання (ГВП), яка забезпечується за рахунок сонячних колекторів. У кліматичних умовах України доцільно орієнтуватися на річний коефіцієнт покриття не менше 50 %. У літній період така система здатна забезпечувати до 100 % добової потреби в тепловій енергії на ГВП.

Таблиця 2.1 – Величини поправок на орієнтацію колектора

Орієнтація на південь (0°); схід або захід = 90°)	Кут нахилу до горизонталі						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	0,89	0,97	1	0,99	0,93	0,83	0,69
15	0,89	0,96	1	0,98	0,93	0,83	0,69
30	0,89	0,96	0,99	0,97	0,92	0,82	0,70
45	0,89	0,94	0,97	0,95	0,90	0,81	0,70
60	0,89	0,93	0,94	0,92	0,87	0,79	0,69
75	0,89	0,91	0,91	0,88	0,83	0,76	0,66
90	0,89	0,88	0,87	0,83	0,78	0,71	0,62

Коефіцієнт ефективності використання сонячної енергії – це відношення корисно використаної теплової енергії до загальної кількості сонячної радіації, що надходить на поверхню колектора протягом року. Цей показник є емпіричним і залежить від низки факторів, зокрема:

- типу сонячного колектора (для плоских колекторів значення коефіцієнта зазвичай нижче, ніж для вакуумних);
- довжини трубопроводів (зі збільшенням довжини втрати зростають);
- товщини теплоізоляції (недостатня ізоляція призводить до збільшення теплових втрат);
- наявності, ступеня та характеру зовнішніх і внутрішніх забруднень поверхні колектора;

– кліматичних умов регіону (співвідношення прямої та розсіяної сонячної радіації протягом року).

Для плоских сонячних колекторів у кліматичних умовах України, з урахуванням прийнятого коефіцієнта покриття, значення коефіцієнта ефективності використання сонячної енергії можна прийняти на рівні 0,35.

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що використання сонячних теплових колекторів у системах житлово-комунального господарства України, насамперед для гарячого водопостачання та опалення, є перспективним напрямом розвитку енергетики. При виборі типу сонячного колектора необхідно враховувати його функціональне призначення, режим роботи системи та економічну доцільність встановлення.

Для систем, які забезпечують гаряче водопостачання переважно в літній період, економічно доцільно використовувати плоскі сонячні колектори, оскільки вони мають нижчу вартість порівняно з вакуумними. Вакуумні колектори доцільно застосовувати у системах ГВП та опалення цілорічної дії, оскільки їх конструкція забезпечує ефективну роботу навіть при температурах зовнішнього повітря нижче 0 °С.

Приклад

Житловий будинок, у якому проживає 6 осіб, обладнаний пральною машиною, що використовує гарячу воду (див. табл. 2.2). Орієнтовна витрата гарячої води становить 40 л на одну людину на добу. Різниця температур становить $\Delta t = 50 - 15 = 35$ °С.

Загальна добова витрата води: $V = 6 \cdot 40 + 1 \cdot 20 = 260$ л.

Приймаємо: $\rho \approx 1$ кг/л; $c = 4,186$ кДж/(кг · °С).

Кількість теплоти на нагрів: $Q = 260 \cdot 4,186 \cdot 35 = 38,092$ кДж/добу.

Переведення в кВт·год:

– 1 кВт · год = 3 600 кДж;

– $Q = 38\,092,6 / 3600 = 10,58$ кВт · год/добу

При перерахунку на 365 діб річна потреба енергії на ГВП складає:

$$Q_{\text{рік}} = 10,58 \times 365 = 3861,7 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Таблиця 2.2 – Споживання гарячої води

Витрати	Кількість	Щоденні витрати енергії
Малі витрати	20–30 л гарячої води (45 °С)	0,8–1,2 кВт · год/добу
Стандартні витрати	30–50 л гарячої води (45 °С)	1,2–2,0 кВт · год/добу
Великі витрати	50–70 л гарячої води (45 °С)	2,0–2,8 кВт · год/добу
Пральна, посудомийна машина тощо	На кожен прилад близько 20 л на добу або згідно з даними виробника	0,8 кВт · год/добу

Приклад розрахунку втрат тепла в циркуляційній лінії ГВП

Вихідні дані:

- довжина циркуляційної лінії складає 15 м;
- режим роботи циркуляційного насоса за таймером складає 8 год/добу;
- питомі втрати тепла в трубопроводі складають 10 Вт/м. п. (за недостатньої теплоізоляції можуть досягти до 20 Вт/м. п.).

Добові втрати тепла визначаються за формулою:

$$Q = q \cdot L \cdot t,$$

де q – питомі втрати, Вт/м;

L – довжина трубопроводу, м;

t – час роботи, год.

$$Q = 10 \times 15 \times 8 = 1\,200 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 1,2 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}.$$

Додатково потрібно враховувати втрати тепла від сушарок для рушників, підключених до системи ГВП, що може суттєво збільшувати загальні теплові втрати.

$Q_{цир} = 15 \cdot 8 \cdot 10 = 1200 \text{ Вт/м}$ (додатково треба врахувати втрати тепла від сушарок для рушників, встановлених у системі ГВП).

2.2.4 Розрахунок системи підтримання опалення за рахунок геліоколекторних установок

На рисунку 2.11 представлена принципова схема водяної низькотемпературної системи сонячного опалювання з використанням сонячних колекторів, у якій передбачений автоматичний дренаж колекторів при припиненні дії сонячної радіації.

