

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

Розробка сонячного концентратора для нагрівання води

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ЕТ-21


Підпис

Глега Д.В.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

старший викладач
Лісевич С.П.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

к.т.н., доц. Тимощук
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

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

1 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

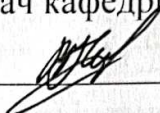
Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2 . 06 . 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Глега Дмитро Васильович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка сонячного концентратора для нагрівання води**

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 сонячних концентраторів та теплових систем для нагрівання води, технологічні та технічні концентраторів.**

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

1 Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку сонячних теплових систем для нагрівання води

2 Теоретичні основи і методи розрахунку концентратора для нагрівання води

3 Конструктивна розробка та моделювання системи нагріву води

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

Лист 1. Види сонячних концентраторів та сонячних теплових систем. Документ оглядовий (A1). **Лист 2.** Аналітичні розрахунки геометричних параметрів концентратора. Документ технологічний. (A1). **Лист 3.** Сонячний концентратор для нагрівання води. Структурна схема (A1). **Лист 4.** Сонячний концентратор для нагрівання води. Гідравлічна схема. (A1). **Лист 5.** Сонячний концентратор для нагрівання води. Вид загальний (A1)

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 | Примітки |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку сонячних теплових систем для нагрівання води | 05.05.25 р. | |
| 2 Теоретичні основи і методи розрахунку концентратора для нагрівання води | 20.05.25 р. | |
| 3 Конструктивна розробка та моделювання системи нагріву води | 10.06.25 р. | |

Студент


Підпис

Глега Д.В.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Лісевич С.П.
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».
Освітня програма «Електропобутова техніка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Глега Дмитро Васильович
2. Тема бакалаврської роботи Розробка сонячного концентратора для нагрівання води
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____
4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень ___ арк., сторінок записки ___
5. Ця робота присвячена розробці сонячного концентратора для нагрівання води.

У роботі описується розробка сонячного концентратора для нагрівання води нової конструкції, де використовується вакуумні трубки для збільшення ефективності системи.

В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам.

В першому розділі проведено огляд принципів роботи та класифікації сонячних теплових систем. Встановлено переваги параболоциліндричних концентраторів у поєднанні з вакуумними трубками як ефективного рішення для середньотемпературного нагріву води.

В другому розділі виконано геометричні та теплотехнічні розрахунки параболоциліндричного концентратора. Визначено фокусну відстань, параметри кривизни, оптичну ефективність та потужність системи на основі теплового балансу.

В третьому розділі розроблено конструкцію концентратора з урахуванням технічних вимог, підібрано матеріали для каркаса та дзеркальної поверхні. Проведено 3D-моделювання та обґрунтовано розміщення вакуумних трубок у фокусі параболі для максимального теплового ефекту.

Розроблена конструкція сонячного концентратора дозволяє ефективно перетворювати сонячну енергію в теплову. Результати теоретичних і конструктивних розрахунків підтверджують доцільність використання параболоциліндричної форми дзеркала та вакуумних трубок для підвищення продуктивності системи водонагріву.

Підпис студента 

«2» 06 2025 р.


РІШЕННЯ ЕК

Протокол 7 від «28» 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 4/5

Рекомендації ЕК впровадження в навчальний процес




Особливі відмітки - _____

Технічний секретар 

«28» 06 2025 р.

ЗМІСТ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ | 6 |
| 1 Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку сонячних теплових систем для нагрівання води | 7 |
| 1.1. Принципи роботи сонячних теплових установок | 7 |
| 1.2. Класифікація сонячних концентраторів..... | 8 |
| 1.3. Особливості параболоциліндричних концентраторів..... | 15 |
| 1.4. Застосування вакуумних трубок у геліосистемах для нагрівання води. | 18 |
| 2 Теоретичні основи і методи розрахунку концентратора для нагрівання води..... | 25 |
| 2.1. Розробка структурної схеми концентратора для нагрівання води..... | 25 |
| 2.2. Геометричні характеристики параболоциліндричної поверхні..... | 28 |
| 2.3. Тепловий баланс системи для нагрівання води..... | 34 |
| 2.4. Оптична ефективність концентратора..... | 36 |
| 2.5. Розрахунок потужності системи для нагрівання води..... | 37 |
| 3 Конструктивна розробка та моделювання системи нагріву води..... | 44 |
| 3.1. Постановка вимог до конструкції..... | 44 |
| 3.2. Вибір матеріалів для відбивача, каркасу та кріплень..... | 45 |
| 3.3. Розрахунок і розміщення вакуумних трубок у фокусі..... | 46 |
| 3.4. Моделювання конструкції концентратора | 50 |
| Висновки | 54 |
| Перелік джерел посилання | 55 |
| Додатки | 57 |

| | | | | | |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------|
| БРМА 25.00.00.000 ПЗ | | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | |
| Виконав | Глега | |  | | Розробка сонячного концентратора для нагрівання води |
| Перевір. | Лісевич | |  | | |
| Н.контр. |  | | | | Літера |
| Затвер. | Неймак | | | | Аркуш |
| | | | | | Аркушів |
| | | | | | у |
| | | | | | 5 |
| | | | | | 60 |
| | | | | | ХНУ, ЕТ-21 |

Вступ

Сучасна енергетика перебуває в стані глибокої трансформації, спричиненої зростанням споживання енергії, вичерпністю традиційних джерел палива та необхідністю зниження антропогенного впливу на довкілля. Відновлювані джерела енергії, зокрема сонячна, стали одним із головних напрямів розвитку сталих енергетичних технологій. Використання сонячної енергії для теплових потреб — зокрема, для нагрівання води — є ефективним та екологічно безпечним рішенням як у побутовому, так і в промисловому секторах.

Серед технологій перетворення сонячного випромінювання на тепло особливо увагу привертають концентрувальні сонячні системи, що дозволяють досягати вищих температур і підвищеної ефективності. Зокрема, параболоциліндричні концентратори вирізняються відносною простотою конструкції, хорошими оптичними характеристиками та придатністю до інтеграції з вакуумними трубками, які забезпечують низькі теплові втрати. Такі установки знаходять дедалі ширше застосування в системах гарячого водопостачання, опалення та навіть в комбінованих енергоустановках.

Водночас ефективне впровадження таких технологій вимагає проведення попередніх техніко-економічних обґрунтувань, розрахунків геометричних і оптичних параметрів, аналізу матеріалів та моделювання конструктивних рішень. Це і визначає актуальність даного дослідження.

Метою розробки є розрахунок і розробка конструкції параболоциліндричного концентратора з вакуумними трубками для системи нагріву води.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розробленої системи в умовах приватного домогосподарства, закладів соціальної інфраструктури або малого підприємництва, з метою зменшення енергозалежності та економії ресурсів.

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 6 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

1 Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку сонячних теплових систем для нагрівання води

1.1. Принципи роботи сонячних теплових установок

Сонячні теплові установки (СТУ) - це інженерні системи, що використовують енергію сонячного випромінювання для виробництва тепла. Основний принцип їхньої роботи полягає у перетворенні сонячної енергії на теплову за допомогою спеціалізованих поглинаючих елементів — колекторів або концентраторів, які далі передають отримане тепло до теплоносія (вода, антифриз, повітря тощо).

Основні етапи процесу перетворення енергії.

Поглинання сонячного випромінювання: поверхня колектора або концентратора поглинає короткохвильове сонячне випромінювання. Зазвичай для цього використовуються селективні покриття з високим коефіцієнтом поглинання ($\alpha > 0.9$) і низьким коефіцієнтом теплового випромінювання.

Перетворення світлової енергії на теплову. Поглинута енергія підвищує температуру абсорбера — теплопоглинаючого елемента. Внаслідок цього тепло передається теплоносію, що циркулює всередині труб або каналів теплообмінника.

Транспортування тепла. Нагрітий теплоносій транспортується через замкнуту або відкриту систему до теплоаккумулятора або кінцевого споживача (водонагрівача, системи опалення, побутових потреб тощо). У складніших системах застосовуються насоси, автоматичні клапани, контролери та датчики температури.

Акумуляція тепла. Для зменшення втрат енергії та забезпечення постійного тепlopостачання використовують теплоаккумулятори — ємності з водою або іншими речовинами, які зберігають тепло протягом тривалого часу. У деяких системах застосовуються фазові теплоаккумулятори (PCM — Phase Change Materials), які здатні зберігати значну кількість енергії в процесі фазового пере-

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 7 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

ходу.

Використання тепла. Отримане тепло може застосовуватись у системах гарячого водопостачання, опалення, підігріву басейнів, сушіння матеріалів або навіть у процесах промислового виробництва. У комбінації з абсорбційними або адсорбційними холодильними машинами сонячне тепло також може використовуватись для кондиціонування повітря.

Типи циркуляції теплоносія. Природна циркуляція (гравітаційна): базується на різниці густини рідини внаслідок нагріву та охолодження; не потребує електричних насосів. Примусова циркуляція: здійснюється за допомогою насосів, що забезпечують вищу ефективність та контроль над параметрами системи.

Енергетичні втрати в СТУ. Основні втрати тепла відбуваються за рахунок конвекції (втрати до повітря); теплового випромінювання (інфрачервоне випромінювання від нагрітої поверхні); теплопровідності (через конструктивні елементи). Для зменшення втрат застосовуються: теплоізоляція трубопроводів і теплообмінників; використання вакуумних трубок (у вакуумних колекторах); автоматизовані системи управління циркуляцією теплоносія;

Переваги сонячних теплових установок: використовують поновлюване джерело енергії - сонце; знижують витрати на традиційні джерела енергії. Екологічно чисті - не виділяють шкідливих речовин; можуть ефективно працювати в різних кліматичних умовах (залежно від типу установки).

Недоліки: залежність від інтенсивності сонячного випромінювання та погодних умов; необхідність додаткових джерел тепла або акумуляторів для забезпечення постійної роботи; висока вартість обладнання на початковому етапі.

1.2. Класифікація сонячних концентраторів

Сонячне випромінювання, яке досягає поверхні Землі лише за один тиждень, в кілька разів перевищує загальну енергетичну ємність усіх наявних у світі запасів нафти, газу, вугілля та урану. Існує низка методів для ефективного залучення цієї енергії, одним із яких є застосування сонячних концентраторів

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 8 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

Сонячний концентратор – це спеціалізований пристрій, призначений для збору та спрямування сонячного випромінювання з метою нагріву теплоносія. Його ключове завдання полягає у тепловому забезпеченні побутових систем: систем гарячого водопостачання та опалення. Основна відмінність між сонячними концентраторами і фотоелектричними панелями полягає в тому, що перші виробляють теплову, а не електричну енергію.

