

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка побутової геліосистеми на базі плоского-вакуумного колектора

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка


Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ЕТ-21


Підпис

Буйняк Є.О.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

ст.викл. Лісевич С.П.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

ст.викл, к.т.н Пундик С.І.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

доцент, к.т.н. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

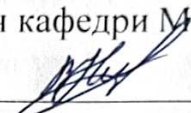
Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2 . 06 . 2025

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Буйняк Євген Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка побутової геліосистеми на базі плоского-вакуумного колектора**

Керівник роботи **Лісевич С.П. старший викладач**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **прототипи колекторів та геліосистем, методика розрахунків колектора.**

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

1 **Огляд та аналіз існуючих технологій та технологічних рішень сонячних колекторів та геліосистем**

2 **Розробка плоско-вакуумного сонячного колектора та геліосистеми**

3 **Розрахунки, що підтверджують працездатність сонячного колектора та геліосистеми**

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. **Конструкції сонячних колекторів та геліосистем. Документ оглядовий (A1).** Аркуш 2. **Плоско-вакуумний сонячний колектор. Схема структура (A2).** Аркуш 3. **Плоский-вакуумний колектор. Вид загальний (A1).** Аркуш 4. **Геліосистема. Схема структурна (A1).** Аркуш 5. **Побутова геліосистема. Схема гідравлічна (A1).** Аркуш 6. **Порівняльний графік ефективності роботи плоско-вакуумного і плоского колекторів. Результати розрахунків (A2).**

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих технологій та технологічних рішень сонячних колекторів та геліосистем	01.03.25р.	
2 Розробка плоско-вакуумного сонячного колектора та геліосистеми	01.04.25р.	
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність сонячного колектора та геліосистеми	25.05.25р.	

Студент


Підпис

Є.О.Буйняк
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

С.П.Лісевич
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Буйняк Євген Олександрович
2. Тема бакалаврської роботи Розробка побутової геліосистеми на базі плоского-вакуумного колектора
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____
4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 68

5. Ця робота присвячена розробці побутової геліосистеми на базі плоского-вакуумного колектора.

У роботі описується детальна розробка та реалізація конструкції плоского-вакуумного колектора, який використовується у побутовій геліосистемі.

В розрахунково – пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологій та технологічних рішень сонячних колекторів та геліосистем. В другому розділі здійснено розробку структурної схеми роботи плоского-вакуумного колектора, здійснюється розробка плоско-вакуумного сонячного колектора і опис його основних компонентів. Також здійснюється розрахунок площі колектора, оптимального кроку між трубками для змієвика колектора, розробка структурної схеми роботи геліосистеми, підбір основних компонентів геліосистеми. В третьому розділі здійснюються розрахунки, що підтверджують працездатність сонячного колектора та геліосистеми: розрахунок ефективності роботи сонячної геліосистеми гарячого водопостачання з використанням плоско-вакуумного сонячного колектора, розрахунок внутрішнього тиску в трубці сонячного колектора, розрахунок ефективності поглинання сонячного випромінювання, розрахунок передачі випромінювання через вакуум, та порівняльний розрахунок вихідної теплової енергії для плоского-вакуумного колектора та плоского.

Підпис студента _____

« 2 » 06 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК

Протокол 1 від « 12 » 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 5,0 / A

Рекомендації ЕК -




Особливі відмітки -

Технічний секретар _____

« 12 » 06 2025 р.

ЗМІСТ

	с.
Вступ.....	7
1 Огляд та аналіз існуючих технологій та технологічних рішень сонячних колекторів та геліосистем	9
1.1 Сонячна енергія та її використання	9
1.2 Принцип роботи сонячних колекторів та геліосистем.....	11
1.3 Класифікація сонячних колекторів та геліосистем	17
1.4 Порівняння плоских та вакуумних колекторів.....	30
2 Розробка плоско-вакуумного сонячного колектора та геліосистеми.....	32
2.1 Розробка структурної схеми роботи плоско-вакуумного сонячного колектора.....	32
2.2 Опис конструктивних особливостей плоско-вакуумного колектора... ..	32
2.3 Розрахунок площі сонячного колектора.....	41
2.4 Розрахунок оптимального кроку між трубками сонячного колектора	45
2.5 Розрахунок мінімального радіусу згину трубки для змієвика колектора.....	46
2.6 Розробка структурної схеми роботи геліосистеми з плоско-вакуумним колектором.....	48
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність сонячного колектора та геліосистеми.....	56
3.1 Розрахунок ефективності роботи сонячної геліосистеми гарячого водопостачання з використанням плоско-вакуумного сонячного колектора	56
3.2 Розрахунок внутрішнього тиску в трубці сонячного колектора	57

БРМА 25.00.00.000 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка побутової геліосистеми на базі плоского-вакуумного колектора	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Буйняк Є.О						
Перевір.		Лісевич.С.П					5	68
Реценз.						ХНУ зр. ЕТ-21-1		
Н. Контр.		Пундик.С.І						
Затверд.		Неймак.В.С						

3.3 Розрахунок ефективності поглинання сонячного випромінювання плоско-вакуумним колектором.....	58
3.4 Розрахунок передачі випромінювання через вакуум, розрахунок тепловтрат	59
3.5 Розрахунок вихідної теплової енергії для плоско-вакуумного сонячного колектора та плоского сонячного колектора.....	60
Висновки	65
Перелік джерел посилань	66
Додатки.....	68

Вступ

Враховуючи реалії сьогодення, коли вся світова спільнота зіштовхується з досить серйозною енергетичною кризою та все більше приходить розуміння про надзвичайну важливість збереження навколишнього довкілля, джерела альтернативної енергії займають передові позиції і набувають все більшої актуальності. Найбільш передовою рахують сонячну енергію, так як вона є абсолютно чистою та нескінченою. Вона є надзвичайно доступною для будь якого регіона. Не зважаючи на очевидні переваги сонячної енергії, загальна ефективність використання сягає не більше 80% для теплової енергії. Теперішній розвиток технологій не дозволяє використовувати сонячну енергію на всі 100%.

Звичні плоскі сонячні колектори зарекомендували себе як досить економічно доступне та надзвичайно просте рішення у сфері перетворення сонячної енергії у теплову. Їх основною перевагою можна назвати досить просту конструкцію, що дозволяє досить здешевити їх виробництво і здешевити їх обслуговування порівняно з іншими типами сонячних колекторів. Однак, вони мають ряд недоліків, основним недоліком вважається зниження ефективності у холодну пору року та за низької інсоляції.

З іншого боку, вакуумні сонячні колектори за рахунок специфічної конструкції, а саме трубок в яких знаходиться вакуум, володіють здатністю утримувати набагато більше тепла та мінімізувати втрати теплової енергії. Саме це робить вакуумні колектори ефективними в холодну пору року та за низької інсоляції.

На сьогодні перед сучасною спільнотою стоїть завдання знайти компроміс між надійністю, простотою та ефективністю сонячних колекторів. Одним з таких рішень може стати додавання до звичайного плоского колектора прошарку вакууму, який значно зменшить тепловтрати і при цьому не зміниться простота конструкції. Завдяки цьому плоский вакуумний колектор стане досить оптимальним варіантом для приватних домогосподарств та комерційних об'єктів, де має бути ефективна та економічно доцільна система нагрівання води або систе-

ма опалення.

Плоский вакуумний сонячний колектор може являти собою досить інноваційне рішення в сфері нетрадиційної енергетики. Він поєднує в собі простоту плоского сонячного колектора і ефективність вакуумного колектора.

Саме таким чином, розробка плоского вакуумного сонячного колектора є досить перспективним напрямком розвитку нетрадиційної сонячної енергії. Це рішення зможе повністю забезпечити необхідний рівень енергоефективності сонячного колектора, зменшить тепловтрати та буде сприяти подальшому розвитку нетрадиційних джерел енергії.

1 Огляд та аналіз існуючих технологій та технологічних рішень сонячних колекторів та геліосистем

1.1 Сонячна енергія та її використання

Сонячна енергетика має величезний потенціал. За оцінкою фахівців, навіть використання лише 0,0125% сонячної енергії, яка надходить на Землю, цілком достатньо для покриття всіх поточних енергетичних потреб людства. А при підвищенні цього показника на 0,5% можна було б забезпечити енергією й майбутні потреби. Проте реалізація цього потенціалу стикається з певними труднощами: низька щільність сонячного випромінювання, його нерівномірний розподіл, а також висока вартість обладнання для перетворення енергії [1].

На поверхню Землі надходить сонячне випромінювання з енергетичним потенціалом приблизно $81000 \cdot 10^6$ МВт, з яких близько $27000 \cdot 10^6$ МВт припадає на суходіл. Приблизно 80% цієї енергії надходить у період з квітня до вересня. Для порівняння, загальне світове споживання всіх видів енергії становить близько $10 \cdot 10^6$ МВт [1].

Протягом однієї години на Земля отримує від Сонця приблизно стільки ж енергії, скільки все людство споживає за цілий рік [2].

В Україні сонячна енергія має значний потенціал, що дозволяє ефективно впроваджувати геліосистеми як для виробництва теплової енергії, так і для фотоелектричної генерації на всій території країни (рисунок 1.1) [3].

Річний обсяг сонячного випромінювання в Україні становить від 3500 до 5200 МДж/м². Активний сезон використання сонячної енергії триває з квітня по вересень у північних регіонах і з березня по жовтень – південних, що в середньому становить 1900 – 2400 сонячних годин на рік. Середньомісячна інсоляція змінюється від 1070 МДж/м² на півночі до 1400 МДж/м² на півдні. Відповідно до інтенсивності сонячного випромінювання територія України поділяється на чотири зони, які наведено нижче [1].

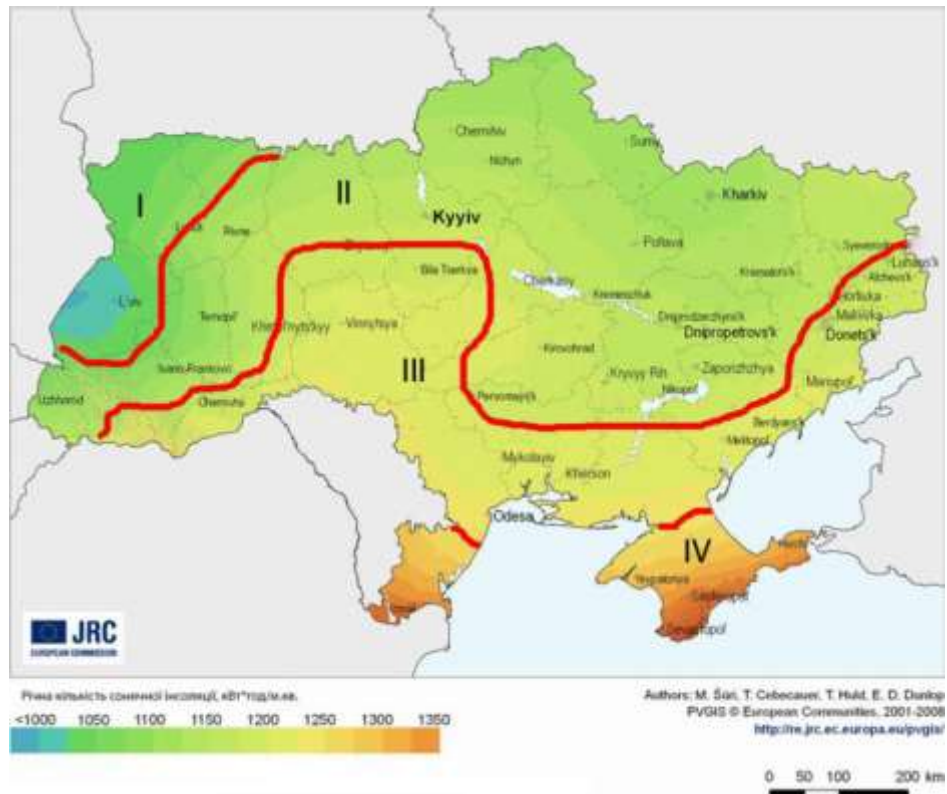


Рисунок 1.1 – Потенціал сонячної енергії України

Південні області України розташовані у третій та четвертій зонах сонячної радіації. Основна частина території країни належить до другої зони, яка є найменш сприятливою для ефективного використання сонячної енергії. Максимальний рівень сонячного випромінювання спостерігається в четвертій зоні – до $1350 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на рік, тоді як мінімальний – у першій зоні, де він становить близько $1000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$. Загалом, Україна належить до регіонів із середнім рівнем сонячної інтенсивності [1].

У реальних умовах щільність прямої та розсіяної радіації залежить від широти місцевості, прозорості атмосфери, особливостей земної поверхні, а також змінюється протягом доби та року. Через це обсяг річного надходження сонячної енергії на 1 м^2 земної поверхні значно відрізняється між різними регіонами України. Спостерігається чітка тенденція: у напрямку з Півночі на Південь зростає як щільність сонячної радіації, так і кількість сонячних днів, що відповідно збільшує річний рівень інсоляції на одиницю площі [1].

Річний технічно доступний потенціал сонячної енергії в Україні еквівале-

нтний близько 6 мільйонам тон умовного палива. Використання цього ресурсу дозволяє заощаджувати приблизно 5 мільярдів кубометрів природного газу. Збільшення застосування сонячної енергії в багатьох регіонах допомогло б вирішити проблеми гарячого водопостачання у теплий період року [1].

Джерелом енергії сонячного випромінювання є термоядерні реакції, що протікають на Сонці.

Сонячний спектр поділяють на три групи: ультрафіолетове випромінювання (довжина хвилі до 0,4 мкм). Видиме випромінювання (довжина хвилі від 0,4 мкм до 0,7 мкм). Інфрачервоне (довжина хвилі падає 0,7 мкм).

Сонячна енергія, проходячи через атмосферу, частково розсіюється і поглинається. Достигнувши земної поверхні, частина сонячної радіації відбивається, а решта поглинається, перетворюючись на тепло. Нагріта поверхня сама починає випромінювати тепло, спрямоване в атмосферу. Водночас атмосфера, нагріта тепловим обміном із землею, також випромінює енергію як у напрямку земної поверхні, так і у космос [1].

1.2 Принцип роботи сонячних колекторів та геліосистем

Сонячні колектори усіх типів стають все більш популярними серед побутових споживачів. Таке рішення є повністю виправданим, так як в певних регіонах гаряча вода є досить дорогою, або таке рішення є необхідним для регіонів, де відсутнє централізоване гаряче водопостачання. Сонячні колектори дуже ефективно можуть використовувати нетрадиційну відновлювальну енергію сонячного випромінювання. Головною перевагою колекторів є екологічність.

Сонячний колектор – це пристрій, що призначений для перетворення сонячної енергії в теплову. Він дозволяє використовувати безкоштовну енергію сонця для підігріву води або теплоносія, який може застосовуватись як для гарячого водопостачання, так і для системи опалення. Подібні установки часто називають геліосистемами для підігріву води, або в побуті – «сонячними водонагрівачами» [4]. Сонячний колектор є невід’ємною частиною геліосистеми.

Основне призначення сонячного колектора – забезпечення гарячого водопостачання. Однак їх застосування цим не обмежується. Різні моделі сонячних колекторів застосовуються для: нагрівання води для гарячого водопостачання (миття посуду, прийняття душу); басейну (нагрівання води в басейнах, особливо в теплу пору року); промислових потреб (нагрівання води для технологічних процесів на підприємствах); опалення приміщення (Сонячні колектори часто використовують як додаткове джерело тепла для опалення житлових будинків, офісів та інших приміщень); для сушіння (сушіння деревини та інших матеріалів та іншої сільськогосподарської продукції); для виробництва електричної енергії (непряме використання – нагрітий теплоносієм передає тепло органічній рідині, яка випаровується і приводить в рух турбіну генератора).