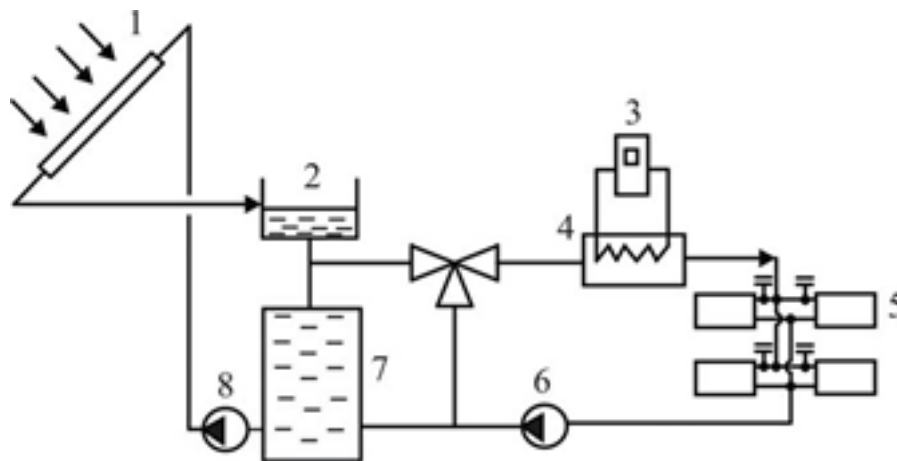


Рисунок 2.11 – Схема водяної низькотемпературної системи сонячного опалення з плоскими колекторами та їх автоматичним дренажем при припиненні циркуляції:

- 1 – сонячні плоскі колектори; 2 – розширювальний бак; 3 – додаткове джерело тепла; 4 – теплообмінник; 5 – опалювальні прилади;
6, 8 – циркуляційні насоси; 7 – бак-теплоаккумулятор

Під дією сонячної радіації колектор нагрівається до температури 70–80 °С, що перевищує температуру навколишнього середовища та призводить до зростання конвективних втрат тепла в довкілля, а також власного теплового випромінювання поверхні в атмосферу.

Для підвищення температури теплоносія поверхню абсорбера покривають спектрально-селективними покриттями, які ефективно поглинають короткохвильове сонячне випромінювання та зменшують власне довгохвильове теплове випромінювання. Такі покриття на основі «чорного нікелю», «чорного хрому», оксидів міді на алюмінії або міді є доволі дорогими, а їхня вартість зазвичай співставна з вартістю самого колектора.

Досвід експлуатації сонячних установок на основі колекторів виявив низку суттєвих недоліків таких систем. Насамперед це висока вартість обладнання. Підвищення ефективності за рахунок селективних покриттів, збільшення прозорості скління, вакуумування або застосування систем охолодження часто є економічно недоцільним.

Суттєвим недоліком є необхідність регулярного очищення скляних поверхонь від пилу, що значно обмежує застосування колекторів у промислових районах. При тривалій експлуатації, особливо в зимових умовах, спостерігаються пошкодження скління через нерівномірне теплове розширення освітлених і затінених ділянок.

Також відзначається значна частка пошкоджень колекторів під час транспортування та монтажу. Ще одним суттєвим недоліком є нерівномірність вироблення теплової енергії протягом доби та року.

Досвід експлуатації в умовах Європи при високій частці дифузної радіації (до 50 %) показав складність створення повністю автономних цілорічних систем гарячого водопостачання та опалення.

Усі геліосистеми з сонячними колекторами в середніх широтах потребують встановлення акумулювальних баків значного об'єму та підключення додаткових джерел тепла, що знижує загальну економічну ефективність системи.

Підтримка опалювання від геліоустановки

При проектуванні систем підтримки опалення приватних будинків зазвичай орієнтуються на покриття 10–30 % річної потреби в тепловій енергії за рахунок сонячних колекторів. Рівень використання геліосистеми становить

близько 20–25 %, що обумовлено співвідношенням витрат та економічної доцільності.

Орієнтовні параметри геліоустановок для підтримки опалення приватного будинку:

- 0,8–1,1 м² нетто площі плоских колекторів на кожні 10 м² житлової площі;
- 0,5–0,8 м² нетто площі вакуумних трубчастих колекторів на кожні 10 м² житлової площі;
- 50–70 л об'єму акумулювального бака на 1 м² площі сонячного колектора.

Схема нагріву басейну від геліоустановки подана на рисунку 2.12.

Найбільш доцільним є використання геліоколекторних систем для нагріву басейнів у регіонах із високою середньорічною інтенсивністю сонячної радіації (не нижче 300 Вт/м²). Для відкритих басейнів площа абсорбера становить приблизно 0,5–0,7 площі дзеркала води. Для басейнів з укриттям цей показник зростає до 0,7–1,0 площі басейну, при цьому можливе забезпечення покриття теплових потреб до 100 % у літній період та до 65 % річного покриття.

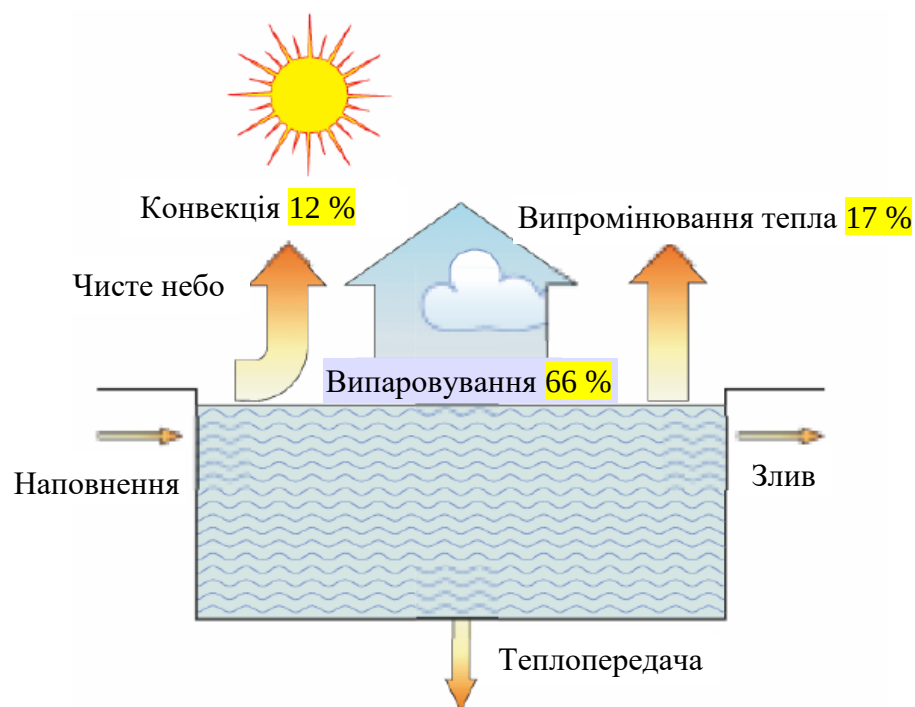


Рисунок 2.12 – Схема нагріву басейна від геліоустановки

Таблиця 2.3 – Чинники, що враховуються при проектуванні системи сонячних колекторів для плавальних басейнів