Принцип дії таких систем ґрунтується на зосередженні сонячної енергії на абсорбуючому елементі, розташованому у фокусі або фокальній лінії. Метою будь-якої концентрувальної оптичної системи є збільшення щільності потоку сонячної радіації до рівня, який дозволяє ефективно трансформувати її в корисну енергію.

Одним із ключових параметрів концентраторів є ступінь концентрації E , що визначається як відношення щільності енергії на приймальній поверхні до щільності прямого сонячного потоку на площині, перпендикулярній його розповсюдженню [2].

Оптичні та теплові характеристики концентраторів мають відповідати типу перетворювача. Наприклад, для фотоелектричних систем із багатьма серійно та паралельно з'єднаними фотоелементами критично важливо забезпечити однорідне опромінення. Це зменшує втрати енергії та підвищує ефективність. Водночас у системах, що працюють з окремими модулями, кожен з яких має один фотоелемент, вимоги до рівномірності опромінення значно нижчі. Відтак такі системи по-різному реагують на зміни освітлення, спричинені неточною орієнтацією, вітровими навантаженнями або механічними коливаннями, що обов'язково має враховуватись при виборі конструкції.

Основні конструктивні елементи сонячного концентратора:

- оптична система: лінзи (звичайні або Френеля) або дзеркала для збирання й фокусування променів;
- абсорбер (теплоприймач): зазвичай реалізований у вигляді сонячного колектора;
- несуча конструкція: каркас або платформа для закріплення оптичних

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 9 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

елементів;

- трубопроводи: для циркуляції теплоносія;
- система стеження за Сонцем (трекер): включає сенсори, привідний електродвигун і контролер.

У складніших конфігураціях також застосовують: термометри, регулюючі вентилі; циркуляційні насоси; контури теплопостачання; елементи управління і діагностики.

Механізм дії сонячного концентратора. Сонячне світло збирається і спрямовується на тепловий приймач, де зосереджується на малій площі. У фокусі або вздовж фокальної лінії розміщується трубка з теплоносієм (вода, масло, рідина з антикорозійними домішками), що поглинає теплову енергію. Далі ця енергія транспортується до кінцевого споживача.

Класифікація систем за типом концентрації:

- баштові геліосистеми - спрямовують промені на один верхній приймач.
- параболоциліндричні концентратори - фокусують промені на трубку вздовж фокальної лінії.
- параболічні дзеркала - зосереджують світло в одній фокальній точці.

Типи фокусування:

- точкове використовується для систем з дзеркалами або лінзами;
- лінійне використовується для систем типу параболоциліндричних концентраторів.

Оптичний механізм фокусування сонячних променів. Світло від великої площини відбивається або заломлюється, концентруючись на значно меншій площі приймача, що дозволяє досягати високих температур теплоносія. Але концентратори можуть фокусувати лише пряме сонячне світло, тому в умовах хмарності ефективність різко знижується.

Найвищі показники ефективності спостерігаються в регіонах з високим рівнем сонячної інсоляції, зокрема в тропічних та посушливих районах.

Системи відстеження Сонця (трекери): одноосні системи: стежать за Сонцем у напрямку схід-захід; двоосні системи: дозволяють також змінювати орієн-

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 10 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

тацію за напрямком північ-південь, що забезпечує оптимальне положення протягом року.

Типи концентраторів за конструктивною схемою:

Існують параболічні концентратори (рис. 1.1).

Принцип дії концентратора. Параболічний концентратор має форму параболоїда обертання, тобто тривимірної параболоїди. Сонячне світло, що падає на внутрішню відбиваючу поверхню дзеркала, відбивається до єдиної фокальної точки, де розміщується приймач з теплоносієм [2].



Рисунок 1.1 - Параболічні сонячні концентратори

Особливості роботи. Дуже висока ступінь концентрації випромінювання ($K_c > 1000$). Використовується в системах, де потрібна висока температура (до $1500\text{ }^\circ\text{C}$).

Найчастіше працює з одноелементним приймачем, що потребує точного позиціонування. Необхідна двоосна система трекінгу.

Застосування: генерація пари для турбін; сонячна металургія; сонячні печі.

Існують параболоциліндричні сонячні концентратори (рис. 1.2).

Принцип дії. Цей тип концентраторів має форму циліндричної параболоїди, розтягнутої вздовж однієї осі. Сонячні промені концентруються уздовж фокальної лінії, де розміщено трубку з теплоносієм (наприклад, термомасло або вода).

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

11

Особливості: Лінійне фокусування спрощує конструкцію приймача. Одно-осьова система стеження (схід-захід) достатня. Температури — до 400–500 °С. Простота у виробництві та техобслуговуванні.



Рисунок 1.2 - Параболоциліндричні сонячні концентратори

Застосування: центральне гаряче водопостачання; промислове теплозабезпечення; генерація електроенергії через парову турбіну (в малих СЕС).

Існують баштові геліоустановки (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 - Баштові геліоустановки

Принцип дії. Система складається з великої кількості дзеркал-геліостатів, що стежать за рухом Сонця і направляють промені до центрального приймача, встановленого на верхівці вежі. У приймачі циркулює теплоносій високої температури (вода, рідкий натрій, соляна суміш тощо).

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
12

Особливості: надзвичайно висока температура в приймачі — понад 1000 °с; складна система керування дзеркалами; підходить для потужних сонячних електростанцій (до сотень МВт); ефективно використання простору — геліостати можуть охоплювати вежу з усіх боків.

Застосування: великі СЕС (наприклад, в Іспанії, США, ОАЕ); теплове зберігання енергії (соляні резервуари); комбіноване виробництво тепла й електрики.

Сферичні лінзові концентратори (рис. 1.4).

Принцип дії: використовують оптичні лінзи сферичної форми для заломлення сонячного світла і зосередження його в точковому приймачі. Лінза збирає розсіяне та пряме випромінювання на невеликій площі.



Рисунок 1.4 - Сферичні лінзові концентратори

Особливості: підходять для невеликих пристроїв (наприклад, зарядок, освітлення); не потребують складної опорної конструкції; обмеження по досягнутій температурі (зазвичай до 300 °с); компактні та дешеві у виготовленні.

Застосування: портативні енергетичні системи; сонячні кулінарні прилади; нагрівальні прилади в побуті.

Лінзові системи Френеля (рис. 1.5).

Принцип дії. Ці концентратори застосовують лінзи Френеля - це пласкі

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

13

пластини з концентричними кільцями, що імітують дію криволінійної лінзи. Вони заломлюють світло і спрямовують його на фокальну точку або лінію.



Рисунок 1.5 - Лінзові системи Френеля

Особливості: тонкі, легкі й дешеві у виготовленні; забезпечують високу ефективність при малій вазі; можуть використовуватися у великих масивах (наприклад, для концентрування на фотоелемент); температурний діапазон — до 500–600 °С.

Застосування: фотоелектричні установки з концентрацією; оптичні системи передачі сонячного світла; системи освітлення, прожектори.

Інші критерії класифікації:

- селективність: селективні / неселективні;
- рівень концентрації: сильноконцентруючі ($K_c \geq 100$) та слабokonцентруючі ($K_c < 100$);
- оптика: лінзові (заломлення) та дзеркальні (відбивання);
- принцип стеження: відбивачем або приймачем;
- тип стеження: фіксовані, екваторіальні, азимутально-зенітальні;
- кількість оптичних елементів: одноелементні та багатоелементні;
- тип теплоносія: рідинні або повітряні системи відведення тепла.

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

14

1.3. Особливості параболоциліндричних концентраторів

Параболоциліндричні концентратори - це сонячні установки, які базуються на геометрії параболи, витягнутої вздовж однієї координатної осі (циліндрична парабола). Вони належать до лінійно-фокусувальних систем, тобто фокусують сонячне випромінювання не в точку, а вздовж фокальної лінії, де розміщується теплоприймальний елемент - абсорберна трубка з теплоносієм (рис. 1.6).

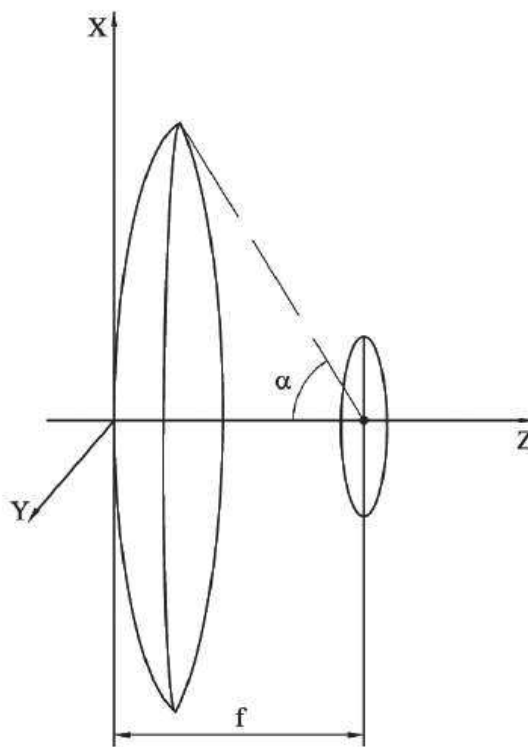


Рисунок 1.6 - Геометричні розміри параболічного (параболоциліндричного) концентратора

Геометричні розміри параболічного концентратора визначають двома незалежними параметрами (рис. 1.6): діаметром $D = 2r$ та фокусною відстанню f . Кут розкриття концентратора α визначають за формулою:

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{D}{4f} \right) \quad (1.1)$$

де D – діаметр параболічного дзеркала концентратора, мм;
 f – фокусна відстань, мм.

Геометричні особливості параболоциліндричного концентратора. Відбиваюча поверхня виконується у вигляді дзеркального корита, форма якого є частиною параболи, витягнутої вздовж довжини концентратора.

Фокусна лінія - місце, куди спрямовується концентроване світло, проходить паралельно довжині установки. Визначається за формулою 1.2.

$$f = \frac{b^2}{4a \cdot f}, \quad (1.2)$$

де b - ширина корита параболоциліндричного концентратора.