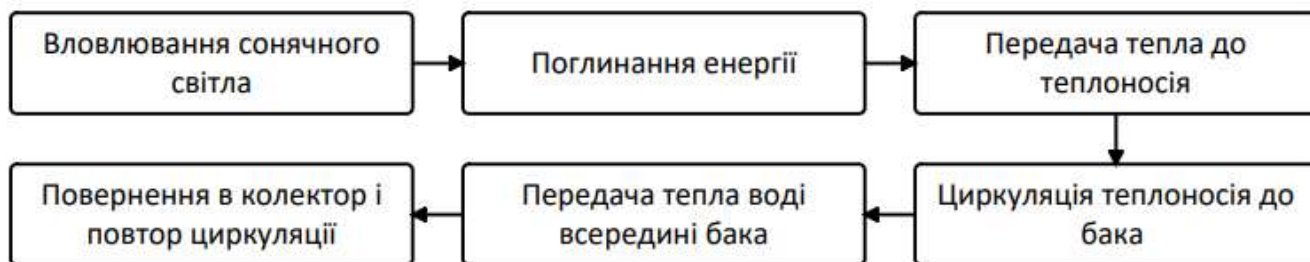


Рисунок 1.2 – Принцип роботи сонячного колектора

Принцип дії сонячного колектора базується на ряді процесів, основним з яких є поглинання сонячного випромінювання та його перетворення в тепло. Цей процес можна умовно розділити на шість етапів (рис. 1.2). На першому етапі сонячне світло повинно максимально потрапити на поверхню колектора, тому його встановлюють під оптимальним кутом до сонця. Далі настає етап поглинання енергії: всередині колектора розташовується темна поверхня – абсорбер, що зазвичай закритий прозорим захисним шаром. Саме ця поверхня інтенсивно поглинає сонячне випромінювання і нагрівається під його дією [4]. Наступним етапом є передача тепла: абсорбер, що нагрівається під дією сонячного випромінювання, контактує з трубками, через які протікає теплоносієм (найчастіше – спеціальний незамерзаючий розчин). У процесі теплообміну нагріта поверхня

абсорбера передає тепло рідині, що циркулює в системі, в результаті чого її температура підвищується [4]. Далі теплоносії починає циркулювати по системі: нагріта рідина рухається по трубопроводу за рахунок природної циркуляції, що виникає внаслідок різниці густин між холодною та гарячою рідиною, або примусово – за допомогою циркуляційного насоса [4]. Наступний, п'ятий етап – забезпечення тепла: нагрітий теплоносії потрапляє до теплообмінника, розміщеного всередині бойлера або акумуляторної ємності. У цьому вузлі тепло передається воді, яка зберігається у баку і згодом може бути використана для побутових потреб чи системи опалення [4]. І в кінці все завершується повторною циркуляцією: охолоджена рідина повертається назад в колектор, де знову нагрівається, і цикл повторюється [4].

Ключовим моментом є здатність сонячного колектора як найбільш ефективно вловлювати енергію сонячного випромінювання і перетворювати дану енергію в корисну теплову енергію.

Циркуляція теплоносія в системі сонячного колектора здійснюється двома способами [4]. Використовується природна циркуляція (термосифонна) або примусова циркуляція. При природній циркуляції система проста (не вимагає насосу), теплоносії (вода) рухається за рахунок різниці густини гарячої і холодної рідини і вона використовується тільки в регіонах, де немає ризику замерзання або сезонно [4]. При примусовій циркуляції теплоносія використовується циркуляційний насос. Найчастіше використовується з незамерзаючою рідиною [4].

Коли мова йде про сонячні колектори, важливо враховувати їхню ефективність. Жоден сонячний колектор не може досягти 100% ефективності, оскільки це суперечить законам фізики – у таких процесах завжди присутні втрати, як у навколишнє середовище, так і інші види енергетичних втрат.

Теплові втрати – це частина сонячної енергії, яка була перетворена в сонячному колекторі на теплову енергію, але не була використана на нагрівання теплоносія, а розсіялася в навколишньому повітрі. Даний вид втрат залежить від різниці температури в колекторі та навколишньому повітрі та коефіцієнтів теп-

лових втрат k_1 (лінійний коефіцієнт теплових втрат Вт/(м²·К) та k_2 (коефіцієнт теплових втрат з урахуванням нелінійності Вт/(м²·К²)) [6].

Втрати складаються із трьох режимів теплообміну: втрати на теплопровідність, конвенційні втрати і втрати випромінювання.

Більшість втрат відбуваються під час теплопровідності. Це втрати теплової енергії що можуть виникати через передачу тепла від нагрітих елементів сонячного колектора до навколишнього середовища через різні частини сонячного колектора.

Оптичні втрати – це частина сонячного випромінювання, яка, потрапивши на поверхню колектора, не перетворюється в теплову енергію. Оптична ефективність колектора визначається оптичним коефіцієнтом корисної дії η_0 . На значення цього коефіцієнта впливають здатність абсорбера поглинати світло, прозорість захисного скла, а також ефективність теплопередачі від абсорбера до теплоносія. Ці характеристики відповідно описуються коефіцієнтами α , t та F_r [6].

$$\eta_0 = \alpha \cdot t \cdot F_r, \#(1.1)$$

де α – здатність абсорбера поглинати світло;

t – прозорість скла;

F_r – ефективність теплопередачі від абсорбера до теплоносія.

Ці коефіцієнти є довідковими і визначаються за допомогою стандартизованих випробувань на спеціальних стендах і відноситься до одиниці площі сонячного колектора. Значення η_0 ще називають ККД колектора за нульових теплових втрат [6].

Максимальне значення ККД досягається за умови, що різниця температури ΔT дорівнює нулю [6]. Саме у такому випадку сонячний колектор не має жодних теплових втрат. Проте досягнення таких умов є практично не реальним і на практиці не зустрічаються. В кожному паспорті сонячного колектора обов'язково має бути зазначене значення η_0 .



Рисунок 1.3 – Теплові втрати у сонячному колекторі

Принцип оптимізації конструкції сонячних колекторів спрямовані на максимальне підвищення здатності до поглинання сонячного випромінювання та мінімізації теплових втрат. Найвищу оптичну ефективність демонструє відкритий колектор, оскільки немає прозорого покриття, однак він також зазнає найбільших теплових втрат. Натомість вакуумний сонячний колектор характеризується найменшими тепловими втратами завдяки ефективній теплоізоляції, проте його оптичний ККД дещо нижчий через наявність двошарового прозорого покриття, особливістю циркуляційної форми абсорбера та додаткові етапи передачі тепла [6].

Ефективність сонячних колекторів значною мірою залежить від умов їх експлуатації, оскільки ці умови безпосередньо впливають на кількість енергії, яку система здатна перетворити з сонячного випромінювання. Основні фактори, що впливають на ефективність, можна розділити на декілька ключових категорій: кліматичні умови, кут нахилу та орієнтація, технологічні фактори, вітер.

До кліматичних умов потрібно віднести:

- інсоляція – це процес опромінення поверхні сонячним світлом, тобто сонячною радіацією. Вона означає надходження потоку сонячної енергії на поверхню у вигляді паралельних променів, що йдуть з напрямку, де в даний момент спостерігається центр сонячного диску [7]. Інсоляція вимірюється числом

одиниць енергії, падаючої на одиницю поверхні за одиницю часу. Зазвичай інсоляцію вимірюють в кВт · год / м² [7];

- температура повітря колосально сильно впливає, різниця між робочою температурою теплоносія в колекторі та температурою навколишнього середовища;

- сезонність: все-таки сонячний колектор найбільш ефективний у літку, коли світловий день дуже довгий і температура навколишнього середовища досить висока.

Надзвичайно важливим є кут нахилу сонячного колектора, якщо кут нахилу підібраний не правильно, то ефективність сонячного колектора значно зменшується. Як правило оптимальним є кут 45 градусів.

До забруднення та обслуговування потрібно віднести:

- пил і бруд, якщо на поверхні сонячного колектора буде певне накопичування бруду, пилу або інших часток то ефективність такого колектора значною мірою падає, бо падає прозорість скла і здатність абсорбувати сонячне випромінювання;

- обслуговування системи, для підтримки оптимальної роботи системи потрібна стабільне і регулярне обслуговування системи сонячного колектора.

До технологічних факторів потрібно віднести тип колектора. Конструктивно плоскі сонячні колектори відрізняються від вакуумних сонячних колекторів, вони будуть мати різну ефективність.

Також дуже сильно на ефективність сонячного колектора впливає швидкість вітру. Вітер може охолоджувати колектор, підвищуючи тепловтрати. Тому важливо враховувати швидкість і напрямок вітру при встановленні системи, щоб мінімізувати вплив охолодження.

Для забезпечення максимальної ефективності сонячних колекторів важливо враховувати всі ці фактори та регулярно обслуговувати систему. Правильна експлуатація, налаштування кутів і чистка колекторів здатні суттєво підвищити їх продуктивність і продовжити термін служби.

Сонячні колектори, як правило, використовуються в геліосистемах.

Геліосистема – це установка, яка перетворює сонячну енергію на інші її форми, зокрема на теплову або електричну, переважно через тепловий процес. Найпоширенішим елементом такої системи є сонячний колектор, який уловлює інфрачервоне випромінювання для нагрівання теплоносія. Простий приклад — чорна металева пластина, яка поглинає тепло, що потім передається теплоносію, який циркулює по трубках на її зворотному боці [5].

1.3 Класифікація сонячних колекторів та геліосистем

Плоский колектор (рис. 1.4) – це тип теплообмінника, який за рахунок парникового ефекту перетворює сонячне випромінювання на теплову енергію. Він акумулює сонячну енергію та використовує її для нагрівання води, яка може застосовуватись для побутових потреб – таких як купання, прання, опалення приміщення – а також для підігріву води у відкритих басейнах [8].

Плоскі сонячні колектори працюють на основі використання прямого розсіювання сонячного випромінювання без його концентрації. Основною перевагою такої конструкції є її простота, що робить систему доступнішою за вартістю при достатній високій ефективності та надійності. Водночас, недоліком є значні теплові втрати, які знижують ефективність вироблення теплової енергії в умовах низької зовнішньої температур [1].



Рисунок 1.4 – Плоский сонячний колектор

Конструктивно плоский колектор виконаний у вигляді прямокутної пластини (рис 1.5). У теплоізолюваному корпусі колектора знаходиться основний елемент – абсорбер (поглинаюча пластина) [9].

Абсорбер – ключовий елемент сонячного колектора. Зазвичай у плоских сонячних колекторах застосовують абсорбери двох типів: пір'яний і цільнолистовий. У пір'яних абсорберах до окремих пластин прикріплена або приварена трубка. Трубки таких абсорберах з'єднуються між собою як «арфи». Такий тип з'єднання ще називають колекторним. У цільнолистових абсорберах система розподілу теплоносія буває у вигляді «змієвика» або трубки з'єднані колекторним типом [10].

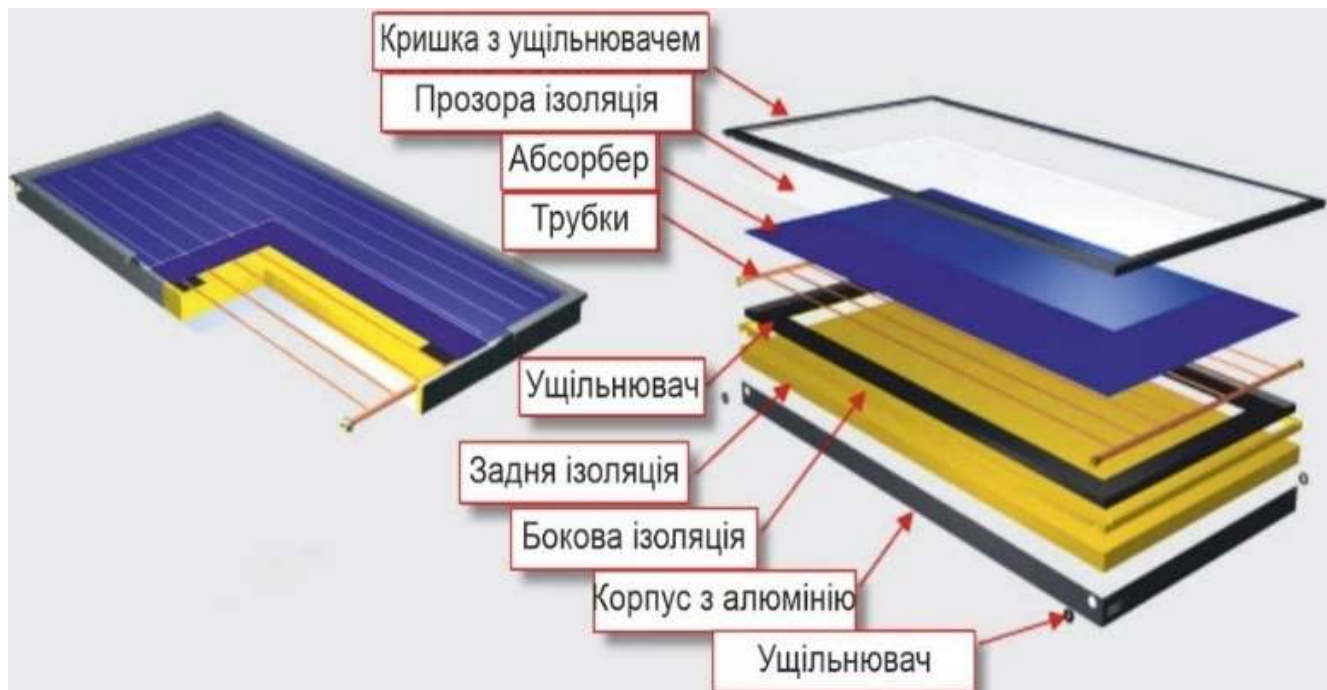


Рисунок 1.5 – Конструкція плоского сонячного колектора

Перевагою плоского сонячного колектора є відносна простота конструкції, яка дозволяє здешевити систему за досить високих показників продуктивності та надійності. Недоліком можна назвати високі теплові втрати, які знижують показники вироблення теплової енергії за низької температури повітря.

Плоскі сонячні колектори здобули сферу широкого використання завдяки простоті їхньої конструкції та досить доступній ціні. Основні напрямки їх застосування: гаряче водопостачання в приватних будинках, підігрів води для комерційних будівель, підтримка системи опалення приміщення, підігрів води у басейнах, сільськогосподарські потреби, промислові процеси з низькотемпературними вимогами і сонячні душі в літніх таборах.

Вакуумні трубчасті колектори мають форму колб, яка є оптимальною для створення й забезпечення вакууму. Завдяки цьому вони стали найпопулярнішими в побутовому використанні. Існують різні типи трубчастих колекторів, що відрізняються конструктивно, тому мають різні призначення ефективності, призначення та особливості експлуатації [1].

Найбільш поширені вакуумні сонячні трубчасті колектори можна класифікувати за двома основними конструктивними особливостями скляних трубок і

теплового каналу, які використовуються як абсорбер сонячного колектора: за типом скляної трубки та типом теплового каналу [11].



Рисунок 1.6 - Вакуумний трубчастий колектор

Розглянемо класифікацію за типом скляної трубки. Її так само можна розділити на два основні типи конструкції: коаксіальна трубка та пір'яна трубка [11].

Коаксіальна трубка (рис 1.7) фактично є термосом з подвійною скляною колбою. В просторі між трубками відкачано повітря (створений вакуум). На стінці внутрішньої трубки нанесено поглинаюче покриття, тому передача тепла походить від поверхні скла [11].