Група факторів	Зміст / вплив на проектування
Режим використання теплової енергії	<ul style="list-style-type: none"> – лише підігрів води в плавальному басейні; – комбінована система (підігрів води басейну та ГВП); – комбінована схема з додатковою підтримкою системи опалення
Місце розташування	Розміщення колекторного поля з урахуванням захисту від атмосферних впливів і вітрових навантажень (зокрема дахові конструкції або спеціально підготовлені майданчики)
Тип плавального басейну	Відкритий або закритий басейн, що визначає теплові втрати та потребу в енергії
Геометричні параметри басейну	Площа водної поверхні, глибина та загальний об'єм води
Режим експлуатації (звички користувачів)	Інтенсивність відвідування, тривалість роботи басейну, частота оновлення води, режим накриття/відкриття, задана температура води та допустимі температурні межі
Характеристики системи сонячних колекторів	Тип і конструкція колекторів, їх орієнтація та кут нахилу, розрахункова теплова потужність, параметри теплообмінного обладнання та гідравлічної схеми

З СОНЯЧНІ ТЕПЛОВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1 Принцип роботи сонячних теплових електростанцій.

Класифікація сонячних теплових електростанцій

Сонячна енергія може бути перетворена в електричну двома основними шляхами: термодинамічним і фотоелектричним.

При термодинамічному методі електричну енергію за рахунок використання сонячної енергії можна отримати використанням традиційних схем у теплових установках, в яких теплота від згоряння палива замінюється потоком концентрованого сонячного випромінювання. Принципова схема отримання електричної енергії в сонячній теплоелектростанції наведена на рисунку 3.1.

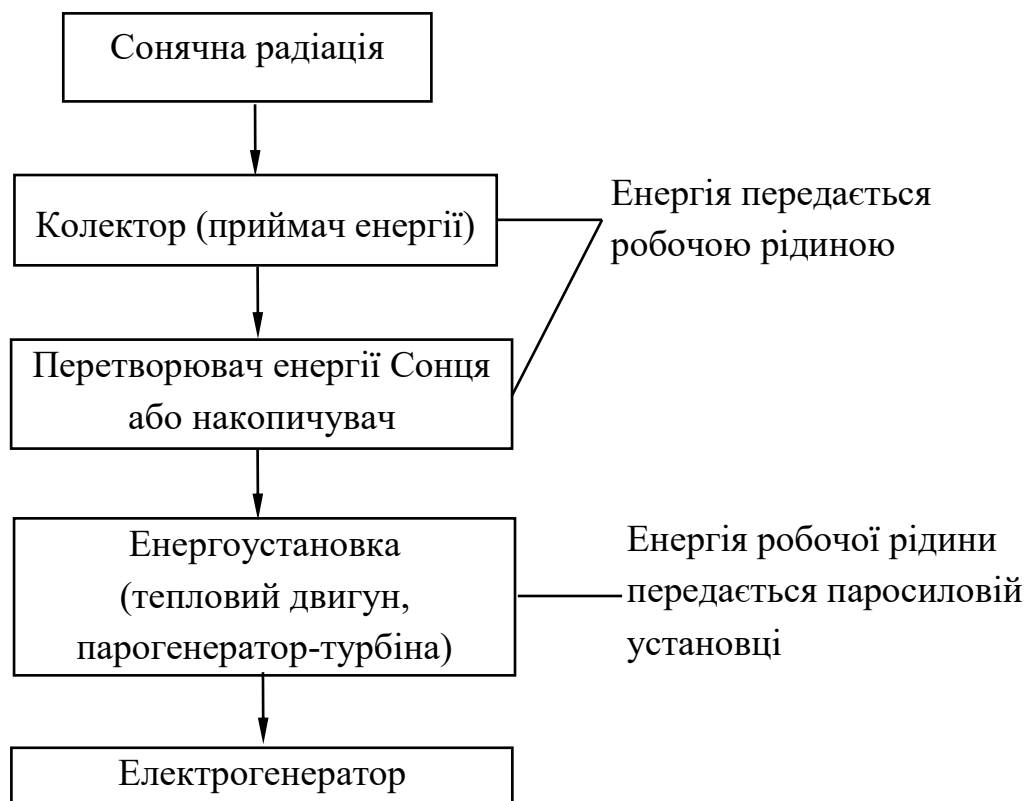


Рисунок 3.1 – Принципова блок-схема сонячної теплоелектростанції

В основу роботи сонячних теплових електростанцій (далі – СЕС) покладено принцип концентрації енергії сонячних променів на наповненому

теплоносієм теплоприймачі, і перетворення її в теплову енергію. Температура теплоносія може становити від 200 °С до 1 000 °С та залежить від конструктивних особливостей СЕС. Теплова енергія, як і в звичайних ТЕС, перетворюється в електричну за допомогою газової або парової турбіни.

Розглянемо з фізичної точки зору сутність процесів перетворення, що відбуваються на термодинамічних СЕС.