Конструктивні елементи, що входять до складу параболоциліндричного концентратора:

- рама (опора), яка виконує несучу функцію для дзеркал та абсорбера.
- дзеркальні елементи: виготовляються з алюмінію, загартованого скла з напиленням або полімерів з відбиваючим шаром;
- абсорбційна трубка. Часто використовується вакуумна або з теплопровідним флюїдом. Зазвичай має селективне покриття, яке поглинає до 95% випромінювання;
- система трекінгу: одноосьова, що забезпечує обертання в напрямку схід–захід.

Загальний вигляд типового параболоциліндричного концентратора, який може бути використаний при розробці установки для нагрівання води показаний на рисунку 1.7.

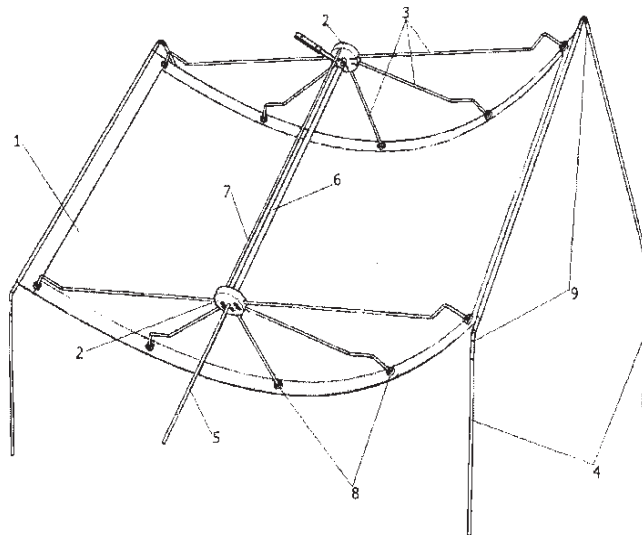


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд параболоциліндричного концентратора:
 1 – дзеркальний рефлектор; 2 – шайби для фокусування променів; 3 – спиці, що забезпечують точне розташування приймального елемента у фокусі; 4 – опорні ніжки-штирі для фіксації конструкції; 5 – центральний направляючий штир; 6 – абсорбційна (вакуумна) трубка; 7 – розпірка між фокусуєчими шайбами для стабілізації положення; 8 – фіксуєчі засувки; 9 – з’єднувальні шайби для скріплення елементів

У якості теплоносія може бути використано: термомасла Therminol або Dowtherm) для температур до 400–450 °С; вода під тиском (до 250–300 °С); пари або інертні гази в спеціалізованих системах.

Використання теплоносія залежить від умов розташування та застосування концентратора та наявності зовнішніх систем тепло-, водо- та паропостачання.

Принцип роботи параболоциліндричного концентратора.

Сонячне світло падає на параболоциліндричне дзеркало і відбивається до фокальної лінії. У фокусі розташовано трубку-абсорбер, через яку проходить теплоносій. Поглинене тепло переноситься теплоносієм до теплообмінника або резервуара. Вся система може бути статичностабільною або обертається навколо однієї осі для підтримки правильного кута до Сонця.

Пропоновані експлуатаційні характеристики концентратора:

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

Температура теплоносія 150–450 °С

Коефіцієнт концентрації (Кс) 20–100

Середній ККД 50–70% залежно від сезону

Тривалість служби понад 20 років при належному обслуговуванні

Система трекінгу одноосьова

Оптична ефективність 70–85%

Основні розроблюваного переваги концентратора:

- висока теплова потужність. Дозволяють генерувати значні обсяги теплової енергії для гарячого водопостачання, опалення або промислових процесів;
- ефективне фокусування. Лінійна геометрія забезпечує хорошу концентрацію при відносно простій оптичній конфігурації;
- низькі втрати при великих довжинах. Абсорбер тягнеться на десятки метрів, що дозволяє зменшити втрати на з'єднання і циркуляцію;
- можливість використання вакуумних трубок. Це знижує теплові втрати навіть при екстремально низьких температурах повітря.
- невисока складність управління. Одноосьовий трекер дешевший і надійніший у порівнянні з двоосьовими системами (як у точкових концентраторах).
- масштабованість. Концентратори можуть легко об'єднуватися в масиви для утворення великих сонячних полів.

1.4. Застосування вакуумних трубок у геліосистемах для нагрівання води

Вакуумні трубки є ключовим елементом сучасних геліосистем завдяки їхній здатності ефективно поглинати сонячне випромінювання та мінімізувати теплові втрати. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу сонячного водонагрівального обладнання протягом усього року, включно з холодними сезонами.

На відміну від плоских колекторів, вакуумні трубки базуються на принципі термосу - ізолювання поглинача тепла від зовнішнього середовища вакуумом, що дозволяє уникати втрат енергії через теплопровідність і конвекцію.

Загальний вигляд вакуумної трубки показаний на рисунку 1.8.

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 18 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |



Рисунок 1.8 - Загальний вигляд вакуумної сонячної трубки

Типова вакуумна трубка складається з таких основних частин:

- зовнішня скляна трубка: прозоре боросилікатне скло, яке витримує перепади температур і механічні навантаження (гради, вітер тощо).
- внутрішня скляна трубка: має селективне поглинаюче покриття (наприклад, Al-N/Al), яке перетворює сонячне випромінювання в тепло з ККД понад 95%.
- вакуумний простір: знаходиться між зовнішньою та внутрішньою трубками, забезпечуючи ізоляцію.
- теплопровідна вставка: часто мідна або алюмінієва, використовується для передачі тепла до металевого колектора або теплообмінника.

Теплова трубка (heat pipe) - герметично закрита трубка, в якій знаходиться невелика кількість рідини. В процесі нагріву рідина випаровується в нижній частині, а вгорі віддає тепло, конденсується і повертається вниз за рахунок капілярного ефекту.

Вакуумний сонячний колектор має коаксіальну конструкцію та складається з ряду вакуумних скляних трубок (рис. 1.8). Зовнішня трубка виконує функ-

цію теплоізоляції, запобігаючи втратам тепла, тоді як внутрішня трубка, покрита селективним поглинаючим шаром, виконує роль абсорбера сонячної енергії, забезпечуючи ефективне перетворення випромінювання в тепло.

Передача тепла в вакуумному сонячному колекторі, залежно від його конструктивного виконання, може здійснюватися трьома основними способами: шляхом природної конвекції води, через теплову трубу або за допомогою U-подібної теплообмінної трубки (рис. 1.9).

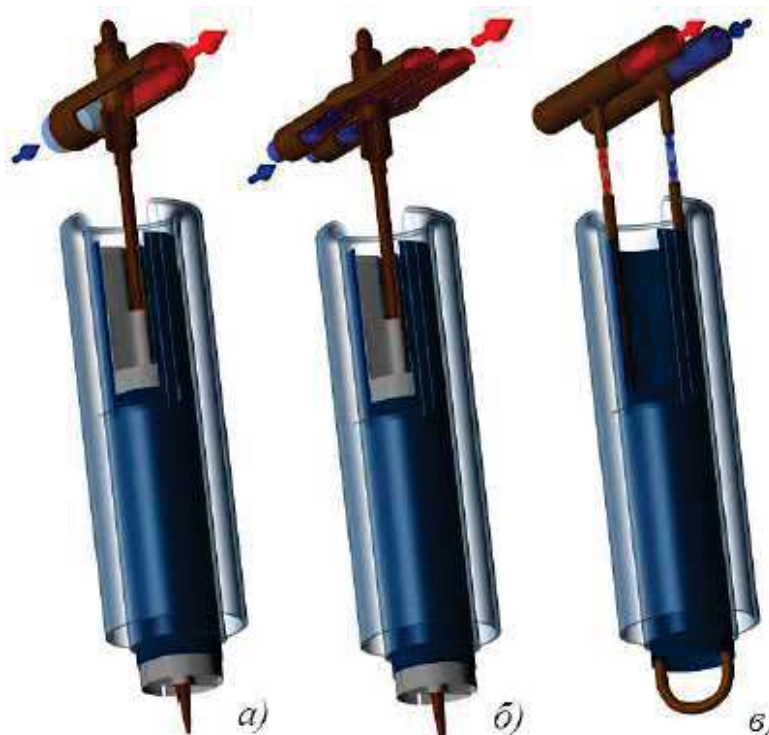


Рисунок 1.9 – Різновиди побудови вакуумних трубок та колекторів:

а - з однією трубкою-теплообмінником для відбирання тепла; б – із двома трубками-теплообмінниками; в – з використанням U –трубок-теплообмінників

Завдяки високій ефективності селективного покриття (до 93%) та мінімальним тепловим втратам через вакуумну оболонку (менше 8%), вакуумні сонячні колектори демонструють одні з найвищих показників ефективності серед теплових сонячних установок.

Сучасні абсорбційні покриття базуються на наномолекулярних технологіях і наносяться методом тонкоплівкового осадження, що дозволяє підвищити ко-

ефіцієнт поглинання сонячного випромінювання на приблизно 20%. Завдяки високій ефективності перетворення сонячної енергії вакуумні колектори здатні генерувати тепло навіть за умов хмарності чи дощу. При повній відсутності тепловідбору температура теплоносія в системі може сягати 250...300 °С. Вакуумні трубки, виготовлені з боросилікатного скла, мають високу механічну міцність і витримують удар граду діаметром до 25 мм.

Завдяки сучасним матеріалам із підвищеними оптичними властивостями, зокрема з високим коефіцієнтом поглинання сонячного випромінювання, вдалося значно покращити загальну енергоефективність сонячних колекторів. Крім того, такі системи демонструють стабільну роботу в холодний сезон, оскільки їхній ККД слабо залежить від температурної різниці між теплоносієм і навколишнім середовищем.

На рисунку 1.10 приведено графік залежності коефіцієнта корисної дії η різних типів колекторів при стандартній інтенсивності сонячного випромінювання для нашої широти 600 Вт/м².

Як показано на рисунку 1.10 в умовах клімату України найбільш доцільним і перспективним є застосування плоских та вакуумних сонячних колекторів. Ці типи обладнання завдяки всесезонному режиму роботи, простоті конструкції, надійності та відносно низькій вартості здатні істотно знизити витрати палива на нагрівання води. Вони ефективно застосовуються як у системах опалення, так і в системах гарячого водопостачання.