Рисунок 1.7 - Коаксіальна трубка

Пір'яна трубка являє собою одностінну скляну колбу. Вакуум знаходиться у просторі теплового каналу, в цих трубках частина теплового каналу та абсорбера інтегрована всередині самої колби [11].



Повздовжній розріз коаксіальної вакуумної трубки

Рисунок 1.8 – Повздовжній розріз коаксіальної вакуумної трубки



Рисунок 1.9 – Пір'яна трубка



Рисунок 1.10 – Схема роботи теплової трубки у вакуумному сонячному колекторі

За типом теплового каналу сонячні вакуумні колектори можна розділити на два типи: тепловий канал типу Heat pipe та прямоточний тепловий канал [11].

Сонячний вакуумний колектор з трубками типу Heat pipe, також відомий як теплова трубка, є найпоширенішим видом серед вакуумних сонячних колекторів. Його робота базується на використанні герметичних трубок із теплопровідного матеріалу (зазвичай міді або алюмінію), всередині яких міститься легко кипляча рідина. Під дією сонячної енергії ця рідина випаровується в нижній частині трубки, поглинаючи теплоту, а у верхній частині – конденсується, віддаючи тепло, яке потім відбирається теплоносієм через поглинач. Після конденсації рідина повертається вниз, і цикл повторюється [11]. Схема роботи теплової трубки у вакуумному сонячному колекторі зображена на рисунку 1.10 [1].

У вакуумних трубчастих сонячних колекторах з прямоточним каналом теплоносій безпосередньо проходить крізь кожну трубку і нагрівається в процесі циркуляції. До основного колектора приєднується вакуумні трубки, які поглинають сонячну енергію і передають тепло через конденсатор, розміщений у верхній частині трубки [1].

Вакуумна коаксіальна трубка може поєднуватися з тепловим каналом типу «Heat-pipe». Даний сонячний вакуумний колектор є найбільш поширеним через свою низьку вартість і простоту заміни пошкоджених трубок (рис. 1.11) [1].

У вакуумних трубчастих сонячних колекторах з прямоточним каналом (рис. 1.12), теплоносій безпосередньо протікає і нагрівається в кожній з трубок колектора. Різні типи теплових каналів можуть поєднуватися з різними типами вакуумних колб [1].

У таких колекторах процес передачі є багатоступеневим: спочатку тепло переходить від скла до алюмінієвого ребра, далі від ребра до теплової трубки, і лише потім до теплоносія геліосистеми. Через цю складність передачу енергії, а також округлу форму абсорбера, ефективність цих колекторів є середньою. Максимальний оптичний коефіцієнт корисної дії (η_0) таких систем зазвичай не перевищує 65% [11].

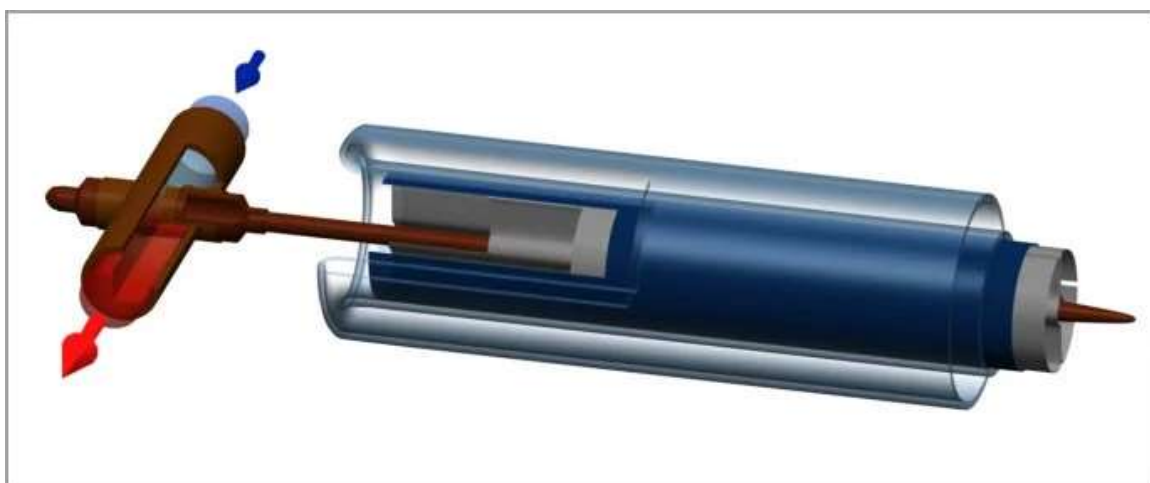


Рисунок 1.11 – Сонячний колектор з тепловою трубкою

Коаксіальна вакуумна трубка так само може бути використана для колектора з прямоточним тепловим каналом. Даний тип сонячного вакуумного колектора називаються колектори з U-образною трубкою – рисунок 1.13 [1].



Рисунок 1.12 – Сонячний колектор з прямоточним тепловим каналом та U – подібною трубкою

Цей тип вакуумного сонячного колектора демонструє підвищену ефективність завдяки зменшенню кількості етапів теплопередачі: тепло від алюмінієвого шару одразу передається трубкам з теплоносієм геліосистеми. Завдяки цьому максимальний ККД колектора може досягати 76%. Проте недоліком такої конструкції є складність ремонту – у разі певних пошкоджень може знадобитися заміна всього колектора, а не окремої колби [11].



Рисунок 1.13 – Вакуумна коаксіальна трубка з прямоточним тепловим каналом:

- 1 – зовнішня скляна колба; 2 – високоселективне поглинаючі покриття;
- 3 – алюмінієва вставка; 4 – тепловий канал з теплоносієм;
- 5 – вакуумний прошарок; 6 – внутрішня скляна колба

Вакуумна коаксіальна трубка в поєднанні з тепловим каналом «Heat-pipe» зображена на рисунку 1.14.

Пір’яна трубка так само може поєднуватися з тепловим каналом «Heat-pipe» (рис. 1.14). Дані вакуумні трубчасті колектори мають більш високі оптичні

характеристики, ніж колектори з коаксіальною трубкою. У деяких виробників значення максимального ККД досягають 77 %. Цьому сприяють деякі конструктивні особливості: плоский абсорбер з безпосередньою передачею теплоти до теплової трубки, а так само один шар скла, що значно зменшує відображення сонячного випромінювання. Так само зручним є процес заміни пошкоджених трубок, що не вимагає заміни всього колектора і зливання теплоносія всієї геліосистеми [11].

Найбільшою ефективністю виділяється поєднання пір'яної трубки з прямимоточним тепловим каналом (рис. 1.16). Саме за допомогою такої комбінації в сонячному вакуумному колекторі досягається ефективність 80%. Але у разі поломки при необхідності заміни пошкоджених трубок з'являється необхідність злиття теплоносія з усієї геліосистеми. Але вакуумні сонячні колектори з таким поєднанням є найдорожчими [1].



Рисунок 1.14 – Вакуумна коаксіальна трубка в поєднанні з тепловим каналом «Heat-pipe»: 1 – зовнішня скляна колба; 2 – високоселективне поглинаюче покриття; 3 – алюмінієві ребра; 4 – вакуумний прошарок; 5 – тепловий канал з рідиною, яка легко випаровується; 6 – внутрішня скляна колба

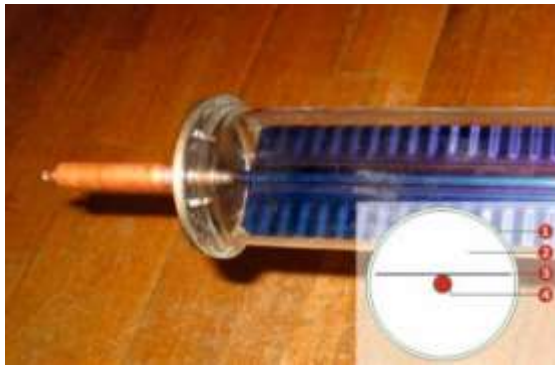


Рисунок 1.15 – Пір’яна трубка з тепловим каналом типу «Heat-pipe»: 1 – скляна колба; 2 – вакуумний прошарок; 3 – мідний абсорбер з високоселективним покриттям; 4 – тепловий канал з рідиною, яка легко випаровується



Рисунок 1.16 – Пір’яна трубка з прямоточним тепловим каналом: 1 – скляна колба; 2 – вакуумний прошарок; 3 – мідний абсорбер з високоселективним покриттям; 4 – внутрішній теплової канал з теплоносієм; 5 – зовнішній теплової канал з теплоносієм (що нагрівається)

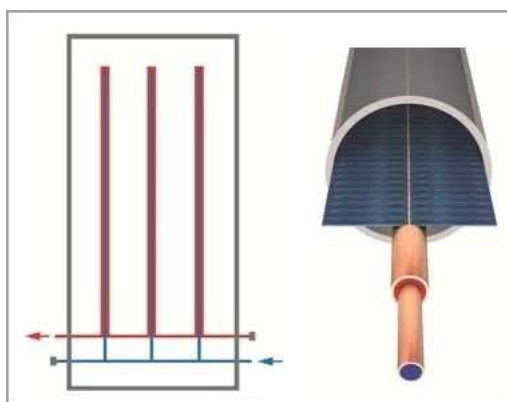


Рисунок 1.17 – Схема циркуляції теплоносія в вакуумному колекторі з пір’яною трубкою і прямоточним тепловим каналом

На рисунку 1.17 зображена схема циркуляції теплоносія в вакуумному колекторі з п'яною трубкою і прямоточним тепловим каналом.

Геліосистеми можна розділити на два типи: сезонні і цілорічні.

Сезонні геліосистеми або як їх ще називаються термосифонні використовуються лише в певні сезонні періоди такі як весна-осінь. В конструктивному плані їх встановлюють як моноблочні пристрої, як правило вони складаються з сонячного колектора будь якого типу, який встановлюється і фіксується на металевому профільному каркасі, і приєднаного до нього спеціального баку накопичувача. Використання даних систем зумовлена замерзанням води при низьких температурах, що робить не можливим використання системи у зимовий період часу.

Якщо замінити воду на антифриз, то це не вирішить проблему сезонності. Так як усі компоненти знаходяться на вулиці, і їх робота залежить від температури навколишнього середовища. Якщо спробувати використовувати колектори з непрямим нагріванням навіть якщо використовувати фреон, то вода все рівно замерзне у вхідних трубках або накопичувальному баку.

Цілорічні системи працюють у будь-яку пору року, і їхня ефективність визначається не температурою навколишнього середовища, а інтенсивністю сонячного випромінювання [5].

Принцип роботи одноконтурної термосифонної системи для прямого нагріву води полягає в наступному (рис. 1.18). Колектори, бак-акумулятор і з'єднувальні трубопроводи заповнені холодною водою. Сонячне випромінювання, проходячи через прозоре скло колектора, нагріває поглинаючу панель і воду в її каналах. При нагріванні щільність води зменшується, і тепла рідина піднімається до верхньої точки колектора, далі рухається трубопроводом у бак-акумулятор [13].

У баку гаряча вода збирається у верхній частині, тоді як холодніша осідає внизу, створюючи температурне розшарування. Холодна вода з нижньої частини бака по трубках надходить у нижню частину колектора. Таким чином, при дос-

татній сонячній радіації в колекторному контурі виникає постійна циркуляція, інтенсивність якої залежить від інтенсивності сонячного випромінювання [13].

Протягом дня відбувається поступове нагрівання всього бака, а гаряча вода для використання збирається з верхніх, найбільш нагрітих шарів. Зазвичай холодна вода подається під тиском знизу бака, витісняючи нагріту воду для споживання [13].

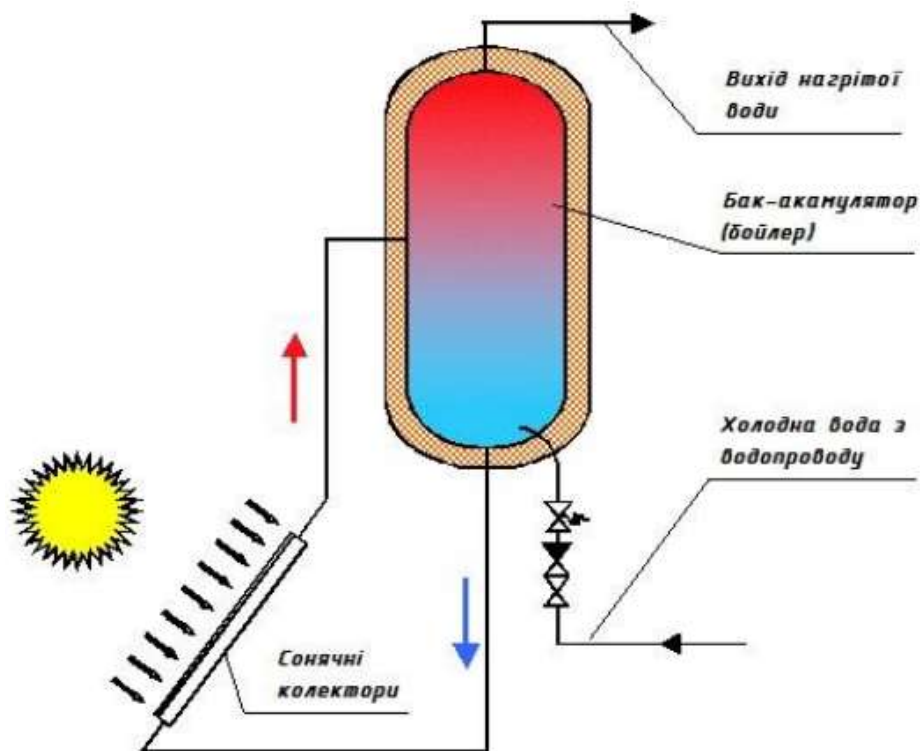


Рисунок 1.18 – Принципова схема одноконтурної термосифонної системи сонячного гарячого водопостачання

Принцип функціонування двоконтурної термосифонної системи полягає в наступному (рис. 1.19). Її робота подібна до одноконтурної системи, однак вона включає окремий замкнений контур колектора, що складається з сонячних колекторів, трубопроводів і теплообмінника, вбудованого в бак – акумулятор. У цей контур заливають спеціальний теплоносіє, зазвичай такий, що не замерзає [13].

Під дією сонячної енергії теплоносіє у колекторах нагрівається, піднімається в гору до теплообмінника, де передає тепло воді в баку. Після охолодження

теплоносії опускається вниз до входу в колектори, забезпечуючи безперервну циркуляцію за наявності сонячного випромінювання [13].

Повне нагрівання води в баку відбувається поступово протягом усього світлового дня. Проте, оскільки забір води до споживача здійснюється з найгарячіших верхніх шарів, користуватися гарячою водою можна ще до того, як весь об'єм буде повністю прогрітий [13].

Особливістю цих систем є те, що для термосифонної схеми нижня частина бака-акумулятора має бути розміщена вище за верхню точку колектора і не далі ніж на 3 – 4 метри від нього. У разі використання системи з насосною циркуляцією теплоносія, розташування бака – акумулятора може бути будь - яким [13].