Процес отримання електроенергії з сонячної енергії відбувається в два етапи. Перший етап – це фототермічне перетворення. Відбувається поглинання сонячного випромінювання в колекторі, а згодом нагрів теплоносія або робочого тіла. Він протікає безпосередньо в колекторі або в теплообміннику, передбаченому конструкцією СЕС. Як теплоносієм використовується водяна пара або пари органічних речовин (наприклад, фреон). Потім пара подається на парогенератор-турбіну (тепловий двигун), який приводиться в рух розігрітим робочим тілом. Подальший процес отримання електроенергії схожий з іншими тепловими електростанціями (далі – ТЕЦ). На практиці використовують дві принципово різні схеми теплових СЕС.

Перша схема передбачає використання двоконтурного компонування. У першому контурі відбувається нагрів теплоносія в теплообміннику (колекторі), який потрапляє в акумулювальну систему. Теплоносієм першого контуру в акумулювальному середовищі («буфер» в системі теплоприймач / нагрівач робочого тіла) виконує роль джерела тепла для другого (робочого) контуру, робоче тіло якого обертає турбіни теплового двигуна.

Друга схема теплової СЕС – одноконтурна. Контур теплоносія виконує функції робочого контуру. У сонячному теплоприймачі відбувається нагрів робочого тіла. Теплоносієм частково потрапляє безпосередньо на вхід теплового двигуна, частково – в акумулятор (якщо передбачено конструкцією).

Всі існуючі термодинамічні СЕС для досягнення високих температур теплоносіїв використовують концентратори, які відображають сонячні випромінювання з великою дзеркальної поверхні на меншу поверхню колектора (приймача).

Основні елементи теплових СЕС (рис. 3.2):

- концентратор;
- колектор;
- тепловий акумулятор (ТА);
- система передачі енергії;
- система стеження за сонцем (трекер).

За уловлювання та відображення сонячних променів відповідає сонячний концентратор, а за перетворення енергії сонця в теплову – колектор (приймач). У якості концентраторів на практиці раніше використовували різні оптичні елементи – дзеркала, світловоди, лінзи. В процесі експлуатації з'ясували, що при високому рівні потужності випромінювання, що концентрується, доцільно в ролі концентратора застосовувати тільки дзеркальні відбивачі. Основний параметр концентраторів сонячного випромінювання – коефіцієнт концентрації. Він відображає відношення середньої щільності сконцентрованого випромінювання до щільності променевого потоку, який потрапляє на поверхню, що відбиває (за умови точного орієнтування на Сонце).

Акумулятори теплоти і система автоматичного спостереження за Сонцем – елементи теплової СЕС, що збільшують ефективність роботи всієї системи.

Концентратори так влаштовані, що можуть фокусувати виключно пряме сонячне випромінювання. Істотно знижує ефективність хмарна і туманна погода. Кращі показники ККД мають СЕС в місцевості з високим рівнем інсоляції. Прикладом такого регіону служать екваторіальні або пустельні райони. Щоб краще використовувати сонячне випромінювання, необхідно забезпечити орієнтацію сонячних концентраторів в напрямку Сонця. Для реалізації цього технологічного завдання на практиці концентратори оснащують спеціальними системами стеження – трекерами. Вони повертають відбивач концентратора згідно закладеному в контролері алгоритму. Системи стеження поділяють на одновісні і двовісні. Двовісні мають два приводи, один з них розгортає концентратор в горизонтальній площині, а другий – у вертикальній. Одноосьова система повертає концентратор тільки із заходу на схід.

Головний недолік, який притаманний усім сонячним установкам і СЕС – періодичність роботи, пов'язана з відсутністю сонячного випромінювання (через погоду, певний час дня, пору року). Конструктивно вирішити цю проблему допомагає установка додаткових концентраторів. Отримана рано вранці, або в години низького споживання електроенергії, енергія може накопичуватися в спеціальних акумуляторах. Запасена в ТА енергія використовується для отримання електроенергії при пікових навантаженнях і в години, коли припиняється надходження тепла від концентраторів. Можливість накопичувати та зберігати теплову енергію вночі або в сутінки – перевага теплової СЕС над електростанціями, на яких застосований фотоелектричний метод перетворення енергії.

Як показує досвід, доукомплектування теплових СЕС тепловими акумуляторами, заснованими на використанні розплавленої солі (речовина, що акумулює тепло), значно підвищує коефіцієнт встановленої потужності електростанції, тобто кількість електроенергії, яку виробила тепла СЕС за один рік. Наявність ТА також збільшує маневреність і надійність СЕС, поліпшує економічні показники.

Для поступового впровадження теплових СЕС, а також для усунення їх недоліку (залежність вироблення електроенергії від Сонця) впроваджують гібридизацію електростанції. Гібридизація електростанції – це використання для виробництва електрики на одній електростанції декількох джерел енергії (наприклад, енергії Сонця і вітру, Сонця і Землі і т. П.). Так, наприклад, в США теплові СЕС інтегрують до складу інфраструктури існуючих ТЕЦ. Для виробництва електроенергії використовується одна турбіна-генератор. Нерівномірність вихідної потужності теплової СЕС компенсується спалюванням газу.

Завдяки тепловим СЕС друге життя отримали двигуни Стірлінга, розроблені ще в 1816 році. На модульних СЕС його застосовують як приймач електроенергії в фокусі дзеркал (замість ємності з робочим тілом).

Існує два різних принципи концентрації сонячного випромінювання на теплових СЕС:

- застосування великої кількості геліостатів-концентраторів, які відображають сонячне випромінювання на центральну вежу з приймачем (баштовий тип СЕС – рис. 3.2);
- застосування значної кількості розосереджених на великій території концентраторів, на кожному з яких розташований свій колектор, так званий модульний тип СЕС.

СЕС баштового типу – це ціле «поле» концентраторів і один приймач сонячної енергії, який розташований нагорі вежі. Висота вежі може досягати 150 метрів. На її верхній позначці встановлений резервуар, виготовлений з жароміцного металу, з теплоносієм. Нагрітий теплоносій через систему насосів (і можливо через ТА) потрапляє на турбіни. Тобто станції баштового типу, як вже було сказано, складаються з п'яти основних елементів: оптичної системи, автоматичної системи управління дзеркалами і станцією в цілому, парогенератора, башти і системи перетворення енергії, яка включає теплообмінники, акумулятори енергії і турбогенератори. Принципова схема сонячної електростанції баштового типу показана на рисунку 3.2,б.