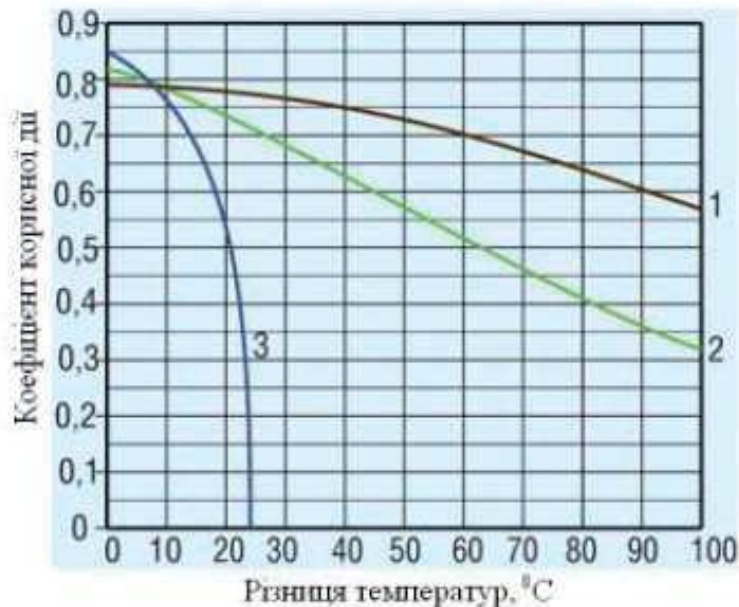


Рисунок 1.10 – Залежність η (ККД) сонячних колекторів різного виконання від різниці температур між теплоносієм та навколишнім повітрям:

1 – вакуумний, 2 – плоский, 3 – відкритий

Проте варто враховувати, що для забезпечення стабільної та безперебійної роботи упродовж усього року сонячні колектори доцільно використовувати у поєднанні з традиційними джерелами енергії — електричними, газовими або твердопаливними установками, які компенсують нестачу теплової енергії в періоди низької сонячної активності.

У нашому завданні ми будемо поєднувати вакуумні колектори із сонячним параболоциліндричним концентратором для збільшення ефективності роботи розроблюваного пристрою для нагрівання води.

Вакуумні трубки у концентраторах

Використання вакуумних трубок у фокусі сонячних концентраторів (наприклад, параболоциліндричних або лінійно-фокусних) є сучасним технологічним рішенням, яке дозволяє суттєво підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в теплову.

У концентраційних системах (зокрема, у параболоциліндричних концентраторах) вакуумні трубки встановлюються вздовж фокальної лінії, де зосереджується сонячне випромінювання. Завдяки вакууму, трубка здатна витримувати

умними трубками працюють ефективно.

Сфери застосування: промислове гаряче водопостачання; високотемпературне опалення та парогенерація; процеси теплової дистиляції води або очищення рідин; системи адсорбційного чи абсорбційного кондиціонування; геліотермічні установки для виробництва електроенергії (CSP); дослідницькі стенди в освітніх закладах.

Особливості використання: потребують точного трекінгу за Сонцем для максимального ефекту; конструкція має бути стійкою до перегріву у разі відсутності теплообміну; складніша в обслуговуванні, ніж звичайні плоскі колектори; використовуються високотемпературні теплоносії (термомасло, етиленгліколь, вода під тиском); забезпечується локальне нагрівання з високою щільністю теплового потоку.

Висновки до першого розділу.

У першому розділі було проведено аналіз розвитку сонячних теплових установок, зосереджено увагу на принципах їх роботи, типах концентраторів та ефективності їх застосування в побутових і промислових цілях. Особливу увагу приділено параболоциліндричним концентраторам, які забезпечують високу ефективність завдяки геометричній формі відбивача. Визначено, що застосування вакуумних трубок значно підвищує ККД системи за рахунок зниження тепловтрат. Перспективним напрямом визнано поєднання геометричного концентратора з вакуумними приймачами в компактних установках для водонагріву.

2 Теоретичні основи і методи розрахунку концентратора для нагрівання води

2.1 Розробка структурної схеми концентратора для нагрівання води

Для проектування сонячного концентратора для нагріву води необхідно створити структурну схему, в якій зазначити всі компоненти та їх взаємозв'язок. У концентраторі використовуються вакуумні трубки, теплообмінник в якому здійснюється теплообмін між теплом, яке віддають вакуумні трубки і проточною водою, яка надходить від центральної мережі до концентратора, регульовані крани для подачі холодної та зливу гарячої води, датчики температури для контролю температури у теплообміннику, запобіжний клапан з датчиком тиску у теплообміннику для контролю тиску та запобігання перегріву та аварійним ситуаціям. Також можливий варіант підключення до системи керування, яка автоматично буде контролювати витрати води, температурні параметри і здійснювати керування.

Розглянемо основні системи компоненти сонячного концентратора із вакуумними трубками їх функціональне призначення. На рисунку 2.1 показаний логічний взаємозв'язок елементів, що входять до складу сонячного концентратора для нагрівання води.

1. Параболоциліндричний дзеркальний рефлектор. Виготовлений із полірованого металу або металізованої плівки, має форму параболу вздовж однієї осі. Його завдання - фокусувати сонячне випромінювання на вакуумні трубки, розташовані по фокусній лінії .

2. Вакуумні трубки (абсорбери). Складаються з двох скляних циліндрів із вакуумом між ними, що зменшує тепловтрати. Внутрішній поглинаючий колектор - зазвичай мідна трубка або теплопровідна труба зі селективним покриттям - приймає концентровану енергію від дзеркала.

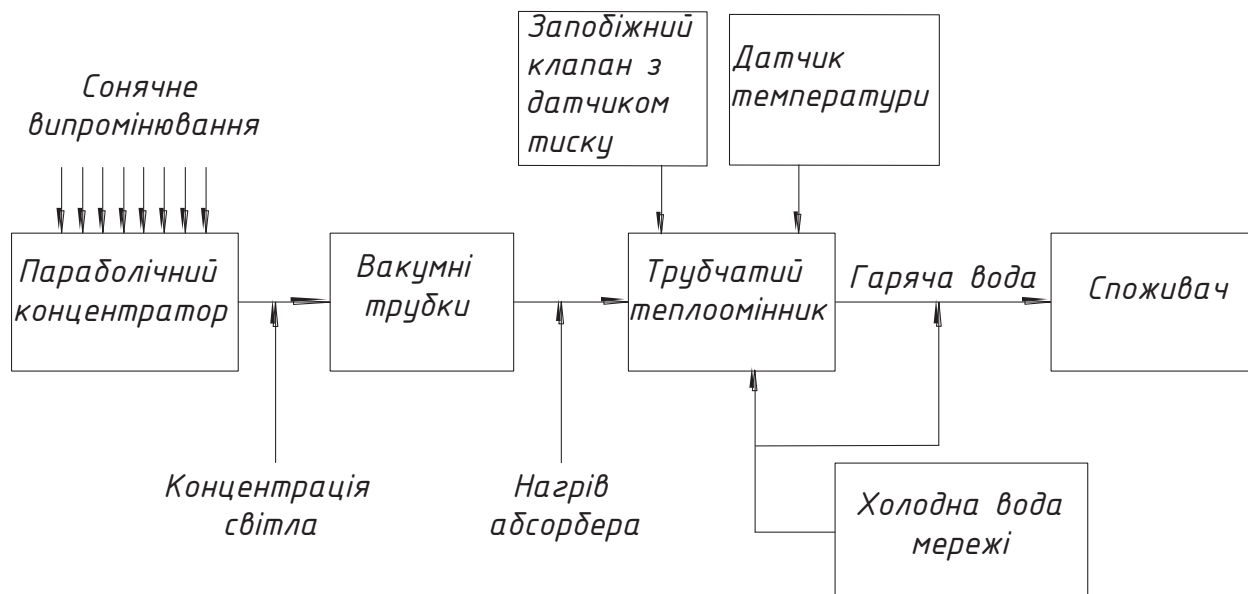


Рисунок 2.1 – Структурна схема сонячного концентратора з вакуумними трубками для нагрівання води

3. Трубчатий теплообмінник у вакуумній трубці. Всередині скляної трубки знаходиться ще одна трубка (прямий або гвинтовий U-трубний теплообмінник), через яку пропускається теплоносій (вода) і в якій саме відбувається теплообмін між нагрітою зовнішньою поверхнею та проточною водою .

4. Магістраль холодної води (вхід) з центральної мережі та регульований кран, що забезпечує подачу холодної води у систему. Кран дозволяє налаштувати потік відповідно до потреб нагріву.

5. Магістраль гарячої води (вихід) та регульований кран. Відводить нагріту воду від теплообмінника в систему гарячого водопостачання або злив. Кран регулює об'єм і тиск виходу.

6. Датчики температури (на вході/виході теплообмінника). Вимірюють температуру холодної води, що входить, і гарячої, що виходить. Інформація потрібна для контролю ефективності, регулювання потоків або запуску захисних алгоритмів .

6. По закінченні світлового дня або настання хмарної погоди контролер закриває вентиляційні крани, система тепlopостачання переходить в стан очікування. Якщо у системі не передбачено мікроконтролерне керування, то цю операцію потрібно провести в ручному режимі.

2.2. Геометричні характеристики параболоциліндричної поверхні

Ідеальний параболічний концентратор здатен зосереджувати паралельний потік сонячного випромінювання в одній точці — фокусі F (рис. 2.2).

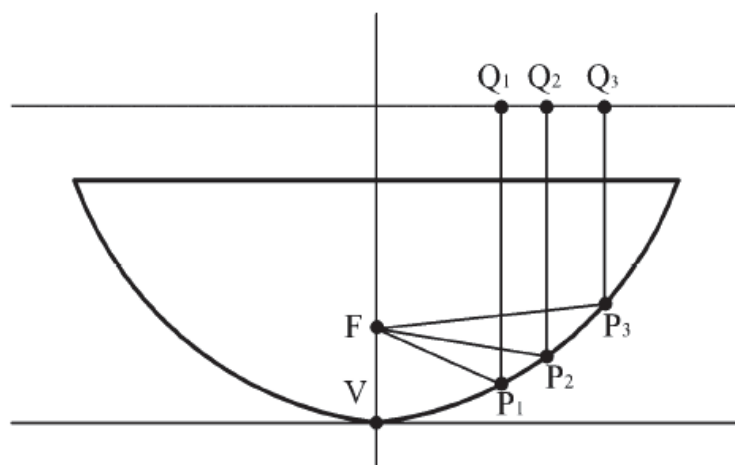


Рисунок 2.2 – Схема роботи сонячного параболічного концентратора

Ця точка є геометричним фокусом параболоїдального дзеркала й відповідає теоретично нескінченному ступеню концентрації енергії, який, однак, на практиці не досягається через оптичні й геометричні втрати.