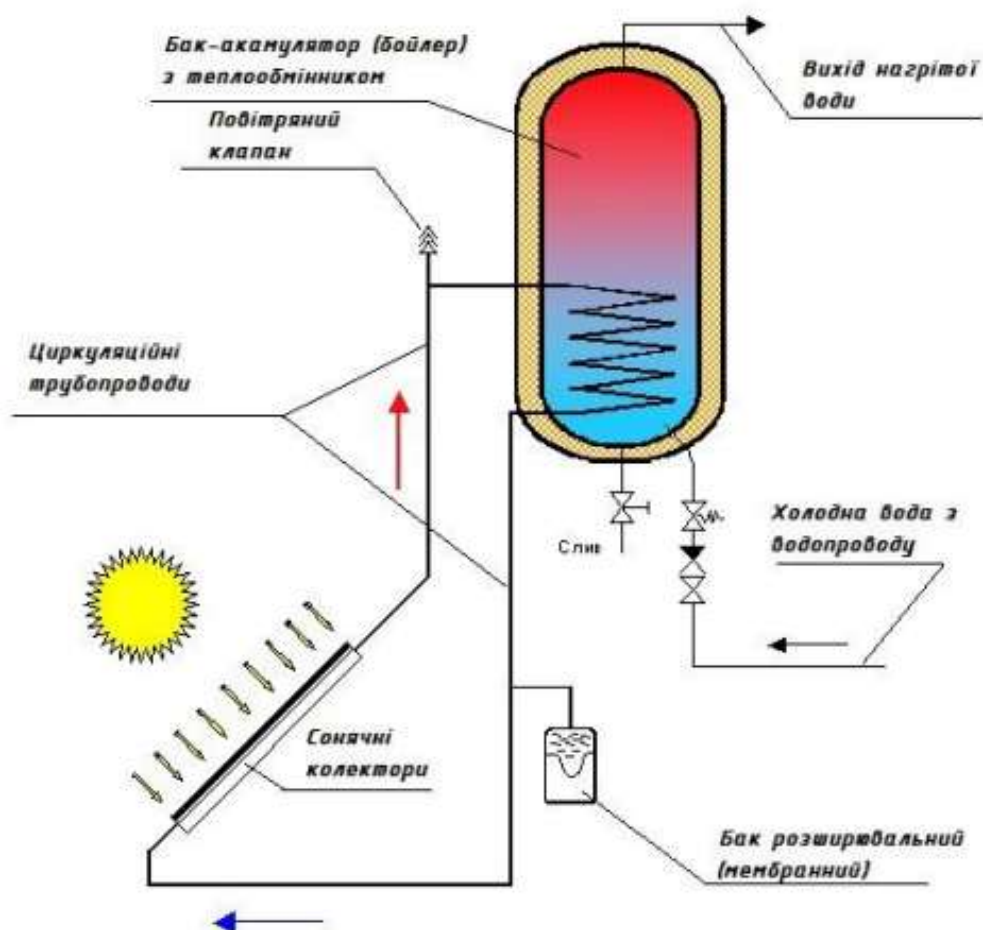


Рисунок 1.19 – Принципова схема двоконтурної термосифонної системи сонячного гарячого водопостачання

Принцип роботи двоконтурної термосифонної системи сонячного гарячого

водопостачання з примусовою циркуляцією полягає в наступному (рис. 1.20). У системах із примусовою циркуляцією в колекторний контур додається циркуляційний насос, що дозволяє розміщувати бак – акумулятор у будь – якому місці будівлі. Напрямок руху теплоносія має відповідати напрямку природної циркуляції в колекторах [13].

Увімкнення та вимкнення насоса контролюється електронним блоком керування – диференціальним реле, яке порівнює показники температурних датчиків, розташованих на виході колектора і в баку [13].

Насос запускається, коли температура в сонячних колекторах стає вищою за температурою води в баку. Існують також спеціальні системи керування, які дозволяють регулювати швидкість обертання та продуктивність насоса, підтримуючи постійну різницю температур між колекторами і баком [13].

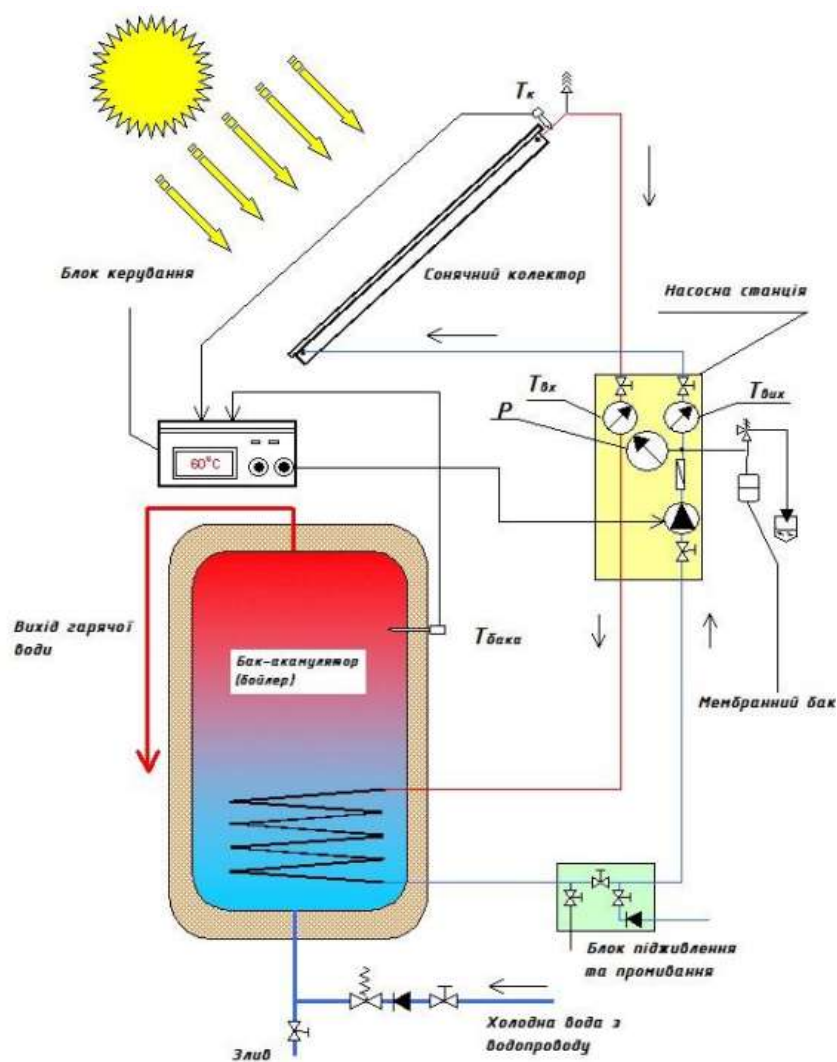


Рисунок 1.20 – Принципова схема двоконтурної системи сонячного гарячого водопостачання з примусовою циркуляцією

Дану схему використовуємо як прототип двоконтурної системи сонячного гарячого водопостачання з примусовою циркуляцією.

Для зменшення тепловтрат та збільшення ефективності оснащуємо цю систему плоско-вакуумним колектором.

1.4 Порівняння плоских та вакуумних колекторів

Порівнюючи сонячні колектори потрібно звернути увагу на наступні фактори: ефективність колектора; забрудненість; площа яку займає колектор.

1) Коефіцієнт корисної дії (ККД) колектора є одним з ключових параметрів, що визначають ефективність роботи сонячного колектора. Він демонструє, яку частку сонячного випромінювання пристрій здатен перетворити на теплову енергію. Втрати тепла можуть виникати з різних причин, зокрема через відбиття та поглинання сонячного світла склом, відбивання від абсорбера, повторне інфрачервоне випромінювання тощо. Зазвичай ККД залежить від конструктивних особливостей колектора й може варіюватись від 65% до 90% [12]. Вакуумний колектор має ефективність понад 85% на 20% більша ніж у плоского сонячного колектора.

2) Вакуумні колектори відзначаються вищою стійкістю до зовнішніх забруднень. Завдяки циліндричній формі трубок і простору між ними, такі забруднення, як листя, гілки, папір або поліетилен, зазвичай проходять крізь проміжки, не затримуючись на поверхні. Натомість плоскі сонячні колектори, особливо ті, що встановлені під малим кутом, можуть потребувати додаткового очищення та догляду [12].

3) При однаковій займаній площі вакуумні колектори забезпечують вищу потужність порівняно з плоским колектором. Це зумовлено тим, що абсорбери, розташовані в трубках, здатні поглинати не лише пряме сонячне випромінювання, а й відбите світло, яке потрапляє на задню поверхню трубок [12].

Дослідження свідчать, що при однаковій загальній площі установки апертурна (ефективна, активна) площа вакуумного колектора приблизно на 20% перевищує аналогічний показник плоского колектора[12].

Як правило плоскі сонячні колектори потрібно вибирати для використання в теплі сезони такі як пізня весна, літо і рання осінь. Такий тип колектора дуже добрий для різних літніх таборів відпочинку або для садиб за містом.

Завдяки високій ефективності, вакуумні сонячні колектори ідеально підходять для цілорічної експлуатації в системах опалення. Порівняно з плоскими колекторами, вони демонструють кращі показники, особливо в осінньо-весняний період, коли можуть забезпечувати основне тепло для приміщення. Взимку вакуумний колектор ефективно доповнює традиційні джерела тепла, знижуючи споживання палива на 40-80% в залежності від конкретних умов.

Висновок до першого розділу

В першому розділі було розглянуто сонячні колектори і геліосистеми які виконують функцію забезпечення гарячим водопостачанням певних об'єктів. Було розглянуто їх принцип роботи, конструктивні особливості плоских, трубчаста вакуумних сонячних колекторів. Було перелічено їх переваги і недоліки. На основі наведеної інформації можна зробити висновок, що усі колектори мають право на застосування, потрібно індивідуально підбирати колектори задаючись певними параметрами. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що поєднання простої конструкції плоского сонячного колектора з елементами вакуумної технології дозволить досягти вищої ефективності при зниженні вартості. Такий підхід забезпечує оптимальне співвідношення між продуктивністю та економічністю системи, поєднуючи переваги обох типів колекторів – простоту і доступність плоских конструкцій з високою тепловою ізоляцією вакуумних моделей.

2 Розробка плоско-вакуумного сонячного колектора та геліосистеми

2.1 Розробка структурної схеми роботи плоско-вакуумного сонячного колектора

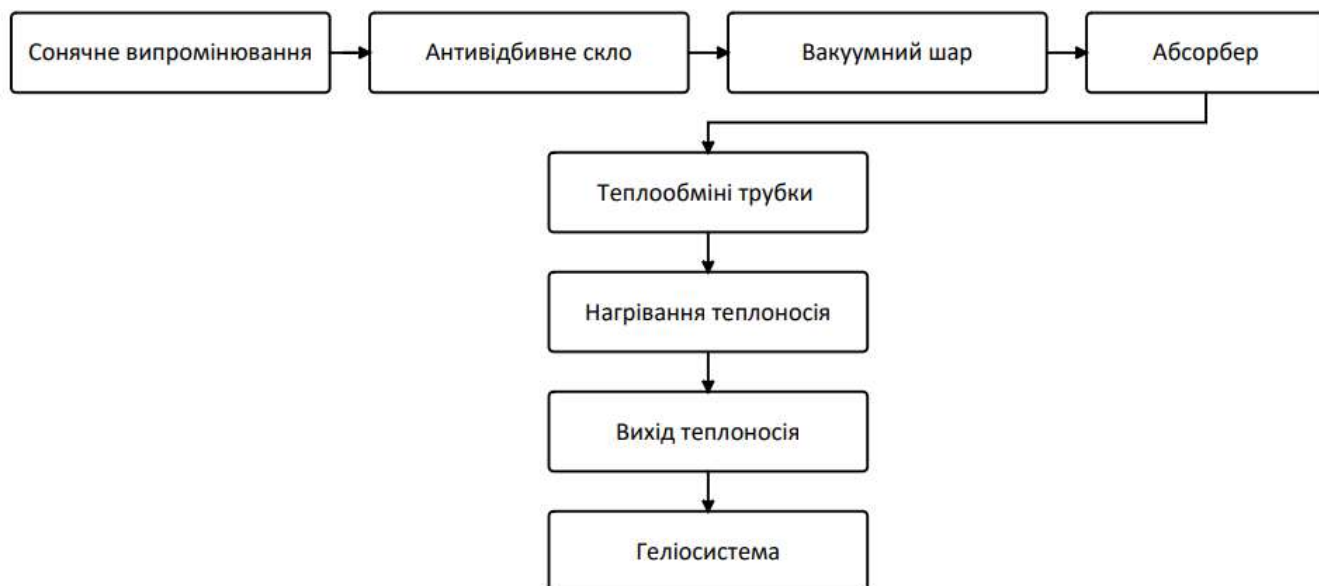


Рисунок 2.1 – Принципова схема роботи плоско-вакуумного колектора

Принципова схема (рис 2.3) показує принцип роботи плоско-вакуумного сонячного колектора. Першим етапом є попадання сонячної енергії на площу колектора, сонячна енергія у вигляді короткохвильового електромагнітного випромінювання потрапляє на поверхню колектора. Далі скло з антивідбивним покриттям пропускає через себе сонячне випромінювання. Далі сонячне випромінювання через вакуумний шар потрапляє на абсорбер. Головна перевага наявності вакуумного шару є зменшення тепловтрат в навколишнє середовище. Абсорбер поглинає тепло і передає його теплообмінним трубкам які в свою чергу нагрівають теплоносій. Останнім етапом є вихід нагрітого теплоносія і передача тепла в геліосистему, де в подальшому буде відбуватись розподіл гарячої води.

2.2 Опис конструктивних особливостей плоско-вакуумного колектора

Плоско-вакуумний сонячний колектор показаний на рисунку 2.1. Він складається з наступних компонентів: прозорого покриття (скла), поглинаючої пластини (абсорбера), теплоносія, теплоізоляційний шар і корпусу.



Рисунок 2.1 – Плоско-вакуумний сонячний колектор

1. Прозоре покриття (або скло), в плоско-вакуумному сонячному колекторі є важливим елементом, що виконує захисні і ізоляційні функції. Також якісно підібране скло сприяє поліпшенню поглинання сонячного випромінювання. Його конструкція і матеріал безпосередньо впливають на загальну ефективність колектора, оскільки від прозорого покриття залежить, скільки сонячного випромінювання досягне до абсорбера і як багато тепла буде зможе згенерувати сонячний колектор.

Основною функцією яку виконує прозорого покриття є пропускання сонячного випромінювання. Пропускна здатність прозорого покриття є ключовими

для ефективної роботи сонячного колектора. Скло має пропускати максимальну кількість сонячного випромінювання в діапазоні від 400 до 700 нанометрів. Саме ця частина спектра несе найбільшу кількість енергії і сприяє ефективному нагріванню поглинаючої пластини.

Другою і не менш важливою функцією скла є зменшення теплових втрат за рахунок конвекції. Тобто скло являє собою перешкоду між внутрішніми компонентами сонячного колектора і зовнішнім середовищем. Воно допомагає утримати тепло в середині колектора.

Можливе використання 4 видів прозорих покриттів. Звичайне скло: таке скло має дуже хороші характеристики стійкості до ультрафіолетового випромінювання і володіє досить хорошими характеристиками ударостійкості до зовнішніх факторів. Також дане скло досить часто використовується за рахунок своєї низької вартості. Проте таке скло має досить серйозний недолік, а саме досить велике відбивання сонячного випромінювання. Тобто значна частина сонячного випромінювання просто відбивається не попадаючи на абсорбер. Загартоване скло: загартоване скло є надзвичайно міцним, воно витримує удари граду, падіння не великого каміння і інші механічні пошкодження. Антивідбивне скло: дане скло є дуже ефективне в плані пропускну здатності сонячного випромінювання в порівнянні з попередніми варіантами. Відбувається це за рахунок використання спеціального антивідбивного покриття, яке наноситься на зовнішню сторону скла. Полімерні прозорі покриття: полімерні покриття можуть бути використанні для покращення стійкості скла до зовнішніх факторів. Але дані покриття досить не часто застосовуються через меншу стійкість до ультрафіолетового випромінювання і з часом вони втрачають свої пропускі здатності.