У основу роботи баштової СЕС покладений принцип концентрації сонячної енергії, що падає на дзеркала, зібраної з великих площ за допомогою плоских дзеркальних геліостатів. Таким чином, СЕС з центральним приймачем сонячного випромінювання є вежею з геліоприймачем і розташованими на площині геліостатами. Висококонцентроване сонячне випромінювання отримують за допомогою параболічних поверхонь. До них відносяться дзеркальні поверхні, що функціонують на основі парабол обертання (параболосферичні) або на основі парабол руху (параболоциліндричні). Звичайно у такій електростанції використовується пряме сонячне випромінювання і геліостати мають систему слідування за Сонцем, при цьому кожний з геліостатів орієнтується в просторі індивідуально.

Температура, яку можна отримати на вершині башти з допомогою дзеркальних концентраторів, складає від 300 °С до 1 500 °С. В одному модулі можна отримати потужність, яка не перевищує 200 МВт, що пов'язано зі зниженням ефективності перенесення енергії від найбільш віддалених концентраторів на вершину башти.

Практика експлуатації СЕС типу башти показала їх технічну доцільність і працездатність. Проте реальна ціна СЕС цього типу через їхню високу матеріаломісткість (металоконструкції, бетон, дзеркала) виявилася високою. Діючі СЕС типу вежі є експериментальними полігонами з упровадження сонячних технологій. Основним недоліком таких установок є значна площа, яку вони займають. Зокрема, для розміщення баштової електростанції потужністю 100 МВт необхідна площа 200 га. Сонячні енергетичні установки (далі – СЕУ) башт – це установки промислової енергетики з високою вихідною потужністю. Баштові СЕС добре себе зарекомендували виключно в ролі великих, з'єднаних з електромережею електростанції потужністю 30–200 МВт.

СЕС модульного типу складається з окремих модулів, об'єднаних в одну систему електростанції. Кожен модуль містить параболічний (або циліндричний) концентратор і теплоприймач, який розташовують у фокусі концентратора. Зовні модуль нагадує супутникову антену. Системи тарілчастого виду завдяки модульній конструкції застосовуються і як автономні установки, і як група модулів загальною потужністю до декількох десятків мегават.

Також СЕС модульного типу поділяють на СЕС з роздільними модульними параболічними концентраторами (рис. 3.3) та СЕС з параболічними концентраторами та з тепловими приймачами у фокусі параболоїда (рис. 3.4).

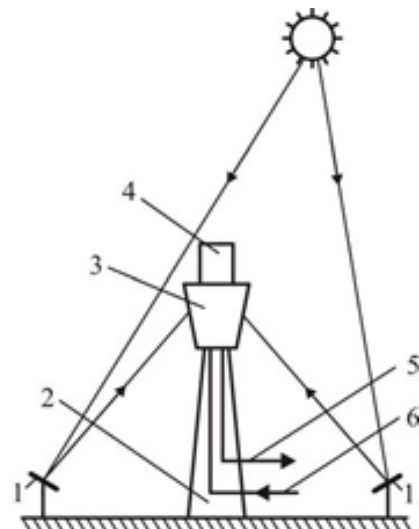
Теплові сонячні електростанції завдяки гібридизації, впровадженню нових матеріалів, удосконаленню технологій та можливості акумулювати тепло стають стійким і надійним джерелом електроенергії.

Для розміщення теплових ТЕС найкраще підходять екваторіальні посушливі і пустельні території. Україна хоч і не може похвалитися подібними зонами, зате в нашій країні діє зелений тариф на електроенергію, який стимулює як внутрішніх, так і зовнішніх інвесторів вкладати гроші в розвиток цієї галузі. Перспективною для будівництва теплових СЕС є Херсонська область, оскільки володіє одним з кращих показників річної інсоляції в країні.

Структурні схеми вежі СЕС і СЕС з високою концентрацією сонячної енергії включають усі типові елементи термодинамічного циклу перетворення енергії, і усі правила технічної експлуатації теплової частини енергоустановки не відрізняються від правил експлуатації теплових електростанцій. Особливу увагу потрібно приділити питанням експлуатації дзеркального геліополя, трекерів системи геліостатів, сонячних веж. Надалі і будуть розглянуті ці питання.



а)



б)

- 1 – геліостати;
- 2 – башта;
- 3 – сонячний котел;
- 4 – теплоаккумулятор;
- 5 – трубопровід «гострої» пари;
- 6 – трубопровід живильної води

Рисунок 3.2 – Термодинамічні СЕС баштового типу:
а – зовнішній вигляд; б – схема термодинамічної СЕС баштового типу



Рисунок 3.3 – СЕС із роздільними модульними параболічними концентраторами



Рисунок 3.4 – Дзеркальні параболічні СЕС з двигуном Стірлінга

3.2 Особливості експлуатації, монтажу та техніки безпеки

Для ефективної експлуатації сонячних енергоустановок з дзеркальними концентраторами найбільш важливим залишається питання високої відбиваючої здатності. В умовах експлуатації цього домагаються декількома методами:

- використовують для дзеркальної поверхні матеріали з високою мірою відображення в широкому спектральному діапазоні;
- забезпечують якісний захист дзеркального шару, тобто захисний шар виконують у вигляді пило- та грязевідштовхувального, що дозволяє максимально знизити витрати на експлуатацію;

– застосовують методи механізованого і автоматизованого очищення дзеркальної поверхні неущкоджувальними технологіями, тобто застосовують відмивання струменем води високого тиску без використання щіток (рис. 3.5).

Значне підвищення енерговіддачі чистої дзеркальної поверхні (до 25 %) робить доцільним проведення регламенту або введення профілактики очищення по стану.