Геометричні розміри параболічного концентратора визначають двома незалежними параметрами: діаметром $D = 2r$ та фокусною відстанню f . Кут розкриття концентратора α визначають за формулою:

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{D}{4f} \right), \quad (2.1)$$

де D – діаметр параболічного дзеркала концентратора, мм;

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

f – фокусна відстань, мм.

Ступінь концентрації сонячної системи визначається як відношення середньої щільності сконцентрованого випромінювання на приймальній поверхні до щільності сонячного потоку на площині, перпендикулярній напрямку його розповсюдження.

Для кожного типу концентратора існує оптимальне значення кута розкриття, при якому досягається максимальний ступінь концентрації. Аналітичні розрахунки показують, що за ідеальних умов ступінь концентрації може досягати теоретично високих значень E при $\alpha_{opt} \approx 45^\circ$ буде рівне $E_{max} = 11300$. Однак у реальних конструкціях параболічних концентраторів такі значення не досягаються через наявність геометричних похибок та локальних відхилень у формі дзеркальних поверхонь, які неминуче впливають на точність фокусування.

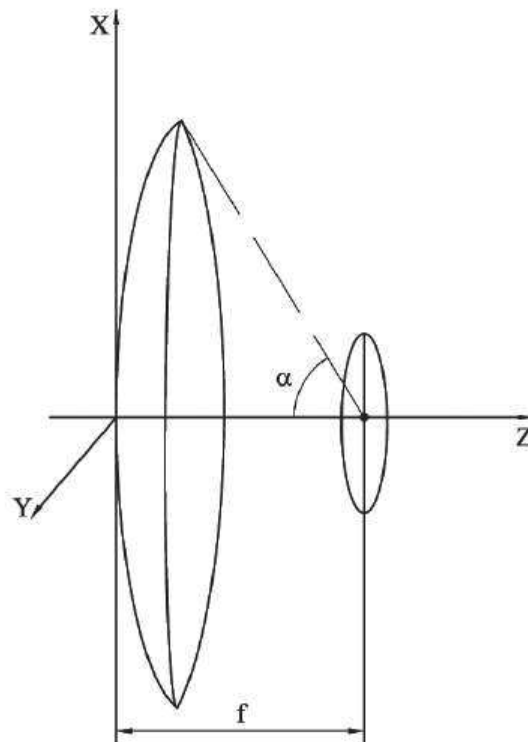


Рисунок 2.3 - Геометричні параметри параболічного концентратора

Ступінь концентрації енергії E позначається наступним чином:

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

29

$$E = \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)^2 \quad (2.2)$$

де α - кут розкриття.

Із врахуванням похибок параболічних дзеркал, їх оптимальний кут розкриття характеризується приблизними значенням $\alpha_{opt} \approx 60^\circ$.

Під час концентрування сонячного випромінювання виникають енергетичні втрати, пов'язані з відхиленням променів від ідеальної траєкторії, яку вони б мали в досконалій оптичній системі. Внаслідок цього не всі відбиті промені точно сходяться в одній фокусній точці — замість неї формується зона з деяким розсіюванням енергії, яку називають фокальною плямою. Саме з цієї причини використовується термін "пляма", а не "точка".

На точність фокусування та рівень енергетичних втрат суттєво впливають:

- ступінь гладкості дзеркальної поверхні;
- відхилення форми дзеркала від ідеальної параболи;
- кут падіння світлових променів щодо оптичної осі концентрувальної системи.

стеми.

Основними характеристиками параболічного концентратора є:

- розмір фокальної плями d_{nl} ;
- максимально досяжна температура у фокусі;
- коефіцієнт корисної дії (ККД) системи.

Розрахунок діаметра фокальної плями виконується за відповідною формулою (у міліметрах):

$$d_{nl} = \frac{f}{\sin(16')}, \quad (2.3)$$

Максимально досягну температуру T у фокальній плямі можна обрахувати за формулою:

$$T = 10^3 \left(\frac{E_m}{5,735} \right)^{0,25} \quad (2.4)$$

Максимальне значення ступеня концентрації енергії

$$E_m = \frac{0,34 \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg}(16')}, \quad (2.5)$$

де α - кут розкриття.

Визначення фокусної відстані та параметрів кривизни для парабоциліндричного концентратора.

При розробці концентратора, в першу чергу, орієнтуються на величину потоку сонячного випромінювання, що уловлюється (передбачувану потужність концентратора). Вона позначається площею P дзеркальної частини рефлектора $P = M_1 M_1 h$, яка розраховується як добуток діаметра розкриву параболи $M_1 M_1$ на висоту h циліндра та величиною сонячної інсоляції на місцевості.

Розмір вибирається з урахуванням довжини вакуумної трубки, яка буде знаходитися вздовж концентратора. Наприклад, довжина трубки $h = 1,6$ м, діаметр розкривання рефлектора задаємо ним $M_1 M_1 = 0,9$ м, сонячна інсоляція $I = 800$ Вт/м², тоді: $\alpha < 90^\circ$) параболічні дзеркала (рисунок 2.4) [14].

Усі вони вбачають різну потужність, що припадає на 1 м² площі теплоприймача (продукту) та по різному реагують на орієнтацію Сонці [14].

$$P = M_1 M_1 h = 1,6 \cdot 0,9 = 1,44 \text{ м}^2 \quad (2.6)$$

$$Q = P \cdot I = 1,44 \cdot 800 = 1152 \text{ Вт} \quad (2.7)$$

Поперечний профіль рефлектора сонячного концентратора має форму параболи — геометричного місця точок, рівновіддалених від певної прямої (директриси) та визначеної точки (фокуса) [14].

Канонічне рівняння параболи має вигляд:

$$Y^2 = 2 \cdot P \cdot X,$$

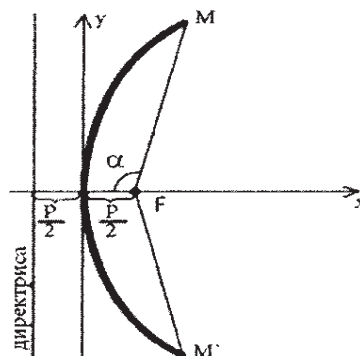
У сонячному концентраторі використовується оптична властивість параболи, яка полягає в тому, що пучок світлових променів, паралельних її осі, після відбивання від параболічної поверхні збирається у фокусі. Саме у цій точці розміщується приймальний елемент - наприклад, шампур із продуктом або теплообмінна трубка, залежно від призначення пристрою [14].

Для побудови концентрувальної поверхні спочатку задаються її базові геометричні параметри: діаметром розкриття (апертури) та кутом піврозкриття, або ж діаметром і координатою фокуса вздовж осі симетрії [14].

Зв'язок між цими величинами визначається геометричною формулою:

$$F = \frac{p}{2} MM' \frac{1 + \cos \alpha}{4 \sin \alpha}. \quad (2.8)$$

Перемінюючи розмір F можна одержати параболічні дзеркала: короткофокусні, відповідно кут розкриття $\alpha > 90^\circ$; середньо фокусні, відповідно, кут розкриття $\alpha = 90^\circ$; довгофокусні, відповідно кут розкриття $\alpha < 90^\circ$ (рисунок 2.5).



Відрізок MM' – лінійний діаметр параболи; F – фокус дзеркала;
 α – кут напіврозкриття параболи; p – параметр параболи це відстань від фокуса до директриси параболи

Рисунок 2.4 – Позначення на параболі в декартових координатах

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

Існують різні типи парабол і всі мають різну потужність, що припадає на одиницю площі теплоприймача, проте вони по різному чутливі до орієнтації по Сонцю [14].



Рисунок 2.5 – Різновиди параболічних (параболоциліндричних) дзеркал: а) коротко-фокусне; б) середньофокусне; в) довгофокусне

Довжина відрізка FM (рис.2.4) обраховується як відстань від фокуса до точки M із координатами $(x; y)$ за виразом:

$$FM = \sqrt{\left(\frac{p}{2} - y\right)^2 + x^2} . \quad (2.9)$$

Лінійний діаметр параболі MM :

$$MM = 2 \left[\sqrt{x \left(x + \frac{p}{2}\right) + \frac{p}{2} \operatorname{arsh} \sqrt{\frac{2x}{p}}} \right] . \quad (2.10)$$

Оскільки рефлектор виготовляється з гнучких матеріалів, для забезпечення стабільної геометричної форми необхідної кривизни застосовуються додаткові фокусуєчі спиці. Їхнє розташування розраховується з урахуванням того, що всі параболі є подібними фігурами, тобто мають однакову форму при різних масш-

табах. Масштаб параболи визначається відстанню між її фокусом і директрисою, яка впливає на глибину й крутизну відбивальної поверхні. Саме ця відстань є базовим параметром при геометричному проектуванні опорних елементів, що формують параболічний профіль.

2.3. Тепловий баланс системи для нагрівання води

Система для нагрівання води із використанням параболоциліндричного концентратора та вакуумних трубок функціонує на основі балансу надходження та відведення теплової енергії.

В загальному вигляді тепловий баланс можна записати як співвідношення сум всіх складових теплонадходжень та тепловтрат:

$$Q_{\text{сонця}} + Q_{\text{дод}} = Q_{\text{накопичене}} + Q_{\text{втрати}} + Q_{\text{використане}} \quad (2.11)$$

де $Q_{\text{сонця}}$ - тепла енергія, отримана від сонячного випромінювання; $Q_{\text{дод}}$ - тепла енергія від додаткового джерела; $Q_{\text{накопичене}}$ - енергія, накопичена у теплоаккумуляторі; $Q_{\text{втрати}}$ - втрати тепла (через теплообмін, навколишнє середовище); $Q_{\text{використане}}$ - тепла енергія, передана до системи споживання (наприклад, ГВП - гарячого водопостачання).