Основною фізичною характеристикою прозорого покриття є коефіцієнт пропускання світла. Оптимальним прозорим покриттям для сонячного колектора є таке, яке має коефіцієнт пропускання у видимому спектрі понад 90%, забезпечуючи максимальну ефективність поглинання сонячної енергії.

В даному плоско-вакуумному колекторі використовується антивідбивне скло.

2. Поглинаюча пластина (абсорбер). Вона відповідає за перетворення сонячного випромінювання в тепло, яке потім передається теплоносію, що циркулює всередині колектора. У конструкції абсорбера враховуються матеріали, покриття і механізми передачі тепла, що забезпечують максимальну ефективність його роботи.

Основними функціями абсорбера є: поглинання сонячного випромінювання. Абсорбер завжди покривається темним селективним покриттям яке забезпечує поглинання сонячного випромінювання в найбільших об'ємах що дозволяє перетворити найбільш ефективно енергію сонячного випромінювання в теплову енергію.

Абсорбер поглинаючи сонячне випромінювання передає тепло теплоносію рідкому або повітряному, що перебуває у системі сонячного колектора.

Абсорбер проектується таким чином, щоб більше мінімізувати теплові втрати в навколишнє середовище.

Абсорбер складається з трьох основних компонентів: базового матеріалу, теплопередаючих трубок та селективного покриття.

Базовий матеріал абсорбера обирається з огляду на високу теплопровідність, низьку теплову інерцію та стійкість до корозії. Найпоширенішими матеріалами є: мідь, вона має високу теплопровідність і корозійну стійкість, що дозволяє ефективно передавати тепло.

В абсорберах для теплоносія використовують спеціальні теплопередаючі трубки. Зазвичай, їх виготовляють з міді, через високу теплопровідну здатність і надійність. Як правило трубки розміщуються у формі змійки або у вигляді кількох паралельних трубок. Така конфігурація дозволяє найбільш ефективно рівномірно розподілити тепло по усій площі абсорбера, і уникнути холодних зон і зон перегріву.

Наявність селективного покриття є необхідністю для збільшення ефективності поглинальної спроможності абсорбера, так як воно забезпечує одномоментне поглинання максимального сонячного випромінювання.

Використовуються три види селективного покриття.

Перший вид це темний анодний шар, як правило, це чорний хром або оксид нікелю. Використовується таке покриття для максимального поглинання видимого спектру сонячного випромінювання. Другий вид це оптичний селективний шар. Використовується у вигляді багат шарового покриття, яке забезпечує надзвичайно високу здатність поглинати видиму частину спектру і дозволяє мінімізувати втрати інфрачервоного випромінювання. До третього виду відносять нанопокриття. Нанопокриття дозволяють підвищити поглинальну здатність і довготривалість життя абсорбера, а також нанопокриття підвищує стійкість до ультрафіолету.

В даному колекторі використовується мідний абсорбер з мідними трубками, який покритий темним анодовим шаром селективного покриття.

Теплопровідність матеріалу який використовується в абсорбері забезпечує рівномірний розподіл тепла, що відіграє надзвичайну велику роль у великих сонячних колекторах. Матеріали такі як мідь і алюміній забезпечують найкращу теплопровідність, саме це дозволяє збільшити швидкість нагріву теплоносія і також зменшує втрати через зони перегріву.

3. Теплоносій у сонячному колекторі є найбільш важливим елементом. Він передає теплову енергію, яку поглинув абсорбер. Ефективний вибір теплоносія безпосередньо впливає на його майбутню ефективність. Адже саме від теплоносія залежить як швидко і з якими тепловтратами передається теплова енергія.

Основною функцією теплоносія є передачі тепла від абсорбера, стабільне підтримування робочої температури і запобігання замерзанню та перегріву.

Теплоносій, як правило, вода або спеціальний антифриз, циркулює по трубках всередині сонячного колектора. При контакті з нагрітою поглинаючою поверхнею, теплоносій нагрівається і передає теплову енергію до теплообмінника. В теплообміннику тепло від теплоносія передається іншому теплоносію або безпосередньо споживачу, наприклад, радіаторам опалення або бойлеру для гарячої води. Таким чином, сонячна енергія перетворюється на теплову і використовується для опалення або гарячого водопостачання.

Правильно підібраний теплоносій відіграє ключову роль у ефективній ро-

боті сонячної системи опалення. Він забезпечує рівномірний розподіл тепла по всьому будинку, знижує теплові втрати і зменшує навантаження на сонячний колектор та інші компоненти системи. Завдяки цьому досягається значна економія енергії та підвищується довговічність обладнання. Крім того, сучасні теплоносії часто є екологічно чистими і безпечними для здоров'я людей.

В загальному теплоносії можна поділити на два види:

1) Вода є найбільш доступним теплоносієм у фінансовому плані. Також вода є найбільш екологічно чистим теплоносієм з досить високою теплоємністю, цим самим вода дозволяє ефективно зберігати і передавати тепло. Але основним недоліком води є її схильність до замерзання при низьких температурах, цим самим роблячи її використання неможливим в певних кліматичних регіонах. Також одним з основних мінусів води в ролі теплоносія є те, що вода викликає корозію металів в середині системи, щоб цього не трапилось потрібно провести спеціальну антикорозійну обробку а це в свою чергу затратно і досить довго.

2) Водні розчини антифризу (гліколі). Може бути використаний етиленгліколь або пропіленгліколь. Етиленгліколь застосовують у водних розчинах, цим самим запобігається замерзання теплоносія у зонах низької температури. Він володіє високими термостійкими властивостями, але є небезпечним для людини за рахунок токсинів, тому потрібно бути досить обачними з етиленгліколем. В свою чергу пропіленгліколь є не токсичним, що робить його більш кращим для побутових потреб. У більшості сонячних колекторах застосовується саме пропіленгліколець в вигляді теплоносія.

До основних характеристик теплоносія можна віднести теплоємність, точка замерзання і кипіння, в'язкість, схильність до корозії і екологічність і безпека.

В даному колекторі використовується пропіленглікогель так як він не замерзає при низьких температурах і володіє досить хорошими теплопровідними характеристиками.

4. Теплоізоляційний шар є досить важливим у конструкції сонячного колектора адже він знижує теплові втрати і забезпечує найбільш оптимальну ефек-

тивність роботи сонячного колектора. Як правило його розташовують на задніх і бічних стінках сонячного колектора. Його основна задача мінімізувати відтік тепла з абсорбера. Цим самим забезпечивши підтримки високої температури теплоносія навіть при несприятливих навколишніх умов.

Основна функція теплоізоляції є зниження теплових втрат. Ізоляційний шар створює перешкоду для теплопередачі з внутрішніх компонентів колектора (особливо з абсорбера) до зовнішнього середовища. Цим самим збільшується ефективність використання сконцентрованої теплової енергії і знижує втрати тепла.

Вибір матеріалу для теплоізоляційного шару залежить від кількох факторів, зокрема від температурних умов експлуатації, вартості та стійкості до вологи. Ось найпоширеніші матеріали: скловата як правило виготовляється з розплавленого скла, саме завдяки цьому скловата має надзвичайно хороші теплоізоляційні властивості і є досить доступною в економічному плані. Широко використовується в діапазоні помірних температур. Також використовується кам'яна вата, вона має досить високу стійкість до досить високих температур. Основними перевагами кам'яної вати є не горючість, вона має досить низький коефіцієнт теплопровідності, також кам'яна вата володіє надзвичайно хорошими характеристиками стійкості до впливу вологи.

Пінополістирол володіє досить низькою теплопровідністю, цим самим забезпечуючи відмінні ізоляційні властивості.

Пінополіуретанова ізоляція виділяється досить високою щільністю, гарною стійкістю до вологого середовища і низькою теплопровідністю.

Аерогелі є сучасними, новітніми матеріалами з дуже низькою теплопровідністю та надзвичайно високими ізоляційними властивостями. Їх виділяють як легкий і міцний проте дуже дорогий матеріал. Як правило аерогелі використовуються в колекторах високої ефективності або в спеціальних промислових колекторах.

Коефіцієнт теплопровідності у скловати становить 0,030, кам'яної вати 0,035, пінополістирол 0,030, аерогелі 0,012.

В плоско-вакуумному колекторі буде використовуватись скловата, так як вона володіє досить низьким коефіцієнтом теплопровідності.

5. Корпус сонячного колектора – це невід’ємний компонент, який забезпечує колектору міцність, відповідає за його захищення від механічних пошкоджень. Та запобігає потрапляння вологи в середину сонячного колектора.

Матеріал корпусу має бути стійким до перепадів температури, корозії і ультрафіолетового випромінювання.

Найчастіше використовуються наступні матеріали: алюміній являється досить поширеним матеріалом який гарантує легкість конструкції, міцність, стійкість до зовнішніх факторів таких як корозія. Алюмінієвий корпус стійкіший до змін навколишньої температури і не піддається впливу вологи. Але до недоліків можна віднести його дорожчу вартість; сталь з антикорозійним покриттям вирізняється міцністю і довговічністю. Сталь дешевша за алюміній. Але має більшу масу. Якщо це звичайна сталь, то вона піддається корозії; пластик або композит. Ці матеріали досить легкі, недорогі і володіють досить гарними теплоізоляційними властивостями, проте вони дуже вразливі до механічних пошкоджень.

До основних характеристик корпусу потрібно віднести: міцність, стійкість до корозії, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, легкість обслуговування і герметичність.

Отже після аналізу усіх можливих компонентів прототипу плоско-вакуумного сонячного колектора відбувається процес його конструювання та розрахунку особливих конструктивних параметрів колектора. Збирання відбувається поетапно крок за кроком. Самим першим етапом є виготовлення корпусу, виходячи з аналізу можливих матеріалів який був проведено вище можна з впевненістю сказати, що найкращим матеріалом для корпусу є алюміній, так як він є в міру надійним і досить легким, довжина корпусу орієнтовно становить 2000 мм, а ширина 1200 мм, задня панель корпусу закривається тонким металевим листом, яка з середини має бути покрита фольгою для відбивання тепла. Далі на дно корпусу кладеться теплоізоляційний шар з скловати. Подальшим кроком є монтаж основної частини колектора – абсорбера. Абсорбер виготовляється з міді,

так як вона є найкращим теплопровідним матеріалом, абсорбер заздалегідь покривається шаром спеціального темного анодованого селективного покриття, який збільшує ефективність колектора. Далі коли абсорбер встановили у корпус і вивели мідні трубки на вхід і вихід встановлюється скло, в даному прототипі буде встановлено антивідбивне скло, так як воно володіє найкращими пропускними здібностями. При встановленні скла по всьому контуру встановлюються високотемпературні ущільнювачі які герметизують корпус. Останнім етапом є вакуумування прототипу, адже саме завдяки шару вакууму даний прототип стає ефективнішим за класичний плоский сонячний колектор.

Головна особливість даної розробки сонячного колектора є наявність вакуумного шару, який охоплює головні компоненти, де відбувається нагрівання рідини і подальшої циркуляції в геліосистемі. Вакуум відіграє роль додаткової теплоізоляції, а це дозволяє значно знизити тепловтрати з навколишнім середовищем. В загальному, даний колектор поєднує в собі головні переваги провідних існуючих конструкцій. Тобто досить дешеву і просту конструкцію плоского колектора і ефективність трубчасто вакуумного сонячного колектора.

Додавання вакуумного шару до конструкції плоского сонячного колектора є високоефективним способом зменшити теплові втрати через конвекцію і теплове випромінювання.

Вакуум створюється між прозорим покриттям і поглинаючою пластиною, тобто у просторі між зовнішнім склом і абсорбером. Після видалення повітря з цього простору зменшуються теплові втрати через конвекцію, оскільки без газу (повітря) значно знижується здатність тепла передаватися від поглинаючої пластини до прозорого покриття.

Вакуумний шар дозволяє значно підвищити ефективність сонячного колектора, особливо в умовах низьких температур навколишнього середовища. В умовах, коли температура навколо значно нижча, вакуумна ізоляція значно знижує втрати тепла, забезпечуючи стабільне підвищення температури теплоносія.

Трубки в даному колекторі зроблені у формі мідного змійовика які розташовані рівномірно, що дозволяє ефективно використати площу колектора. Також

це дозволяє мінімізувати зони перегріву або холодні ділянки, покращуючи загальну теплову ефективність.

2.3 Розрахунок площі сонячного колектора

Необхідна площа сонячного колектора $S_{\text{потр}}$, за умови його оптимального розміщення (активна поверхня орієнтована на південь, відсутні затінення, а сонячні промені падають майже під прямим кутом), визначається на основі місяця з найнижчим рівнем сонячної інсоляції протягом усього періоду експлуатації системи [17]:

$$S_{\text{потр}} = \frac{Q_{\text{потр}}}{Q_{\text{кол}}}, \#(2.1)$$

де $Q_{\text{потр}}$ – потреба у теплій енергії Вт·год; $Q_{\text{кол}}$ – кількість теплової енергії, яку може забезпечити 1 м^2 сонячного колектора Вт·год/м².

Зазвичай потреба в гарячій воді відома заздалегідь – її визначають на основі фактичного споживання (за даними лічильника), або відповідно до встановлених нормативів. Наприклад, згідно з санітарними нормами, мінімальне добове споживання гарячої води на одну особу в житлових приміщеннях становить 65 л [17].

Отже, знаючи загальним об'єм необхідної гарячої води $V_{\text{потр}}$ у літрах, можна розрахувати загальну кількість потрібної теплової енергії $Q_{\text{потр}}$ за допомогою відповідної формули [17]:

$$Q_{\text{потр}} = C \cdot V_{\text{потр}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \#(2.2)$$

де $t_{\text{вих}}$ – температура гарячої води (вихідна температура), °С;

$t_{\text{вх}}$ – температура холодної води (вхідна температура), °С;

C - кількість енергії, яку необхідно витратити на підігрів 1 л води на 1 °С (питома теплоємність води) ($C = 4,187$ кДж/л·°С, $C = 1,163$ Вт·год/л·°С).

Для систем гарячого водопостачання температура гарячої води у крані визначається санітарними нормами і знаходиться у межах $t_{\text{вих}} = 50 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$ [17].

Середнє значення температури холодної води у водопровідній системі визначається на основі даних гідрометеорологічної служби для відповідного регіону. Якщо такі дані відсутні, температуру холодної води розраховують за спеціальним методом [17]: для опалювального періоду - $t_{\text{вх}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$; для неопалювального періоду - $t_{\text{вх}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Кількість енергії $Q_{\text{кол}}$, яку фактично здатен забезпечити сонячний колектор з урахуванням кількості сонячної енергії $Q_{\text{сон}}$ ($\text{Вт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$), доступної в даному регіоні протягом конкретного місяця, обчислюється за наступною формулою [17]:

$$Q_{\text{кол}} = Q_{\text{сон}} \cdot \eta_{\text{кол}} \cdot \eta_{\text{атм}} \cdot \eta_{\text{хмар}} \cdot \eta_{\text{втр}}, \#(2.3)$$

де $\eta_{\text{кол}}$ – коефіцієнт корисної дії сонячного колектора;

$\eta_{\text{атм}}$ – коефіцієнт прозорості атмосфери;

$\eta_{\text{хмар}}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення сонячної інсоляції хмарами;

$\eta_{\text{втр}}$ – коефіцієнт, що враховує втрати тепла при транспортуванні води від сонячного колектора до системи водопостачання.

Обсяг сонячної енергії $Q_{\text{сон}}$, доступної в конкретному регіоні, можна розрахувати на основі статистичних даних [17]:

$$Q_{\text{сон}} = Q_{\text{інс}} \cdot N_{\text{дн}}, \#(2.4)$$

де $Q_{\text{інс}}$ – рівень сонячного опромінення ($\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2/\text{день}$);

$N_{\text{дн}}$ – кількість днів роботи колектора.