Експлуатація приводів систем геліостатів

Особливу експлуатаційну групу СЕС складають трекери систем геліостатів. Трекери виконуються зазвичай на основі мотор-редукторів і вимагають проведення профілактичних робіт, відповідно до правил робіт цих механізмів.



Рисунок 3.5 – Механізоване очищення дзеркал струменем води високого тиску

Техніка безпеки

Вказівки по техніці безпеки відносяться, передусім, до роботи із застосуванням редукторів. При використанні мотор-редукторів необхідно також дотримуватися вказівок по техніці безпеки, аналогічних при роботі з двигунами (інструкції з експлуатації двигунів).

У час і після роботи мотор-редуктори, редуктори і двигуни мають деталі під напругою, деталі, що рухаються, гарячу поверхню. Тому транспортування,

підготовку до зберігання, установку та монтаж, підключення, введення в експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт повинні виконувати тільки кваліфіковані фахівці.

При цьому необхідно дотримуватися інструкції по експлуатації (електричної схеми), застережливих табличок на редукторі / мотор-редукторі, правил і вимог щодо виконання робіт з цією установкою, приписів по техніці безпеки і профілактиці виробничого травматизму.

Важкі травми персоналу і значний матеріальний збиток можливі через неправильне застосування приписів, неправильний монтаж або управління; зняття необхідних захисних кришок або корпусу.

Використання за призначенням

Редуктори / мотор-редуктори призначені для роботи в промислових установках, зокрема в приводах систем геліостатів, і відповідають діючим стандартам і нормативам. Технічні дані і інформація за допустимими умовами експлуатації вказані на заводській табличці і в документації.

Механічний монтаж

Для механічного монтажу потрібні інструменти і допоміжні засоби:

- набір гайкових ключів;
- динамометричний ключ для затягування: стяжних муфт; сполучних пристроїв; кришки вхідного валу з центрувальним буртом;
- монтажне пристосування;
- елементи вирівнювання (шайби, кільця розпорів);
- кріпильні деталі для передавальних елементів;
- мастило;
- засіб від самовідгвинчування, тобто для кріплення кришки вхідного валу з центрувальним буртом.

Введення в експлуатацію редукторів трекерів

Для досягнення максимального ККД редукторів трекерів потрібно їх обкатка тривалістю не менше 24 годин. Оскільки передбачається робота

редуктора в обох напрямках, то для кожного напрямку обертання потрібний свій період обкатки. В період обкатки редуктора момент на його вихідному валу не повинен перевищувати величину, що відповідає параметрам штатного навантаження. Обкатка редуктора трекера виконується на стендах з нормуванням навантажень і часу прироблення.

Технічний огляд і обслуговування

У технічний огляд і обслуговування входить періодичний огляд, регулювання і заміна олії (рис. 3.6–3.9).

Передбачені:

- візуальний контроль герметичності ущільнень;
- перевірка якості і рівня олії;
- перевірка, заміна гумових амортизаторів;
- заміна мастила в підшипниках кочення;
- заміна манжет зі зміщенням робочої кромки;
- відновлення або оновлення антикорозійного лакофарбового покриття поверхні.

Перевірка рівня олії полягає в такому:

- варто почекати, поки редуктор не охолоне (небезпека опіку);
- для редукторів з різьбовою пробкою контрольного отвору вивернути пробку контрольного отвору;
- перевірити рівень олії, при необхідності відкоригувати його;
- закрутити пробку.

Перевірка якості олії полягає в наступному:

- вимкнути і знеструмити мотор-редуктор;
- заблокувати його від неумисного включення;
- взяти пробу олії через зливний отвір;
- перевірити в'язкість олії.

Якщо при візуальному контролі виявлено сильне забруднення, рекомендується замінити олію, не чекаючи терміну придатності, вказаного в паспорті.

Заміна олії полягає в такому:

- прогріти редуктор до робочої температури;
- вимкнути і знеструмити мотор-редуктор;
- заблокувати мотор-редуктор від неумисного включення;
- редуктор повинен залишатися теплим, оскільки недостатня плинність занадто холодної олії ускладнює його повний злив;
- підставити під зливний отвір ємність;
- вивернути пробку контрольного отвору, повітряний клапан (чи пробку отвору для видалення повітря), пробку зливного отвору;
- повністю злити олію;
- закрутити пробку;
- через отвір для видалення повітря залити нову олію тієї ж марки, при чому кількість олії, що заливається, повинна відповідати монтажній позиції або даним заводської таблички;
- перевірити рівень олії через контрольний отвір;
- відкрити повітряний клапан або пробку отвору для видалення повітря.



Рисунок 3.6 – Одноосьові екліптичні геліостати



Рисунок 3.7 – Двовісний трекер геліостата



Рисунок 3.8 – Редуктор азимутального приводу трекера геліостата



Рисунок 3.9 – Обслуговування редуктора трекера

Експлуатація башт сонячних енергоустановок

Башта – висотна інженерна споруда (ствол і фундамент), що вільно стоїть. Від перекидання при горизонтальному навантаженні у вигляді вітру вежа утримується тільки завдяки власному фундаменту і конструкції.

Специфікою проведення робіт на вежах сонячних електростанцій є роботи верхолазів, що виконується на висоті більше 5 м від поверхні землі, від перекриття або робочого настилу, над яким робляться роботи при монтажі або ремонті устаткування. При цьому основним засобом, що оберігає працівника від падіння, є запобіжний пояс.

Для проведення таких робіт оформляється наряд-допуск – завдання на виконання робіт, оформлене на спеціальному бланку встановленої форми, яке визначає зміст, місце роботи, час її початку і закінчення, умови безпечного проведення, склад бригади і працівників, відповідальних за безпечне виконання робіт.

Відмінною особливістю проведення робіт на вежах сонячних електростанцій є планово-профілактичні роботи: технічне обслуговування, що виконується через певні тимчасові інтервали або відповідно до заздалегідь встановлених критеріїв. Мета цих робіт – своєчасне попередження відмови або погіршення якості функціонування устаткування відключенням від функціонування.