Ефективність системи залежить від:

- рівня сонячного випромінювання;
- конструкції концентратора та теплообмінника;
- теплоізоляції компонентів;
- оптимальної роботи гідравлічного контуру.

Для того щоб оцінити і тепловий баланс і ефективність системи потрібно скласти гідравлічну схему, щоб побачити, які елементи входять туди, оцінити їх взаємозв'язок та дати оцінку оптимальної роботи гідроконтура та шляхи можливого поліпшення роботи з метою підняття ефективності.

Гідравлічна система забезпечує ефективне поглинання та накопичення сонячної енергії; циркуляцію теплоносія, нагрівання води в акумуляторі та передачу тепла до споживача; взаємодіє з додатковим джерелом тепла для підвищення надійності; забезпечує контроль температурного режиму і керування потоком теплоносія.

Загальний вигляд схеми з елементами та взаємозв'язками показана на рисунку 2.6 та у графічній частині роботи [БРМА 25.00.00.000 Г1].

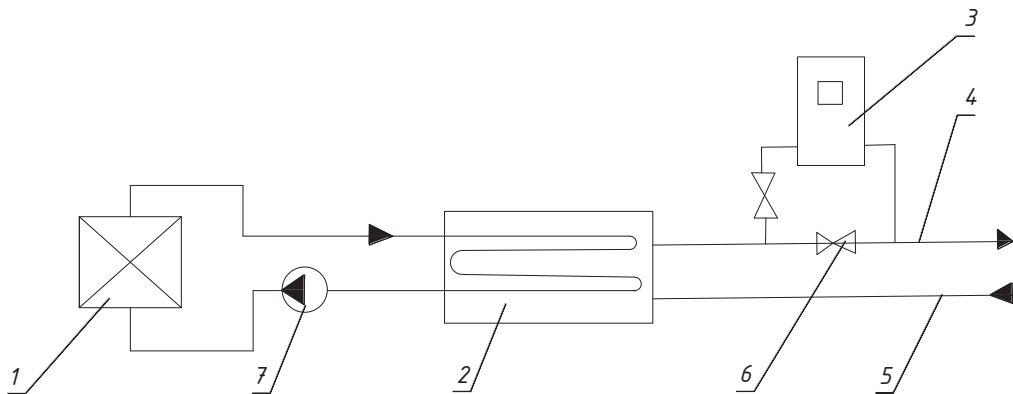


Рисунок 2.6 – Гідравлічна схема: 1 - параболоциліндричний концентратор;
2 - рідинний теплоакумулятор; 3 - додаткове джерело тепла; 4 – термометр;
5 - контур системи гарячого водопостачання; 6 - регулюючий вентиль;
7 - циркуляційний насос

Характеристика та функції елементів, що входять до гідравлічної системи.

1. Параболоциліндричний концентратор - збирає сонячне випромінювання та фокусує його на абсорбер, де нагрівається теплоносіє.

2. Рідинний теплоакумулятор - накопичує теплову енергію, нагріваючи воду до заданої температури для подальшого використання.

3. Додаткове джерело тепла - забезпечує підігрів води в умовах недостатньої сонячної активності (наприклад, електричний або газовий нагрівач).

4. Термометр - служить для контролю температури в системі — дозволяє відстежувати ефективність роботи нагріву.

5. Контур системи гарячого водопостачання (ГВП) - забезпечує подачу нагрітої води споживачам (побутові крани, опалення тощо).

6. Регулюючий вентиль - контролює витрату або напрямок потоку теплоносія, забезпечуючи стабільну роботу системи

7. Циркуляційний насос - забезпечує рух теплоносія в замкнутому контурі між концентратором, теплоаккумулятором і споживачем.

2.4. Оптична ефективність концентратора

Оптична ефективність сонячного концентратора - це відносна величина, яка характеризує здатність оптичної системи (дзеркал, лінз, відбивачів) перенаправляти та зосереджувати сонячне випромінювання на приймальну поверхню (теплообмінник, вакуумну трубку тощо) з мінімальними втратами.

$$\eta_{\text{опт}} = \frac{E_{\text{фокус}}}{E_{\text{вхід}}} \quad (2.12)$$

де $\eta_{\text{опт}}$ - оптична ефективність; $E_{\text{фокус}}$ - кількість енергії, фактично сконцентрованої на приймачі; $E_{\text{вхід}}$ - кількість сонячної енергії, яка падає на апертуру концентратора.

Основні складові оптичних втрат:

Оптична ефективність завжди менша за 100% через декілька ключових факторів: відбивна здатність дзеркал (ρ) - частина світла втрачається через поглинання в матеріалі дзеркала; оптична похибка (розфокусування) виникає через неточності форми дзеркал промені не сходяться в точному фокусі (фокальна пляма замість точки); кутові втрати (косинус-фактор), коли промені падають під кутом, не вся енергія концентрується ефективно; розсіювання на поверхні нерівності або забруднення дзеркал зменшують кількість відбитого світла.

Загальна формула для оцінки оптичної ефективності:

$$\eta_{\text{опт}} = \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \cos(\theta) \cdot (1 - \delta) \quad (2.13)$$

де ρ - коефіцієнт відбиття дзеркала (наприклад, 0.90–0.95); τ - коефіцієнт пропускання захисного скла (якщо є); α - коефіцієнт поглинання абсорбера; θ - кут між напрямком випромінювання і нормальною до дзеркала (враховується косинус-фактор); δ - втрати на затінення та розсіювання.

Типові значення оптичної ефективності $\eta_{\text{опт}}$ для різних видів концентраторів: параболоциліндричний - 0.65 – 0.75; плоский з дзеркалами 0.50 – 0.65; лінійно-фокусний Френеля 0.55 – 0.70.

Як видно з аналізу, розроблюваний нами концентратор має найбільшу оптичну ефективність. Крім того, на ефективність системи буде впливати і наявність вакуумних трубок в якості накопичувачів тепла та передачі його споживачам.

Оптична ефективність напряду впливає на загальний ККД сонячного концентратора, оскільки вона визначає, скільки енергії взагалі доходить до приймача. Якщо, наприклад, абсорбер має теплову ефективність 90%, а оптична — лише 60%, то загальна ефективність системи буде:

$$\eta_{\text{загальна}} = \eta_{\text{опт}} \cdot \eta_{\text{тепл}} = 0.6 \cdot 0.9 = 0.54 \text{ (54\%)}$$

2.5. Розрахунок потужності системи для нагрівання води

Коефіцієнт корисної дії концентратора для отримання тепла визначається за формулою:

$$\eta = \frac{Q}{I \cdot F}, \quad (2.14)$$

де Q - енергія у фокусі дзеркала концентратора, Дж;

I - густина світлового потоку променів, що падають на концентратор, Дж/м².

F - проекція відбиваючої поверхні дзеркала на площу, що перпендикулярна до падаючих променів, м².

Сконцентрована сонячна енергія надходить до приймачів – поглиначів, де вона використовується за призначенням. Для забезпечення ефективної роботи концентраторів упродовж усього світлового дня їх оснащують системами двокоординатного стеження за Сонцем.

Низькотемпературні концентратори та фокусуєчі колектори можуть застосовуватися для гарячого водопостачання й опалення житлових будинків, тепlopостачання технологічних процесів на підприємствах, сушіння матеріалів, роботи насосів періодичної дії для підйому води з підземних джерел, опріснення води, приготування їжі тощо.

У нашому випадку енергію у фокусі дзеркала Q буде складати енергія, що буде вироблятися у сонячному колекторі, який ми розробляємо адаптувавши його до конструкції сонячного концентратора, то розрахунки системи ми будемо проводити як для вакуумного сонячного колектора. Попередня кількість вакуумних трубок, які планується адаптувати у фокус парабоциліндричний концентратор буде 3 штуки. В подальшому на основі розрахунків, ця кількість може змінитися, якщо не буде вироблятися достатня кількість тепла.

Необхідна площа сонячного колектора $S_{\text{потр}}$ визначається для періоду з найменшою сонячною інсоляцією протягом усього строку експлуатації системи. Розрахунок проводиться за умови оптимального розміщення колектора, тобто коли його активна поверхня орієнтована на південь, розташована без затінення, а сонячне випромінювання надходить під кутом, близьким до 90° [2].

$$S_{\text{потр}} = \frac{Q_{\text{потр}}}{Q_{\text{кіл}}}, \quad (2.15)$$

де $Q_{номр}$ – попит у тепловій енергії (Вт·год); $Q_{кїл}$ – кількість теплової енергії, що може постачити 1 м² сонячного колектора (Вт·год/м²).

Зазвичай потреба в гарячій воді задається або згідно з фактичними показниками (за даними лічильника), або розраховується відповідно до встановлених нормативів. Наприклад, згідно з санітарними вимогами, мінімальна добова потреба в гарячій воді для однієї особи становить 65 літрів [2].

Отже, знаючи загальний об'єм споживання гарячої води $V_{потр}$ (л), можна обчислити загальну кількість теплової енергії $Q_{потр}$, необхідну для її нагрівання, за формулою:

$$Q_{номр} = C \cdot V_{номр} (t_{вих} - t_{вх}) \quad (2.16)$$

де $t_{вих}$ – температура гарячої води (вихідна температура), °С; $t_{вх}$ – 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, $C = 1,163$ Вт·год/л·°С) [2]:.

У системах гарячого водопостачання температура води на виході з крана регламентується санітарними нормами і зазвичай становить $t_{вих}=50\dots60^{\circ}\text{C}$

Температура холодної води, яка надходить у водопровідну систему, визначається за даними гідрометеорологічної служби для конкретного регіону. У разі відсутності таких даних допускається використовувати такі усереднені значення [2]:

- в опалювальний період: $t_{вх}=5^{\circ}\text{C}$
- у неопалювальний період: $t_{вх}=15^{\circ}\text{C}$

Кількість теплової енергії, яку реально може надати сонячний колектор для нагрівання води - $Q_{кїл}$, визначається з урахуванням потенціалу сонячного випромінювання в регіоні за певний місяць - $Q_{сон}$ (Вт·год/м²), і обчислюється за формулою [2]:

$$Q_{\text{кол}} = Q_{\text{сон}} \cdot \eta_{\text{кол}} \cdot \eta_{\text{атм}} \cdot \eta_{\text{хмар}} \cdot \eta_{\text{втр}} \quad (2.17)$$

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 [2].