Коефіцієнт прозорості атмосфери $\eta_{\text{атм}}$ коливається в межах від 0,8 до 1,0. Мінімальне значення (0,8) зазвичай приймають для великих міст, промислових зон або районів із джерелами атмосферного забруднення, такими як великі заво-

ди чи теплові електростанції. При покращенні екологічної ситуації цей коефіцієнт зростає. Для курортних місць його значення приймають рівним 1,0 [17].

Рівень теплових втрат при транспортуванні гарячої води залежить від типу системи водопостачання. Зазвичай коефіцієнт втрат тепла варіюється в межах від 0,85 до 0,98. У великих централізованих системах водопостачання теплові втрати зростають, тому в таких випадках приймають коефіцієнт близько 0,85. Чим менший рівень системи (наприклад, квартал, мікрорайон, будинок або квартира), тим менші теплові втрати і, відповідно, вище значення коефіцієнта. Для індивідуальних нагрівачів цей коефіцієнт досягає максимального значення – 0,98 [17].

Коефіцієнт корисної дії сонячного колектора $\eta_{\text{кол}}$ залежить від його конструкції та різниці температур між теплоносієм і навколишнім повітрям. Для оцінки цього показника можна застосувати середні статистичні дані, характерні для різних типів колекторів [17].

Коефіцієнт, що враховує зменшення сонячної інсоляції хмарами $\eta_{\text{хмар}}$ визначається за статистичними даними [17]:

$$\eta_{\text{хмар}} = \frac{1 \cdot N_{\text{сон}} + 0.7 \cdot N_{\text{хмар}} + 0.3 \cdot N_{\text{похм}}}{N_{\text{дн}}}, \#(2.5)$$

де $N_{\text{сон}}$, $N_{\text{хмар}}$, $N_{\text{пох}}$ – відповідно, кількість сонячних, хмарних та похмурних (з високим рівнем хмарності) днів у місяці;

$N_{\text{дн}}$ – кількість днів у місяці.

Проведемо розрахунок за вихідними даними.

Необхідної площі сонячного колектора, розташованого у місті Хмельницький, для забезпечення 195 л гарячої води на добу (побутові потреби 3 людини) у квітні. На основі статистичних даних гідрометеорологічної служби для міста Хмельницький визначаємо для квітня: $N_{\text{дн}} = 30$, $N_{\text{сон}} = 17$, $N_{\text{хмар}} = 9$, $N_{\text{пох}} = 4$, $t_{\text{пов}} = 13,6$ °C (середня температура удень, оскільки вночі сонячний колектор не

працює), $t_{\text{вх}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (опалювальний сезон, як правило, закінчується) [17].

Коефіцієнт, що враховує зменшення сонячної інсоляції хмарами $\eta_{\text{хмар}}$:

$$\eta_{\text{хмар}} = \frac{1 \cdot N_{\text{сон}} + 0.7 \cdot N_{\text{хмар}} + 0.3 \cdot N_{\text{похм}}}{N_{\text{дн}}} = \frac{1 \cdot 17 + 0.7 \cdot 9 + 0.3 \cdot 4}{30} = 0,82.$$

Різниця температури між теплоносієм та повітрям:

$$\Delta t = t_{\text{вих}} - t_{\text{пов}} = 55 - 13,6 = 41,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Визначаємо коефіцієнт корисної дії колектора за довідниковими значеннями, $\eta_{\text{кол}} = 0,75$.

Приймаємо середнє значення коефіцієнту втрат у системі $\eta_{\text{втр}} = 0,92$.

Хмельницький є досить великим містом з невеликим рівнем промисловості. Приймаємо для Хмельницького середнє значення коефіцієнта прозорості атмосфери $\eta_{\text{атм}} = 0,9$.

Для Хмельницької області рівень сонячної інсоляції у квітні $Q_{\text{інс}} = 3,85$ кВт·год/м²/день. Кількість сонячної енергії у квітні:

$$Q_{\text{сон}} = Q_{\text{інс}} \cdot N_{\text{дн}} = 3,85 \cdot 30 = 115,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2.$$

Кількість теплової енергії, яку може забезпечити сонячний колектор:

$$Q_{\text{кол}} = 115,5 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 0,82 \cdot 0,92 = 58,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2.$$

Загальна кількість води, яку потрібно підігріти:

$$Q_{\text{потр}} = V_{\text{доб}} \cdot V_{\text{потр}} = 195 \cdot 30 = 5850 \text{ л}.$$

Кількість енергії, яку необхідно витратити на підігрів води за місяць:

$$Q_{\text{потр}} = C \cdot V_{\text{потр}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}) = 1,163 \cdot 5850 \cdot (55 - 5) = 340 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Необхідна площа сонячного колектора:

$$S_{\text{потр}} = \frac{Q_{\text{потр}}}{Q_{\text{кол}}} = \frac{340}{58,8} = 5,8 \text{ м}^2.$$

Отже, щоб забезпечити трьох людей гарячою водою потрібно плоско-вакуумний колектор площею 5,8 м². Можна зробити висновок, що для забезпечення гарячою водою однієї людини, потрібен колектор площею 1,9 м². У розробленому колекторі площа 2,4 м², так як такі габарити є оптимальними для забезпечення однієї людини гарячою водою.

2.4 Розрахунок оптимального кроку між трубками сонячного колектора

За допомогою цього розрахунку можна визначити оптимальний крок між трубками в змієвиковому розташуванні для сонячного колектора в якому використовується пропіленгліколь в ролі теплоносія. Підбір оптимального кроку між трубками відіграє надзвичайну критичну роль, оскільки правильність підбраного кроку на пряму впливає на ефективність теплопередачі і гідравлічні характеристики системи.

Оптимальний крок між трубками в змієвиковому розміщенні можна визначити за допомогою формули, яка включає в себе теплопровідність матеріалу трубок, коефіцієнт тепловіддачі та довжину сонячного колектора.

$$S = \sqrt{\frac{2 \cdot L_{\text{Колектора}} \cdot k}{h}}, \#(2.6)$$

де S – оптимальний крок між витками змієвика, мм;

$L_{\text{Колектора}}$ – довжина колектора, м;

k – теплопровідність матеріалу трубки (мідь: 401 Вт/м · К);

h - коефіцієнт тепловіддачі від трубки до теплоносія, Вт/м² · К, для пропіленгліколю значення h може бути від 1000 до 1500 Вт/м² · К.

Для розрахунку дано наступні дані: $L_{\text{Колектора}} = 2000$ мм = 2м; $k = 401$ Вт/м · К; $h = 1000 \dots 1500$ Вт/м² · К.

Розрахунок оптимального кроку для $h = 1000$ Вт/м² · К.

$$S = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 401}{1000}} = \sqrt{\frac{1604}{1000}} = \sqrt{1.604} = 1.267 \text{ м} = 126.7 \text{ мм.}$$

Розрахунок оптимального кроку для $h = 1500$ Вт/м² · К.

$$S = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 401}{1500}} = \sqrt{\frac{1604}{1500}} = \sqrt{1.069} = 1.034 \text{ м} = 103.4 \text{ мм.}$$

Отже, розрахунки показують, що при коефіцієнті $h = 1000$ Вт/м² · К, крок між трубками має бути не менше 126.7 мм, а при $h = 1500$ Вт/м² · К крок має бути не менше 103.4 мм. Це свідчить про те, що чим нищий коефіцієнт тепловіддачі тим більший має бути крок.

В запропонованому колекторі крок між трубками крок становить 150 мм цим самим забезпечуючи максимальну ефективність і мінімізуються ризики перегріву.

2.5 Розрахунок мінімального радіусу згину трубки для змієвика колектора

Розрахунок радіуса згину змієвика в плоско-вакуумному сонячному колек-

торі є дуже важливим, оскільки він безпосередньо впливає на надійність, довговічність та ефективність роботи системи. Занадто малий радіус згину може спричинити механічні пошкодження трубки, її деформацію, залом або плющення, що призводять до зменшення прохідного перерізу й ускладнення циркуляції теплоносія. Це, у свою чергу, викликає збільшення гідравлічного опору, що знижує ефективність колектора. Також надмірне механічне напруження в місцях згинів підвищує ризики утворення тріщин чи протікань, особливо при перепадаї температур або тиску. Головною метою даного розрахунку є визначення допустимого мінімального радіуса згину для мідної трубки, який зможе теоретично забезпечити їхню цілісність і працездатність.

Для розрахунку мінімального радіусу згину трубки можна використати формулу, яка включає в себе діаметр трубки, коефіцієнт безпеки, матеріал трубки і товщину стінки трубки.

Мінімальний радіус згину R_{min} визначається залежно від діаметра трубки $d_{\text{трубки}}$, який становить 14 мм, коефіцієнта безпеки для міді $k=3$.

$$R_{min} = k \cdot d_{\text{трубки}} \cdot \#(2.7)$$

$$R_{min} = 3 \cdot 14 = 42 \text{ мм.}$$

Отже, розрахунок показав, що для нормального функціонування системи радіус згину має бути не менший ніж 42 мм.

В загальних рекомендаціях для практичних потреб, та враховуючи можливих варіацій в умовах експлуатації (температурні коливання, механічні навантаження), рекомендують використовувати більший радіус згину. Це дозволить мінімізувати ризики утворень мікротріщин чи не бажаних деформацій.

В даному випадку для забезпечення безпеки і ефективності роботи сонячного колектора радіус згину становить 80 мм. Обраний радіус дозволяє уникну-

ти пошкоджень трубок і забезпечує їх довговічну роботу при кроку 150 мм між трубками.

Загальний вигляд плоско-вакуумного колектора показаний на рисунку 2.2.

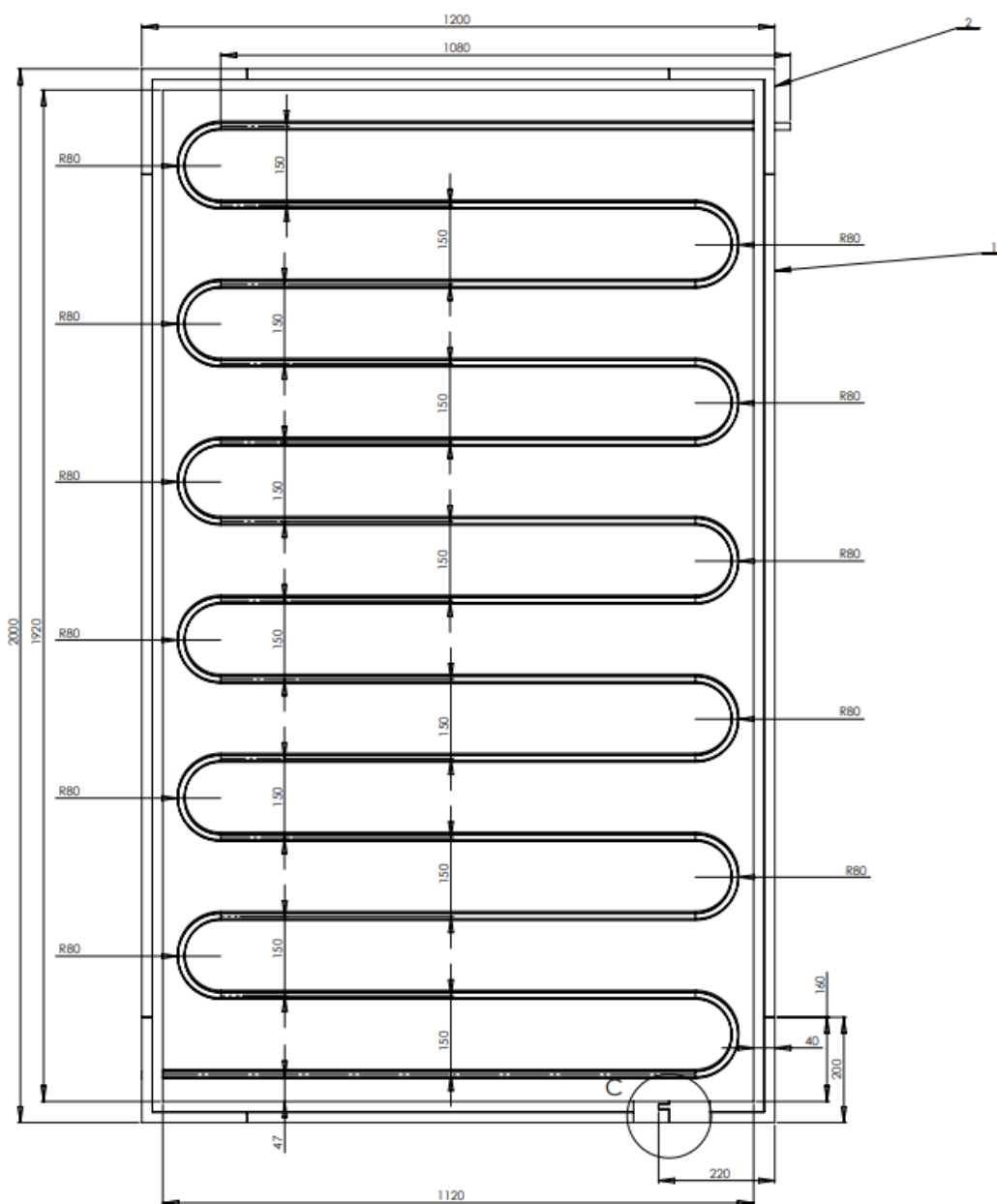


Рисунок 2.2 – Плоско-вакуумний колектор

Вид загальний плоско-вакуумного сонячного колектора показаний у графічній частині [БРМА 25.00.00.000 ВЗ].

2.6 Розробка структурної схеми роботи геліосистеми з плоско-вакуумним колектором

На рисунку 2.3 показана принципова схема роботи геліосистеми з використанням удосконаленого сонячного колектора.