Перед виконанням робіт на вежах проводиться цільовий інструктаж, даються вказівки по безпечному виконанню конкретних видів робіт. Інструктаж повинні пройти працівники, прізвища яких внесені в наряд-допуск, особа, що видала наряд-допуск, а також члени бригади (чи виконавці).

Організація технічного контролю в період будівництва і при прийманні до експлуатації

Структурний підрозділ, якому передається в експлуатаційно-технічне обслуговування вежа, повинен здійснювати технічний контроль якості робіт щодо спорудження опор, що виконуються будівельно-монтажною організацією,

брати участь в прийманні прихованих робіт і проміжних етапів робіт.

Завданнями технічного контролю на всіх стадіях будівництва є:

- контроль точного дотримання усіх вимог проєкту, СНіП, зміни в проєкт можуть вноситися тільки за умови узгодження їх з автором проєкту вежі і генеральним проєктувальником;

- контроль своєчасного і повного оформлення виконавчої технічної документації, при здійсненні технічного контролю не допускаються відступи від проєктних рішень без узгодження з проєктною організацією.

Експлуатаційний персонал має бути визначений до введення об'єкту в дію. Участь експлуатаційного персоналу в остаточному прийманні конструкцій від будівельно-монтажної організації обов'язково.

Оформлення наряду-допуску

Роботи по обслуговуванню і ремонту веж повинні проводитися відповідно до інструкції. Особливо небезпечні і складні роботи, що проводяться на висоті і у важкодоступних місцях, повинні виконуватися з дотриманням спеціального порядку, в якому мають бути передбачені організаційні і технічні заходи щодо підготовки і безпечного виконання цих робіт. Роботи проводяться під безпосереднім керівництвом і спостереженням відповідальної особи. За необхідності роботи можуть бути виконані із залученням спеціалізованої організації.

Усі роботи з обслуговування, пов'язані з підйомом на вежу, виконуються тільки по наряд-допуску, де вказується місце проведення робіт, об'єм робіт, час початку і закінчення робіт, склад бригади та особи, відповідальні за виконання робіт.

Особа, що видає наряд-допуск для роботи на вежі, має бути призначена наказом керівника сонячній електростанції. Наряд-допуск оформляється в двох екземплярах. Виправлення і перекреслювання написаного тексту не допускається. Один екземпляр наряду-допуску залишається у виробника робіт, а другий – у працівника, що допускає, з-поміж оперативного персоналу.

Роботи на вежі і її елементах, особливо геліокотлі, що виконуються по наряду-допуску, починаються після проведення особою, що видала наряд-допуск, цільового інструктажу виробникові робіт і членам бригади. У інструктажі даються вказівки з безпечного виконання роботи, використання вантажопідйомних машин і механізмів, інструментів і пристосувань. Без проведення цільового інструктажу допуск до роботи заборонений.

Виробник робіт не має права отримувати наряд-допуск і починати роботу бригади (групи), якщо характер і умови робіт, заходи безпеки не відповідають діючим правилам і інструкціям по безпеці праці або не відбиті в наряді-допуску в необхідному об'ємі.

Технічне обслуговування в період експлуатації

Технічну експлуатацію веж організовують відповідні підрозділи СЕС.

Планово-профілактичним (періодичним) технічним обслуговуванням веж займаються експлуатаційні підрозділи або підрядні організації, відповідно до галузевої «Інструкції і Положення про допуск на висотні об'єкти».

Основним завданням працівників, пов'язаних з обслуговуванням веж, є експлуатація, безаварійність і довговічність.

Склад робіт з технічного обслуговування веж СЕС

До складу робіт з технічного обслуговування веж СЕС входить:

- огляд технічного стану конструкцій;
- контроль технічного стану конструкцій;
- усунення виявлених несправностей;
- регулювання геліокотлів і елементів подання теплоносія.

Технічне обслуговування підрозділяється на:

- поточне (повсякденне);
- планово-профілактичне (періодичне).

Планово-профілактичне технічне обслуговування включає:

- ревізію (детальний огляд);
- планований поточний ремонт.

Позапланові ремонти з усунення наслідків аварій і ушкоджень системою планово-запобіжного ремонту не передбачаються.

Поточне технічне обслуговування

Поточне технічне обслуговування на обслуговуваних об'єктах СЕС проводиться персоналом об'єкта і виконується щотижня. На об'єктах, що не обслуговується, – відповідальною особою при відвідуванні об'єкту, але не рідше за один раз в шість місяців.

При поточних технічних оглядах контролюється стан частин СЕС, видимих із землі неозброєним оком або за допомогою бінокля, огляд яких не вимагає підйому на висоту, розкриття ґрунту, а також великих витрат часу.

При огляді веж звертають увагу на стан конструкцій веж, місця примикання до конструкцій технологічного устаткування, анкерних закріплень, конструкції кріплення вежі до фундаменту та наземній частині фундаментів.

Результати поточного технічного огляду і відомості про усунення несправностей записують в журнал технічних оглядів і ремонту. Журнал повинні переглядати і візувати не рідше одного разу в шість місяців особами, що безпосередньо займаються технічним обслуговуванням, не рідше одного разу на рік керівником підрозділу, що здійснює технічне обслуговування, не рідше одного разу в три роки відповідальною особою.

При виявленні дефектів, що перешкоджають безаварійній експлуатації, особа, що їх виявила, зобов'язана негайно повідомити про це керівника підрозділу, що здійснює технічне обслуговування, і відповідальну особу, для вжиття термінових заходів.

Планово-профілактичне технічне обслуговування

При планово-профілактичному технічному обслуговуванні проводиться ревізія (детальний огляд) та поточний ремонт. Планово-профілактичне обслуговування виконується згідно з річним планом-графіком технічних оглядів, ревізій і поточного ремонту. Перевірка вертикальності веж за допомогою теодоліта проводиться один раз в рік, а також після ураганів і

обмерзання великої інтенсивності. Результати вимірів оформляються у вигляді протоколів.