Кількість сонячної енергії, яку можна отримати в певному регіоні $Q_{\text{сон}}$, визначається на основі статистичних метеорологічних даних, що характеризують рівень сонячної інсоляції протягом місяця або року.

$$Q_{\text{сон}} = Q_{\text{інс}} N_{\text{дн}}, \quad (2.18)$$

де $Q_{\text{інс}}$ – рівень сонячного опромінення для регіону у якому знаходиться теплова установка (кВт·год/м²/день) [2]; $N_{\text{дн}}$ – кількість днів роботи теплової установки.

Коефіцієнт прозорості атмосфери $\eta_{\text{атм}}$ варіюється в межах 0,8...1,0. Нижче значення цього коефіцієнта ($\eta_{\text{атм}}=0,8$) характерне для великих міських агломерацій, промислових зон або територій із високим рівнем атмосферного забруднення (наприклад, поблизу ТЕС, металургійних комбінатів, цементних заводів тощо). У регіонах із високою екологічною чистотою, навпаки, цей показник наближається до максимального - для курортних та природоохоронних зон приймається значення $\eta_{\text{атм}}=1,0$ [2].

Коефіцієнт втрат тепла при транспортуванні гарячої води $\eta_{\text{втр}}$ залежить від протяжності та структури системи водопостачання. У загальному випадку він змінюється в межах 0,85...0,98. Для розгалужених централізованих систем, у яких значна частка тепла втрачається в мережі, слід приймати значення $\eta_{\text{втр}}=0,85$. Із зменшенням масштабу системи - до рівня окремого будинку чи квартири - втрати знижуються, відповідно, коефіцієнт зростає. Для індивідуаль-

них (локальних) систем із мінімальною довжиною трубопроводів, втрати незначні, і показник може досягати $\eta_{\text{втр}} = 0,98$ [2].

Коефіцієнт корисної дії сонячного колектора $\eta_{\text{кол}}$ залежить як від конструктивного типу колектора, так і від різниці температур між теплоносієм і навколишнім повітрям. Для орієнтовного визначення цього показника можна скористатися усередненими статистичними значеннями, наведеними для різних типів колекторів (див. рис. 1.9) [2].

Щоб скористатися графічними залежностями, необхідно попередньо розрахувати температурну різницю:

$$\Delta_t = t_{\text{вих}} - t_{\text{нов}}, \quad (2.19)$$

де $t_{\text{нов}}$ – середня температура повітря в місяці, що прийнятий за розрахунок.

Коефіцієнт, який враховує зниження сонячної інсоляції хмарами $\eta_{\text{хмар}}$ і визначається за такими даними, що беруться із сайтів та інформаційних джерел архіву прогнозу погоди [2].:

$$\eta_{\text{хмар}} = \frac{1,0 \cdot N_{\text{сон}} + 0,7 \cdot N_{\text{хмар}} + 0,3 \cdot N_{\text{похм}}}{N_{\text{дн}}}, \quad (2.20)$$

де $N_{\text{сон}}$, $N_{\text{хмар}}$, $N_{\text{похм}}$ – адекватно, кількість сонячних, хмарних та похмурих (з високим рівнем хмарності) днів у місяці, який береться за розрахунок; $N_{\text{дн}}$ – кількість днів у кожному місяці, який береться за розрахунок [2].

Розрахуємо необхідну площі сонячного колектора адаптованого у концентратор, що розташований у місті Хмельницький, для забезпечення 100 л гарячої води на добу (побутові потреби 1 людини) у червні [2].

На основі статистичних даних гідрометеорологічної служби для міста Хмельницького визначаємо для квітня: $N_{\text{дн}} = 30$, $N_{\text{сон}} = 25$, $N_{\text{хмар}} = 5$, $N_{\text{похм}} = 1$, $t_{\text{нов}} =$

25,6 °C (середня температура вдень, оскільки вночі сонячний колектор не працює), $t_{\text{вх}} = 15$ °C (опалювальний сезон, як правило, закінчується) [2].

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

$$\begin{aligned}\eta_{\text{хмар}} &= \frac{1,0 \cdot N_{\text{сон}} + 0,7 \cdot N_{\text{хмар}} + 0,3 \cdot N_{\text{похм}}}{N_{\text{дн}}} = \\ &= \frac{1,0 \cdot 25 + 0,7 \cdot 5 + 0,3 \cdot 1}{30} = 0,62\end{aligned}$$

Різниця температури між теплоносієм та повітрям:

$$\Delta_t = t_{\text{вих}} - t_{\text{нов}} = 55 - 25,6 = 29,4 \text{ °C.}$$

Для вакуумного колектора, із графіків (рис.1.9) для $\Delta_t = 29,4$ °C визначаємо коефіцієнт корисної дії колектора, $\eta_{\text{кол}} = 0,78$.

Прийmemo середнє значення для коефіцієнту місцевих втрат у системі водопостачання $\eta_{\text{втр}} = 0,92$.

Місто Хмельницький є невеликим містом із невеликим рівнем промисловості. Приймемо для даного міста середнє значення коефіцієнта прозорості атмосфери $\eta_{\text{атм}} = 0,9$.

Із таблиці [2,табл.5.1] для Хмельницької області знаходимо рівень сонячної інсоляції у червні, $Q_{\text{інс}} = 6,38$ кВт·год/м²/день. Кількість сонячної енергії у квітні:

$$Q_{\text{сон}} = Q_{\text{інс}} N_{\text{дн}} = 6,38 \cdot 30 = 191,4 \text{ кВт·год/м}^2.$$

Кількість енергії теплової, що може постачити сонячний колектор:

$$\begin{aligned}Q_{\text{кол}} &= Q_{\text{сон}} \eta_{\text{кол}} \eta_{\text{атм}} \eta_{\text{хмар}} \eta_{\text{втр}} = \\ &= 191,4 \cdot 0,78 \cdot 0,9 \cdot 0,82 \cdot 0,92 = 101,3 \text{ кВт·год/м}^2\end{aligned}$$

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 42 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

Загальна кількість води, яку потрібно підігріти:

$$V_{\text{потр}} = V_{\text{доб}} \cdot N_{\text{дн}} = 100 \cdot 30 = 3000 \text{ л,}$$

де $V_{\text{доб}} = 100$ л – витрати гарячої води за добу для побутових потреб.

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

$$Q_{\text{потр}} = CV_{\text{потр}}(t_{\text{вих}} - t_{\text{ех}}) = 1,163 \cdot 3000(55 - 15) = 139 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Потрібна площа сонячного колектора адаптованого з сонячним концентратором:

$$S_{\text{потр}} = \frac{Q_{\text{потр}}}{Q_{\text{кол}}} = \frac{139}{101} = 1,37 \text{ м}^2.$$

Висновки до другого розділу.

У другому розділі розглянуто геометричні й теплотехнічні аспекти проектування параболоциліндричного концентратора. Проведено аналітичні розрахунки кривини поверхні, фокусної відстані, теплового балансу системи та оптичної ефективності. Розрахунок теплового навантаження дозволив оцінити потужність, необхідну для забезпечення стабільного підігріву води. Встановлено, що оптимізація параметрів поверхні та розміщення приймачів дозволяє досягнути високого коефіцієнта корисної дії за рахунок максимальної концентрації сонячної енергії на фокусі.

3 Конструктивна розробка та моделювання системи нагріву води

3.1. Постановка вимог до конструкції

Проектування системи нагріву води з використанням сонячного концентратора передбачає визначення ключових технічних вимог до її конструкції з урахуванням умов експлуатації, кліматичних особливостей регіону, необхідної продуктивності та економічної доцільності. До основних вимог, що висувуються до конструкції системи, належать:

Енергоефективність – система повинна забезпечувати достатню кількість теплової енергії для нагріву заданого об'єму води до нормативної температури (50–60 °С) навіть у перехідні сезони.

Оптимальна орієнтація і фокусування – конструкція повинна забезпечувати точне фокусування сонячного випромінювання на приймальну трубку, а також можливість регулювання кута нахилу або оснащення системою сонячного стеження.

Механічна надійність – конструкція повинна бути стійкою до дії вітрових і снігових навантажень, температурних коливань, а також корозійно-стійкою. Теплова ізоляція – втрати тепла в процесі транспортування теплоносія повинні бути мінімальними, що потребує використання теплоізоляційних матеріалів.

Можливість накопичення тепла – передбачається наявність теплоаккумулятора для забезпечення безперервного постачання гарячої води.

Модульність і ремонтпридатність – конструкція повинна бути простою в обслуговуванні, з можливістю заміни окремих елементів без демонтажу всієї системи. Безпека експлуатації – система повинна включати захисні елементи: запобіжний клапан, температурні датчики, аварійне відключення циркуляційного насоса тощо.

3.2. Вибір матеріалів для відбивача, каркасу та кріплень

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 44 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

Під час розробки конструкції параболоциліндричного концентратора з вакуумними трубками особливу увагу приділяється правильному вибору матеріалів, які визначають довговічність, ефективність та стійкість системи до зовнішніх впливів.

1. Відбивач (рефлектор)

Матеріал: полірований алюміній марки АМг2Н товщиною 0,8–1,0 мм з дзеркальним анодованим покриттям (товщина шару не менше 15 мкм).

Обґрунтування вибору: високий коефіцієнт відбивання (до 92–95%); мала маса - зручно формувати криволінійний профіль; стійкість до корозії в умовах відкритого повітря.

2. Несучий каркас

Матеріал: сталева профільна труба 20×20 мм або 25×25 мм, марка Ст3пс, з антикорозійним порошковим покриттям або оцинкуванням.

Альтернатива для полегшених мобільних конструкцій: алюмінієвий профіль системи 40×40 мм (анодований), сплав АД31-Т5.

Обґрунтування вибору: висока міцність і жорсткість; простота зварювання або з'єднання болтами; стійкість до атмосферних впливів.

3. Кріпильні елементи

Матеріали: болти, гайки, шайби – нержавіюча сталь А2 (АІSІ 304), стандарт DIN 933/934;

Затискачі вакуумних трубок – термостійкий поліамід (РА66) або силіконові ущільнювачі з алюмінієвими тримачами;

Допоміжні прокладки – гума EPDM або силікон (робоча температура до +200 °С).