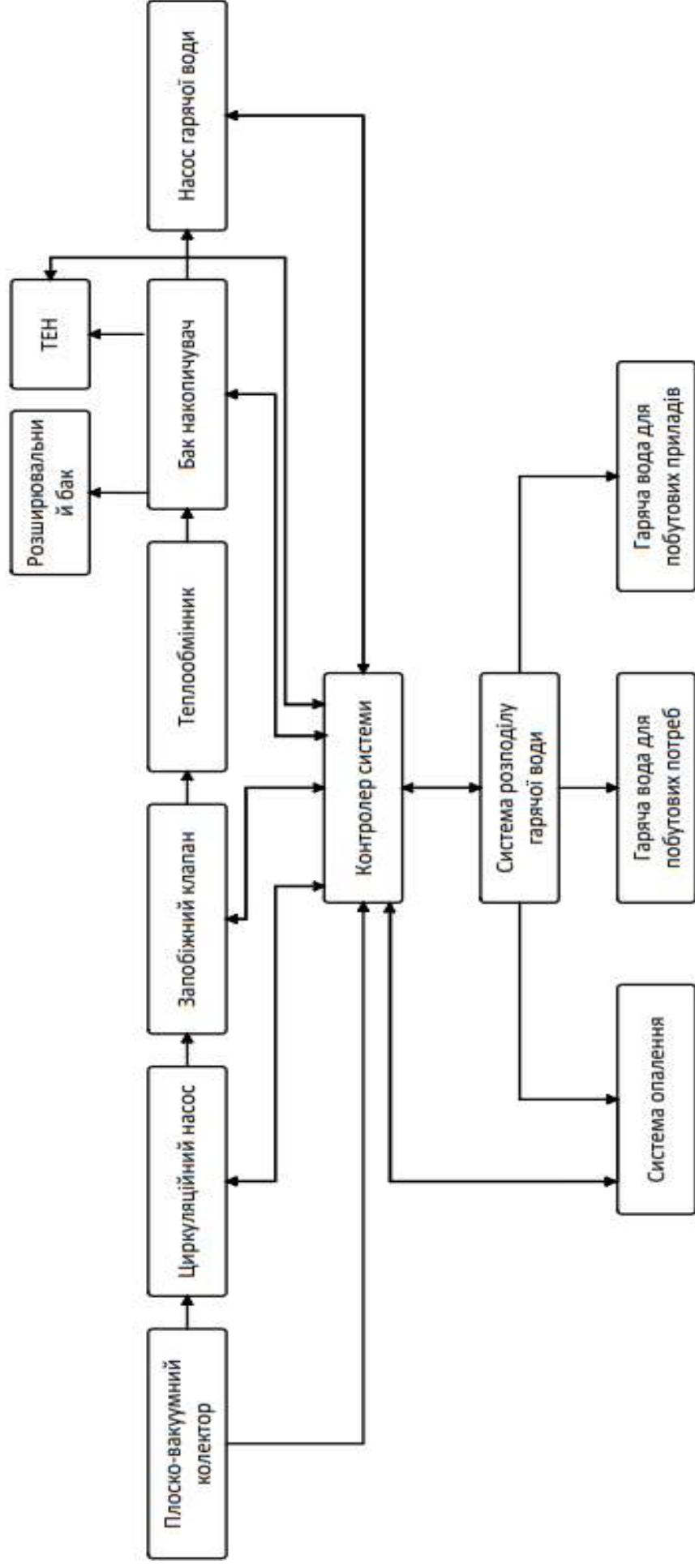


Рисунок 2.3 – Принципова схема роботи геосистеми

Принципова схема роботи геліосистеми показує роботу геліоустановки, яка створює нагрів води для побутових приладів і системи опалення. Весь цикл роботи розпочинається сонячним колектором, як правило його розташовують на даху або вбудовують у кришу, він поглинає сонячне випромінення за рахунок абсорбера і нагріває воду, тобто перетворює енергію сонця в теплову енергію, яка передається за допомогою теплоносія який циркулює всередині контура.

Далі розпочинає роботу другий компонент принципової схеми, а саме циркуляційний насос. Циркуляційний насос потрібний для перекачування теплоносія від сонячного колектора до інших елементів даної системи, він приводиться в роботу коли температура у колекторі перевищує температуру в баку накопичувачі, або запуску відбувається при необхідності.

Запобіжний клапан виконує роль захисного механізму, адже в разі накопичення сильного тиску він просто автоматично спускає його тим самим запобігає поломці або повного виведення з ладу системи. Він спрацьовує у разі перевищення безпечного рівня тиску.

В подальшому теплообмінник який циркулює в закритому контурі передає тепло від теплоносія до води, яка знаходиться в накопичувальному баку, що дозволяє зберігати гарячу воду для подальшого побутового використання.

Бак накопичувач виконує функцію ємності для гарячої води. Також до нього підключається додаткові джерела тепла і захисту, такі як розширювальний бак (РБ) і ТЕН (електричний нагрівач), які приводяться в дію в разі необхідності. Розширювальний бак потрібний для забезпечення нормального тиску, в разі перевищення рівня норми тиску надлишковий тиск йде в розширювальний бак цим самим мінімізуються можливі поломки в середині накопичуючого баку. ТЕН застосовується для підігріву води яка знаходиться в середині основного бака. Він вмикається автоматично коли температура в баку падає до мінімального значення.

Насос гарячого водопостачання використовується для забезпечення розподілу гарячої води з бака накопичувача до системи опалення і побутових систем.

Головним компонентом даної системи є контролер системи, до нього підключені усі складові такі як сонячний колектор (вимірює температуру в середині колектора і визначає чи справний колектор), циркуляційний нас (вмикає і вимикає його), запобіжний клапан (сигналізує про несправність, виводячи помилку на дисплей), бак накопичувач (за допомогою датчиків вимірює температуру і рівень води), ТЕН (якщо в баку не достатня температура води то вмикає ТЕН). В загальному він повністю контролює систему і відповідає за правильність її роботи.

Останнім компонентом системи є система розподілу гарячої води. Система розподілу гарячого водопостачання забезпечує розподіл гарячої води з баку накопичувача до різних споживачів. Таких як побутові прилади (автоматичні пральні машини, посудомийки та інші), побутові потреби (гаряча вода у кранах), опалення (радіаторне або тепла підлога).

Таким чином, дана геліосистема найбільш ефективно використовує енергію сонячного випромінювання для забезпечення будинку гарячим водопостачанням і теплом. Контролер забезпечує повне автоматичне керування усіма процесами роботи системи. Також контролер може програмуватись дистанційно за допомогою новітніх технологій.

Використовується циркуляційний насос Aruna RM 25-6-180 (рис 2.4) [14].

Циркуляційний насос Aruna RM 25-6-180 з мокрим ротором є сучасним і надійним пристроєм, призначеним для забезпечення ефективності циркуляції теплоносія в системах опалення, теплої підлоги та геліосистемах.

Насос Aruna RM 25-6-180 вирізняється надійною роботою, економічним споживанням енергії та зручністю експлуатації.

Пристрій призначений для циркуляції нагрітої рідини від колектора до теплообмінника. Максимальний напір становить 6 метрів, потужність двигуна – 100 Вт, сила струму – 5,8 А. З'єднання різьбове, монтажна довжина – 180 мм, максимальний робочий тиск становить 10 бар. Електроживлення здійснюється від мережі 230 В, одна фаза, частота струму – 50 Гц. Передбачене ступінчасте регулювання швидкості з трьома режимами роботи. Клас захисту IP44, клас ізо-

ляції – Н. Монтаж проводиться горизонтально. Ротор насоса є мокрим, керування механічне. Корпус насоса виготовлений з чавуну, а робоче колесо з полімерного матеріалу [14].



Рисунок 2.4 – Циркуляційний насос Aruna RM 25-6-180

Також використовується запобіжний клапан Caleffi 253. Даний клапан зображений на рисунок 2.5.



Рисунок 2.5 - Запобіжний клапан Caleffi 253

Запобіжні клапани серії 253 від компанії Caleffi призначені для регулювання тиску в первинних контурах сонячних систем опалення. Після досягнення встановленого тиску спрацьовує клапан, випускаючи надлишкову рідину в атмосферу, що запобігає перевищенню критичного тиску в системі та захищає соня-

чні колектори й інші елементи від пошкоджень. Клапани цієї серії розроблені та сертифіковані для роботи при високих температурах, а також сумісні з теплоносіями на основі гліколю [15]. Його робоча температура становить від -30 до 160 °С.

Одна з основних частин геліосистеми є акумуляційний бак акумуляційний бак 300 літрів Eldom 72282SP. Даний бак має вбудований ТЕН для підігріву води (рис 2.6).



Рисунок 2.6 - Акумуляційний бак 300 літрів Eldom 72282SP

В даному баку стоїть накопичувальний тип водонагрівача, непрямий спосіб нагріву, встановлений ТЕН з номінальною потужністю 6кВт, бак розрахований на 300 літрів, підлоговий спосіб установки, підключення бічне, внутрішнє покриття з емалі, вага 75 кг.

Управління всіма елементами геліосистеми здійснює контролер, основою якого є забезпечення стабільної та безпечної роботи системи. У разі виникнення небезпечної ситуації, що може призвести до її пошкодження, контролер автоматично відключає систему, тим самим запобігаючи поломці. У цій установці використовується контролер для геліосистем Altek SR1568[16].

Сонячний колектор SR1568 є електронним комутаційним пристроєм, призначеним для управління виконавчими елементами геліосистеми, такими як насос, триходовий клапан, ТЕН та інші. Його основне завдання – забезпечити оптимальне функціонування системи. Завдяки наявності 23 запрограмованих схем, контролер універсально підходить для більшості типів геліосистем. Крім того, SR1568 підтримує функцію забезпечення робочих параметрів на карту пам'яті з подальшою можливістю перегляду й аналізу даних на персональному комп'ютері [16]. Даний контролер зображений на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 - Контролер для геліосистем Altek SR1568

Перевагою даного контролера є його кількість запрограмованих схем – 23. Кількість температурних датчиків 8. Також є 7 роз'ємів для пристроїв керування, три штуки твердотільних реле (1А), є один релейний вихід.

Гідравлічна схема геліосистеми показана на рисунку 2.8.

На рисунку 2.8 зображено гідравлічна схема двоконтурної системи теплопостачання. Первинний контур, в якому циркулює теплоносій, складається з основних компонентів: 1 – сонячний колектор; 5 – циркуляційний насос; 3 – бак накопичувач з вбудованим теплообмінником. Вторинний контур представлений водяною системою всередині бака-акумулятора, де через теплообмінник вода нагрівається за рахунок теплової енергії, накопиченої в теплоносії першого контуру.

Тепло, яке поглинає теплоносієм від сонячного випромінювання, передається воді через теплообмінник 8, розташований у баку-акумуляторі. Завдяки природній конвенції нагріта вода піднімається вгору, звідки і здійснюється її забір. Коли температура води у верхній частині бака перевищує задане значення, встановлене на терморегуляторі, система керування 2, вимикає насос 5.

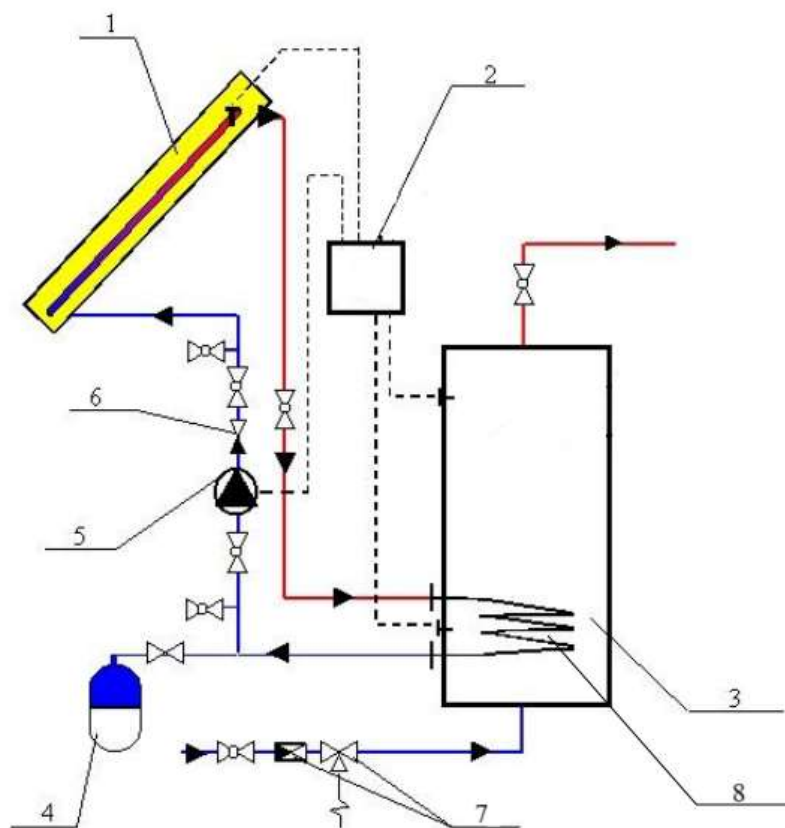


Рисунок 2.8 – Гідравлічна схема геліосистеми

Щоб уникнути підвищення тиску в замкненому контурі, в системі встановлюється розширювальний бак 4.

Висновок до другого розділу

В ході виконання другого розділу була розроблена структурна схема роботи плоско-вакуумного колектора, яка показує процес роботи колектора. В подальшому, було розроблено сам плоско-вакуумний колектор, який за допомогою вакуумного шару підвищив свою ефективність. Далі було проведено розрахунок

площі сонячного колектора, який показує, що колектор площею 2,4 м², є оптимальним рішенням, для одної людини. Також було розрахований оптимальний крок між трубками сонячного колектора, було розраховано мінімальний радіус згину трубки змієвика. В кінці було розроблено схему роботи геліосистеми яка використовує плоско-вакуумний сонячний колектор.

3 Розрахунки, що підтверджують працездатність сонячного колектора та геліосистеми

3.1 Розрахунок ефективності роботи сонячної геліосистеми гарячого водопостачання з використанням плоско-вакуумного сонячного колектора

Для розрахунку потрібно взяти до уваги, що геліосистема включає в себе 1 прототип плоско-вакуумного сонячного колектора, площа якого складає $2,4 \text{ м}^2$, який монтується під кутом 45 градусів. Система розташована у Хмельницькій області.

Річна сонячна енергія, яка потрапляє на колектор розраховується за формулою:

$$Q_{\text{сон}} = E_{\text{рік}} \cdot A = 1311 \cdot 2,4 = 3146,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік}, \#(3.1)$$

де $E_{\text{рік}}$ – річне сонячне випромінювання, береться з таблиці 3.1, $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2/\text{рік}$;
 A – площа сонячного колектора, м^2 .

Корисна теплова енергія на виході геліосистеми:

$$Q_{\text{корисна}} = Q_{\text{сон}} \cdot \eta_{\text{системи}} = 3146,4 \cdot 0,56 = 1761,98 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік}, \#(3.2)$$

де $\eta_{\text{системи}}$ – ККД системи.

Розрахунок кількості нагрітої води за рік. Задаємось параметром, що для гарячого водопостачання температура води нагрівається з 10°C до 50°C ($\Delta T=40^\circ\text{C}$), тоді:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \#(3.3)$$

де Q – теплова енергія, Дж; m – маса води, кг; $c=4186$ – питома теплопровідність.

Переводимо 1761,98 кВт · год у Дж:

$$1768,98 \cdot 3,6 \cdot 10^6 = 6,34 \cdot 10^9.$$

З формули 3.3 знаходимо m :

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{6,34 \cdot 10^9}{4186 \cdot 40} = 37864 \text{ літ/рік} = 104 \text{ літ/день.} \#(3.4)$$

Отже, виходячи з даних обрахунків можна зробити висновок, що дана геоліосистема може забезпечити 104 літра гарячої води на день.

3.2 Розрахунок внутрішнього тиску в трубці сонячного колектора

Визначення тиску, який зможе витримати трубка є дуже важливим аспектом. Адже саме цей розрахунок зможе показати чи витримає трубка навантаження.

Для розрахунку дано наступні параметри: допустиме напруження для міді: $\sigma_{max} = 210 \text{ МПа} = 210 \cdot 10^6 \text{ Па}$; діаметр трубки дорівнює 14 мм або 0.014 м; радіус трубки 7 мм; товщина стінки трубки становить 2 мм.

Згідно з класичними механічними розрахунками для труб під внутрішнім тиском, напруження в стінці трубки визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{t}, \#(3.5)$$

де P – внутрішній тиск, Па; r – радіус трубки, м; t – товщина стінки трубки, м; σ – допустиме напруження в матеріалі, Па.

Для визначення внутрішнього тиску P , розв'язується рівняння для P :

$$P = \frac{210 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-3}} = 60 \cdot 10^6 \text{ Па} = 60 \text{ МПа.}$$

Розрахований тиск, який може витримати трубка діаметром 14 мм і товщиною стінки 2 мм, становить 60 МПа.

3.3 Розрахунок ефективності поглинання сонячного випромінювання плоско-вакуумним колектором

Розрахунок проводиться з урахуванням місця розташування колектора, тип скла і наявність шару вакуума. Розташовується сонячний колектор у Хмельницькій області, скло антивідбивне.

Уся кількість енергії сонячного випромінювання, яка надходить до абсорбера, визначається за формулою:

$$Q_{\text{поглинене}} = G \cdot \tau \cdot a, \#(3.6)$$

де $Q_{\text{поглинене}}$ – це кількість сонячної енергії, поглинутої абсорбером, Вт/м²; G – інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальну площину, Вт/м²; τ – коефіцієнт пропускання антивідбивного скла; a – коефіцієнт поглинання селективного покриття абсорбера.