Денне маркування і світлозахисне обгороджування

Денне маркування і світлозахисне обгороджування веж призначені для своєчасного інформування пілотів літальних апаратів про наявну перешкоду для виключення можливого зіткнення. Калібрування конструкції, склад системи світлозахисного обгороджування визначаються проектом.

Денне маркування повинно виразно виділятися на тлі місцевості, бути видне з боку усіх напрямів і мати два маркувальних кольори, що різко відрізняються один від одного – червоний (помаранчевий) і білий.

Для світлового обгороджування мають бути використані загороджувальні вогні. Вежі повинні мати світлове обгороджування на самій верхній частині (точці) і нижче через кожні 45 м. Відстані між проміжними ярусами мають бути однаковими. Кількість і розташування загороджувальних вогнів на кожному ярусі має бути таким, щоб з будь-якого напрямку (під будь-яким кутом азимута) було видне не менше двох загороджувальних вогнів (рис. 3.10).

Загороджувальні вогні мають бути постійного випромінювання червоного кольору з силою світла в усіх необхідних напрямках не менше 10 Кандел. Максимальна сила світла має бути спрямована під кутом 4–15 градусів над горизонтом. Вежі СЕС захищаються вогнями білого кольору, працюючими в проблісковому режимі. Сила світла в пробліску має бути не менше 10 кандел, а частота проблісків – не менше 60 в хвилину. У разі установки декількох пробліскових вогнів має бути забезпечена одночасність.



Рисунок 3.10 – Вогні захисту башти термодинамічної СЕС

Світлозахисне обгороджування необхідно включати для роботи на період темного часу доби (від заходу до сходу сонця), а також на період світлого часу доби з поганою або погіршеною видимістю (туман, дощ, снігопад, серпанок та ін.).

Деякі зауваження до теми цього розділу

1. Перші паротурбінні СЕС були побудовані ще у 70-ті роки ХХ століття в Криму і Сполученими Штатами Америки в Каліфорнії. Для паротурбінних СЕС характерні високі капітальні витрати, переважно через високу вартість автоматизованих дзеркал-геліостатів. Вартість одного кіловата встановленої потужності баштових СЕС «Солар-1», як і для СЕС в Криму, більш ніж в 10 разів перевищувала характерну вартість для традиційних установок.

Більш економічним виявилось інше технічне рішення, реалізоване в США в 1985 році. Замість дорогих скляних дзеркал-геліостатів було використано плівку з металевим напиленням, яку натягнуто на обручі. Під плівкою створено вакуум і надано їй параболічної форми. Увігнуті дзеркала фокусують сонячне випромінювання на труби, в яких нагрівається і випаровується поживна вода паротурбінної установки. Для цієї СЕС вежа з баком-парогенератором не потрібна і вартість одного кіловата встановленої потужності знижена у

порівнянні з «Солар-1» в 4 рази, а собівартість кіловат-години виробленої енергії наблизилася до характерної для вугільних станцій.

2. На СЕС «Альмерія» (Іспанія) як теплоносії першого контуру парогенератора на вершині сонячної вежі використовується рідкий натрій, в другому контурі – звичайна вода. Для варіанта СЕС, розроблений в Німеччині, сонячні промені нагрівають до 800 °С стисле повітря, яке приводить в дію газову турбіну. Теплота відпрацьованого в газотурбінній установці повітря потім використовується в паротурбінному циклі. В результаті підвищується ККД використання теплоти сонячних променів.

3. Ряд паротурбінних СЕС різної потужності побудовані у Франції та в Італії. Розробляються проекти СЕС із замкнутими газотурбінними установками, в яких робочим тілом є гелій. Параметри гелієвого теплоносія перед турбіною: температура близько 600 °С, тиск 0,8 МПа; проектний ККД установок – близько 25 %.

4. Таким чином, сонячні теплові електростанції сьогодні – це вже не експериментальна, а звична працююча технологія. У світі вже функціонує близько 100 таких станцій і в процесі будівництва ще 50 об'єктів. Найбільша в світі сонячна електростанція (Ivanpah Solar Electric Generating System, Каліфорнія / США) введена в експлуатацію в 2014 році. Ця установка виробляє електроенергію для 140 000 будинків навіть після заходу сонця. Станція Ivanpah Solar розташована в пустелі Мохаве в трьох годинах на схід від Лос-Анжелеса. Її будівництво велось близько 3 років та коштувало 2 200 млн доларів. Основні характеристики її – річне виробництво електроенергії складає 1,08 млрд кВт · ч, а електрична потужність сягає 377–392 МВт. Станція виробляє абсолютно чисту енергію, без необхідності спалювання будь якого палива. Сонячна енергія використовується станцією навіть після заходу сонця.

5. Проте порівняно з газовими електростанціями навіть найбільша у світі СЕС Ivanpah, обходиться вчетверо дорожче, а генерує набагато менше електроенергії. За підрахунками експертів, в майбутньому електроенергія, що виробляється цією станцією, буде коштувати вдвічі дорожче, ніж одержувана

від звичайних джерел енергії, а витрати, очевидно, будуть перекладені на споживачів. До того ж з 2014 року над станцією щороку гине понад 6 000 птахів.

6. За цим посиланням можна подивитися відео, що наочно пояснює роботу СЕС модульного типу – <https://www.youtube.com/watch?v=ooqiDYa1OvA>.

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. 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: 24.08.2026). – Назва з екрана.
7. 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») [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Я. Б. Форкун. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 48 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/73664/>, вільний (дата звернення: 24.08.2026). – 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: 24.08.2026). – 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: 24.08.2026). – Назва з екрана.

Електронне навчальне видання

**ФОРКУН Яна Борисівна,
ШКУРПЕЛА Олександр Олександрович**

СОНЯЧНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(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»)*

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

План 2026, поз. 86Л

Підп. до друку 18.09.2026. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 6,8.

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.