Враховуючи кліматичні данні, для Хмельницької області середнє значення інсоляції у літній день сягає 800 Вт/м², світло пропускна здатність антивідбивного скла складає 0,95, коефіцієнт поглинання селективного покриття абсорбера складає 0,93. Підставивши значення у формулу 3.4 отримаємо:

$$Q_{\text{поглинене}} = 800 \cdot 0,95 \cdot 0,93 = 706,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Отже, за сприятливих умов поглинена теплова потужність для Хмельницької області становить $706,8 \text{ Вт/м}^2$.

3.4 Розрахунок передачі випромінювання через вакуум, розрахунок тепловтрат

У плоско-вакуумному сонячному колекторі основні тепловтрати відбуваються через випромінювання, оскільки вакуумний прошарок між абсорбером і прозорим покриттям ефективно усуває теплопередачу шляхом конвекції та теплопровідності. У даному пункті здійснено оцінку тепловтрат колектора, що експлуатується в кліматичних умовах Хмельницької області України, площа абсорбера становить $2,1 \text{ м}^2$, температуру абсорбера приймаємо $2,395 \cdot 10^{10}$, температуру скла приймаємо $8,462 \cdot 10^9$.

Оскільки тепловтрати в умовах вакууму відбуваються переважно шляхом випромінювання, розрахунок теплових втрат $Q_{\text{вип}}$ виконується за формулою Стефана–Больцмана для двох протистоячих поверхонь:

$$Q_{\text{вип}} = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon_{\text{еф випр}} \cdot (T_1^4 \cdot T_2^4), \#(3.7)$$

де σ – стала Стефана-Больцмана; A – площа абсорбера, м^2 ; T_1^4 – температура абсорбера, К; T_2^4 – температура скла/оточення, К; $\varepsilon_{\text{еф випр}}$ - ефективна випромінювальна здатність системи "абсорбер–скло", $\varepsilon_{\text{еф випр}}$ визначається за формулою:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{еф випр}}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1, \#(3.8)$$

де ε_1 - випромінювальна здатність абсорбера (селективне покриття), $\varepsilon_1 = 0,05$; ε_2 - випромінювальна здатність скла (антивідбивне покриття), $\varepsilon_2 = 0,88$.

Ефективна випромінювальна здатність:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{эф випр}}} = \frac{1}{0.05} + \frac{1}{0.88} - 1 = 20 + 1.136 - 1 = 20.136,$$

$$\varepsilon_{\text{эф випр}} = \frac{1}{20.136} = 0.0497.$$

При хорошому випромінюванні теоретично температура абсорбера буде становити $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373\text{ K}$, температура скла має бути $25\text{ }^{\circ}\text{C} = 298\text{ K}$.

Розрахунок тепловтрат відбувається за формулою 3.5:

$$Q_{\text{вип}} = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 2.1 \cdot 0.0497 \cdot 1.1496 \cdot 10^{10} = 67.9\text{ Вт.}$$

Тепловтрати через випромінювання в плоско-вакуумному сонячному колекторі за наведених умов становлять приблизно 68 Вт. Це свідчить про високу ефективність вакуумного ізоляційного шару, який істотно знижує загальні втрати теплоти порівняно з традиційними плоскими колекторами без вакууму.

3.5 Розрахунок вихідної теплової енергії для плоско-вакуумного сонячного колектора та плоского сонячного колектора

Щоб розрахувати теплову енергію задаємось наступними теоретичними даними: колектори розміщені у Хмельницькій області, площа колекторів становить $2,4\text{ м}^2$, обидва колектори використовують скло з антивідбивним покриттям, обидва колектора монтуються з кутом 45° . Середня сумарна сонячна радіація (G) для Хмельницької області показана в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Середня сумарна сонячна радіація

Місяць	$G_{\text{гориз}}$	Корекція на кут 45°	G , кВт · год/м ²
Січень	25	1,4	35
Лютий	50	1,3	65

Березень	90	1,2	108
Квітень	130	1,1	143

Продовження таблиці 3.1

Місяць	$G_{\text{гориз}}$	Корекція на кут 45°	G , кВт · год/м ²
Травень	170	1,0	170
Червень	180	0,95	171
Липень	180	0,95	171
Серпень	160	1,0	160
Вересень	120	1,05	126
Жовтень	80	1,1	88
Листопад	40	1,2	48
Грудень	20	1,3	26

Розрахунок теплової енергії (Q) для прототипу плоско-вакуумного сонячного колектора:

$$Q = G \cdot \eta \cdot A, \#(3.9)$$

де G – сонячна радіація на площу колектора, кВт · год/м², береться з таблиці 3.1; η – коефіцієнт корисної дії плоско-вакуумного сонячного колектора, береться з таблиці 3.2; A – площа колектора, м², $A = 2,4$ м².

Обраховані дані відповідно до формули (3.7) заносяться до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Обраховані дані для прототипу плоско-вакуумного колектора

Місяць	G , кВт · год/м ²	η	Q , кВт · год
Січень	35	0,75	63
Лютий	65	0,73	113,9

Березень	108	0,70	181,4
Квітень	143	0,68	233
Травень	170	0,65	265,2

Продовження таблиці 3.2

Місяць	G , кВт · год/м ²	η	Q , кВт · год
Червень	171	0,65	267,1
Липень	171	0,65	267,1
Серпень	160	0,65	249,6
Вересень	126	0,67	202,5
Жовтень	88	0,70	147,8
Листопад	48	0,73	84
Грудень	26	0,75	46,8

Виходячи з таблиці 3.2 можна дійти висновку, що річна вироблена теплова енергія становить 2121 кВт · год, що є досить суттєвим показником.

Розрахунок плоского сонячного колектора відбувається за такою самою методикою і оброблені дані заносяться у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Обраховані дані для простого плоского сонячного колектора

Місяць	G , кВт · год/м ²	η	Q , кВт · год
Січень	35	0,5	42
Лютий	65	0,52	81,1
Березень	108	0,55	142,6
Квітень	143	0,58	199
Травень	170	0,62	253,4
Червень	171	0,65	267,1
Липень	171	0,65	267,1

Серпень	160	0,62	238,1
Вересень	126	0,58	175,4
Жовтень	88	0,55	116,2
Листопад	48	0,5	57,6
Грудень	26	0,45	28,1

Виходячи з таблиці 3.3 можна дійти висновку, що річна вироблена теплова енергія становить 1870 кВт · год, що є гіршим результатом за розробку.

На основі розрахованих значень будується графік залежності теплової енергії від місяця для обидвох сонячних колекторів.

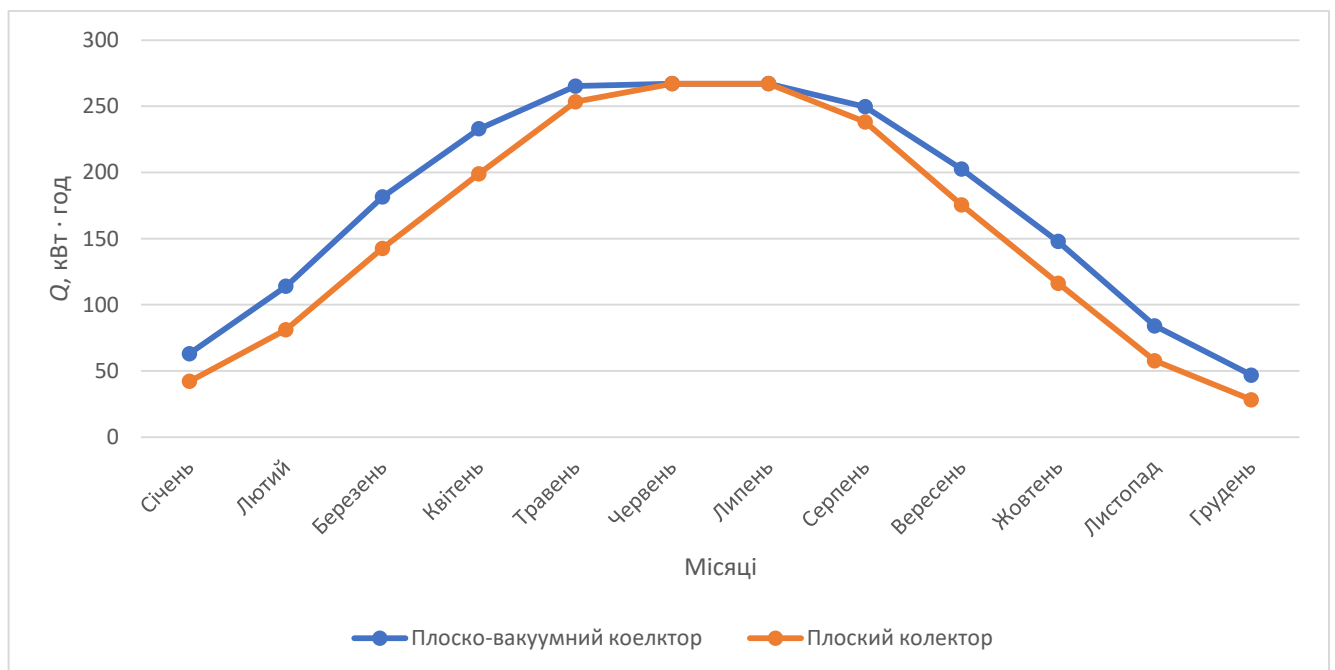


Рисунок 3.1 – Порівняння вихідної теплової енергії для плоско-вакуумного і плоского сонячного колектора

Отже, аналізуючи даний розрахунок, можна зробити висновок, що моя розробка є ефективнішою за плоский сонячний колектор.

Висновок до третього розділу

В ході виконання третього розділу було зроблено розрахунок ефективності

роботи сонячної геліосистеми гарячого водопостачання з використанням плоско-вакуумного сонячного колектора який показав, що дана система може виробити 104 літра гарячої води на день. Також був зроблений розрахунок внутрішнього тиску в мідній трубці плоско-вакуумного сонячного колектора який показав, що трубка може витримати тис в 60 МПа, що більш чим достатньо для нормальної експлуатації в колекторі. Було розраховано ефективності поглинання сонячного випромінювання плоско-вакуумним колектором, який показує, що ефективність поглинання сонячного випромінювання абсорбером становить $706,8 \text{ Вт/м}^2$, що є досить хорошим результатом. Далі був розрахунок передачі випромінювання через вакуум, розрахунок тепловтрат, який показує, що тепловтрати через випромінювання в плоско-вакуумному сонячному колекторі становлять приблизно 68 Вт.

Висновки

Проведено огляд та аналіз існуючих технологій та технологічних рішень сонячних колекторів та геліосистем. Було проаналізовано сонячну енергію та можливі способи її використання, особливості роботи сонячних колекторів та геліосистем. Було оглянуто класифікацію сонячних колекторів та геліосистем. Також було зроблено порівняння плоских та вакуумних колекторів в ході якого було зроблено висновок, що обидва колектора є досить хороші і потрібно підбрати колектор виходячи з поставлених цілей.

В подальшому було розроблено структурна схема роботи плоско-вакуумного колектора, яка показує процес роботи колектора. В подальшому, було розроблено сам плоско-вакуумний колектор, який за допомогою вакуумного шару підвищив свою ефективність. Далі було проведено розрахунок площі сонячного колектора, який показує, що колектор площею $2,4 \text{ м}^2$, є оптимальним рішенням, для одної людини. Також було розрахований оптимальний крок між трубками сонячного колектора, було розраховано мінімальний радіус згину трубки змієвика. В кінці було розроблено схему роботи геліосистеми яка використовує плоско-вакуумний сонячний колектор.

В кінці було зроблено розрахунки роботи сонячної геліосистеми гарячого водопостачання з використанням плоско-вакуумного колектора який показав, що геліосистема може забезпечити 104 літра гарячої води на день. Також був зроблений розрахунок внутрішнього тиску в мідній трубці плоско-вакуумного сонячного колектора який показав, що трубка може витримати тис в 60 МПа чого більш чим достатньо для нормальної експлуатації в колекторі. Було розраховано ефективності поглинання сонячного випромінювання плоско-вакуумним колектором, який показує, що ефективність поглинання сонячного випромінювання абсорбером становить $706,8 \text{ Вт/м}^2$. В самому кінці був зроблений порівняльний розрахунок ефективності мого прототипу в порівнянні з простим плоским сонячним колектором, цей розрахунок показав, що мій прототип ефективніший на 13-20% від простого колектора, що є досить суттєвим.

Перелік джерел посилань

1. Сонячна теплоенергетика : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньої програми – «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, 2020. – 88 с.
2. Р. Титко Відновлювальні Джерела Енергії (досвід Польщі для України) : навч. посібник / Р. Титко, В. М. Калініченко. – Варшава : OWG, 2010. – 530 с.
3. Сонячна енергія. Чому це вигідно для України? [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://teplovam.ua/soniachna-enerhiia-chomu-tse-vyhidno-dlia-ukrainy/>
4. Що таке сонячний колектор | Види і принцип роботи [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://xn--e1aamjfh.com.ua/sonjachni-kolektory-pryncyp-roboty>
5. Що таке геліосистема: основні поняття, типи, призначення та переваги [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://www.solargarden.com.ua/geliosystemy-opys-ta-osnovni-vidminnosti-vid-sonyachnyh-elektrosystem/>
6. Сонячний колектор: ефективність [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://solarsoul.net/uk/sonyachnij-kolektor-efektivnist>
7. Що таке інсоляція? [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://alternative-energy.com.ua/uk/shho-take-insolyacziya/>
8. Плоский сонячний колектор [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://karno.ua/ua/sistemy-solnechnogo-nagreva-vody/ploskii-solnechnyi-kollektor/>
9. Плоский сонячний колектор: загальні дані [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://solarsoul.net/uk/ploskij-sonyachnij-kolektor-zagalni-dani>
10. Абсорбер сонячного колектора [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://solarsoul.net/uk/absorber-sonyachnogo-kolektora>

11. Вакуумний сонячний колектор: класифікація [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://solarsoul.net/uk/vakuumnij-sonyachnij-kolektor-klasifikaciya>

12. Вакуумний і плоский сонячний колектор: який краще [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://grand-overon.in.ua/alternativnaya-energetika-stati/vakuumniy-ploskiy-sonyachnij-kolektor-yakiy-krasche-uk.html>

13. Лабораторна робота дослідження роботи всесезонної сонячної геліосистеми гарячого водопостачання з використанням вакуумного колектора, який краще [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/446140/mod_resource/content/1

14. Циркуляційний насос Aruna RM 25-6-180 [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://vencon.ua/ua/products/aruna-rm-25-6-180>

15. Запобіжний клапан для геліосистем Caleffi 253 180 [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: https://voltar.com.ua/ua/shop/predohranitelnyy-klapan-dlia-geliosistem-caleffi-253.html?srsId=AfmBOorbzEMUmIm6icqIXDZXNF2IKRXou_buGXXktayzeLvIaN5PW7_

16. Контролер для геліосистем Altek SR1568 [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://magus.com.ua/ua/p1160768977-kontroller-dlya-geliosistem.html>

17. Лабораторно-практична робота, дослідження альтернативних пристроїв гарячого водопостачання [електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/446139/mod_resource/content/1

18. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії. Лабораторний практикум з дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О. С. Поліщук, М. Є. Скиба, С. П. Лісевич, А. О. Поліщук, С. В. Каретний, О. В. Вишинський. Хмельницький: ХНУ, 2022. 185 с.

19. Відновлювальні джерела енергії / за заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ : Інститут відновлювальної енергетики НАНУ , 2020. – 392 с.

Додатки