Обґрунтування вибору: механічна надійність у циклічних навантаженнях; стійкість до ультрафіолету, корозії, нагрівання.

3.3. Розрахунок і розміщення вакуумних трубок у фокусі

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 45 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

Для розміщення вакуумних трубок у фокусі концентратора було прописані формули для розрахунку. Розрахунок зроблено для короткофокусного концентратора рефлектором під вакуумну трубку довжиною $h = 1,8$ м, з кутом полурозкриву, лінійним діаметром.

Задача вирішується зворотною методикою [14]. Спираючись на властивості параболі запишем вирази для MF і FD:

$$\begin{cases} MF = x + \frac{p}{2} \\ FD = x - \frac{p}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

У трикутнику ΔFMD :

$$FD = MF \cos 60^\circ,$$

$$\frac{p}{2} = \frac{x}{3}.$$

Заміняємо $\frac{p}{2}$ на $\frac{x}{3}$ у формулі (3.1):

$$MM = 2 \left[\sqrt{x \left(x + \frac{x}{3} \right) + \frac{x}{3} \operatorname{arsh} \sqrt{3}} \right] = 2 \left[\frac{x}{3} \left(2\sqrt{3 + \operatorname{arsh} \sqrt{3}} \right) \right] \quad (3.2)$$

$$1800 = 2 \left[\frac{x}{3} \left(2\sqrt{3 + \operatorname{arsh} \sqrt{3}} \right) \right]$$

$$x \approx 436,5$$

$$\frac{p}{2} = \frac{436,5}{3} = 145,5$$

$$FM = 436,5 + 155,5 \approx 582 \text{ мм}$$

Діаметр розкривання у параболі знаходимо з формули [14] (3.1):

$$MM' = \frac{p}{2} \frac{4 \sin \alpha}{1 + \cos \alpha} = 125,5 \frac{4 \sin 120^\circ}{1 + \cos 120^\circ} = 935,5 \text{ мм}$$

Визначимо параметри розміщення трубок для середньофокусного параболоциліндричного концентратора.

Довжина концентратора така ж сама, так вакуумні трубки вибираємо однакої довжини. Для цього варіанту кут полурозкриву [14]. $\alpha = 90^\circ$ (рисунок 7).

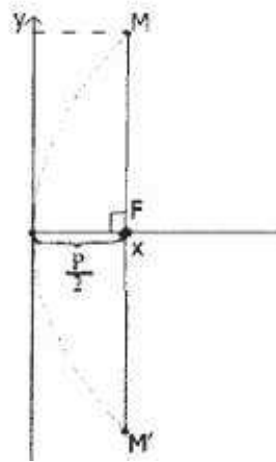


Рисунок 3.1 – Схема середньофокусного параболоциліндричного концентратора

При $MP = MD$, отже можемо записати [14]:

$$MM = 2 \left[\sqrt{\frac{p}{2} \left(\frac{p}{2} + \frac{p}{2} \right)} + \frac{p}{2} \operatorname{arsh} \sqrt{\frac{2p}{2p}} \right] = 2 \left[\frac{p}{2} (\sqrt{2} + \operatorname{arsh} \sqrt{1}) \right] \quad (3.3)$$

$$1321 = 2 \left[\frac{p}{2} (\sqrt{2} + \operatorname{arsh} \sqrt{1}) \right]$$

$$\frac{p}{2} = \frac{1162}{2(\sqrt{2} + \operatorname{arsh}\sqrt{1})} \approx 253,12 \text{ мм}$$

$$FM = y = \sqrt{2px} = \sqrt{2(243,1 \cdot 2) \cdot 254,1} = 516,3 \text{ мм.}$$

$$MM = 2FM = 2 \cdot 516,2 = 1042,4 \text{ мм}$$

Визначимо параметри розміщення трубок для довгофокусного параболоциліндричного концентратора.

Схема довгофокусного параболоциліндричного концентратора приведена на рисунку 3.2.

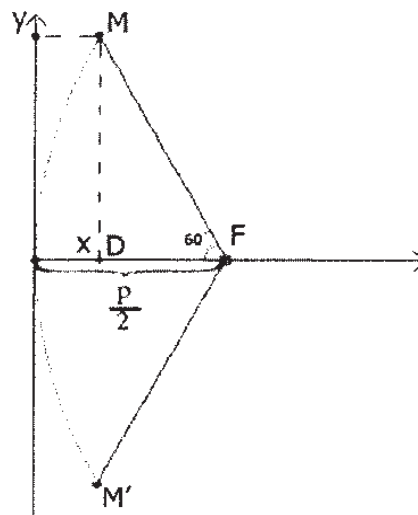


Рисунок 3.2 – Схема довгофокусного параболоциліндричного концентратора

Опираючись на властивості параболи запишемо вирази для MF і FD [14]:

$$\begin{cases} MF = x + \frac{p}{2} \\ FD = \frac{p}{2} - x \end{cases}$$

(3.4)

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |
| | | | | |

В трикутнику ΔFMD :

$$FD = MF \cos 60^\circ$$

$$\left(x + \frac{P}{2}\right) \cos 60^\circ = \frac{P}{2} - x, 3x = \frac{P}{2}.$$

Робимо заміну $\frac{P}{2}$ на $3x$ у формулі (3.4)

$$MM' = 2 \left[\sqrt{x(x+3x)} + x \operatorname{arsh} \sqrt{\frac{1}{3}} \right] = 2 \left[x \left(2 + 3 \operatorname{arsh} \sqrt{\frac{1}{3}} \right) \right]$$

$$1300 = 2 \left[x \left(2 + 3 \operatorname{arsh} \sqrt{\frac{1}{3}} \right) \right]$$

$$x \approx 134,4 \text{ мм}$$

$$\frac{P}{2} = 3 \cdot 134,5 \approx 395,5 \text{ мм.}$$

$$FM = 395,5 + 134,5 = 558 \text{ мм.}$$

Діаметр розкриву параболу знаходимо за формулою [14] (3):

$$MM' = \frac{P}{2} \frac{4 \sin 60^\circ}{1 + \cos 60^\circ} = 1239,5$$

Результати розрахунку геометричних параметрів параболоциліндричних дзеркал наведені в таблиці 3.1.

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | 49 |

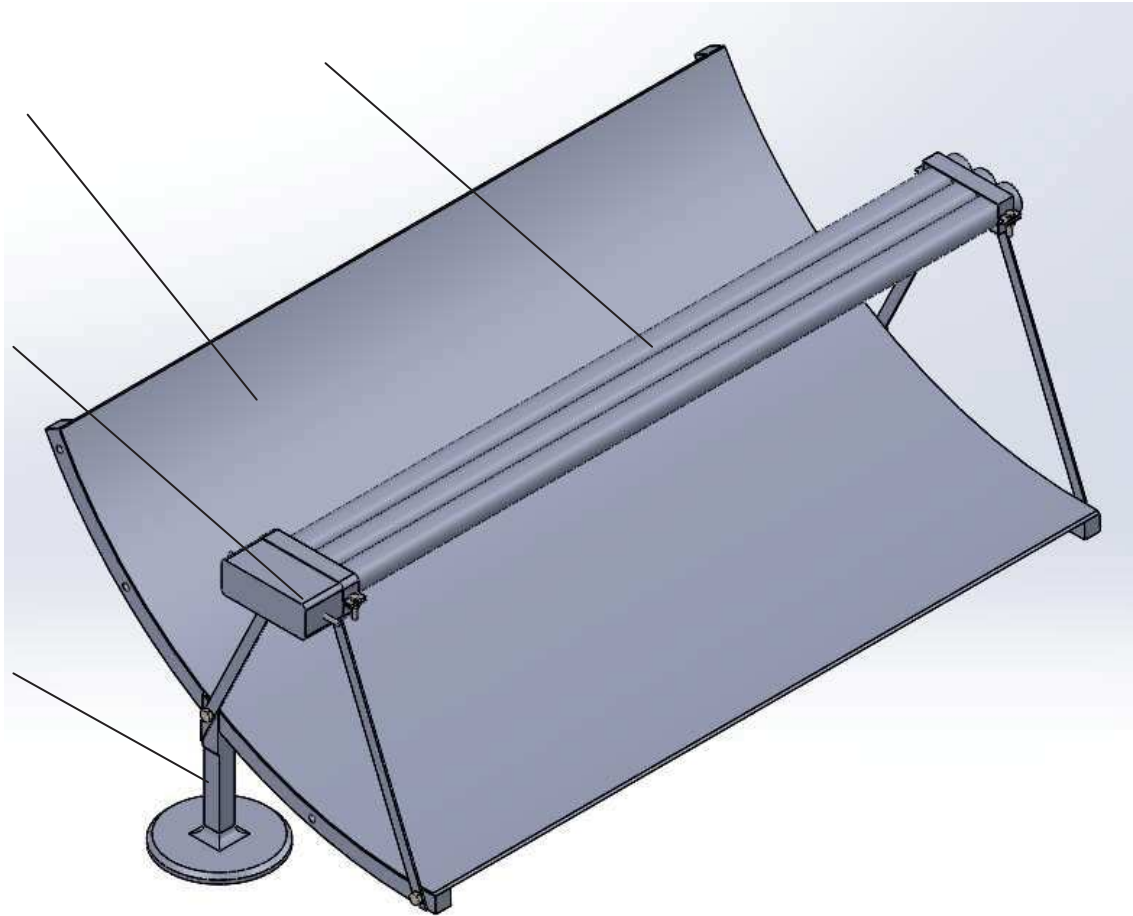


Рисунок 3.3 - Тривимірна модель параболоциліндричного концентратора з вакуумними трубками у програмному середовищі SolidWorks

Модель дозволила здійснити перевірку механічної збірки, а також підготувати креслення для виготовлення елементів конструкції. У подальшому така модель може бути використана для проведення симуляцій теплових потоків, навантажень та візуалізації принципу роботи системи.

На основі 3D-моделі, створеної в SolidWorks, було сформовано складальне креслення сонячного концентратора, яке включає всі основні компоненти конструкції: рефлектор, каркас, вакуумні трубки, кріплення та вузли регулювання. Креслення дає змогу чітко уявити взаємне розташування деталей, забезпечує точність збирання та слугує основою для виготовлення елементів конструкції.

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

51

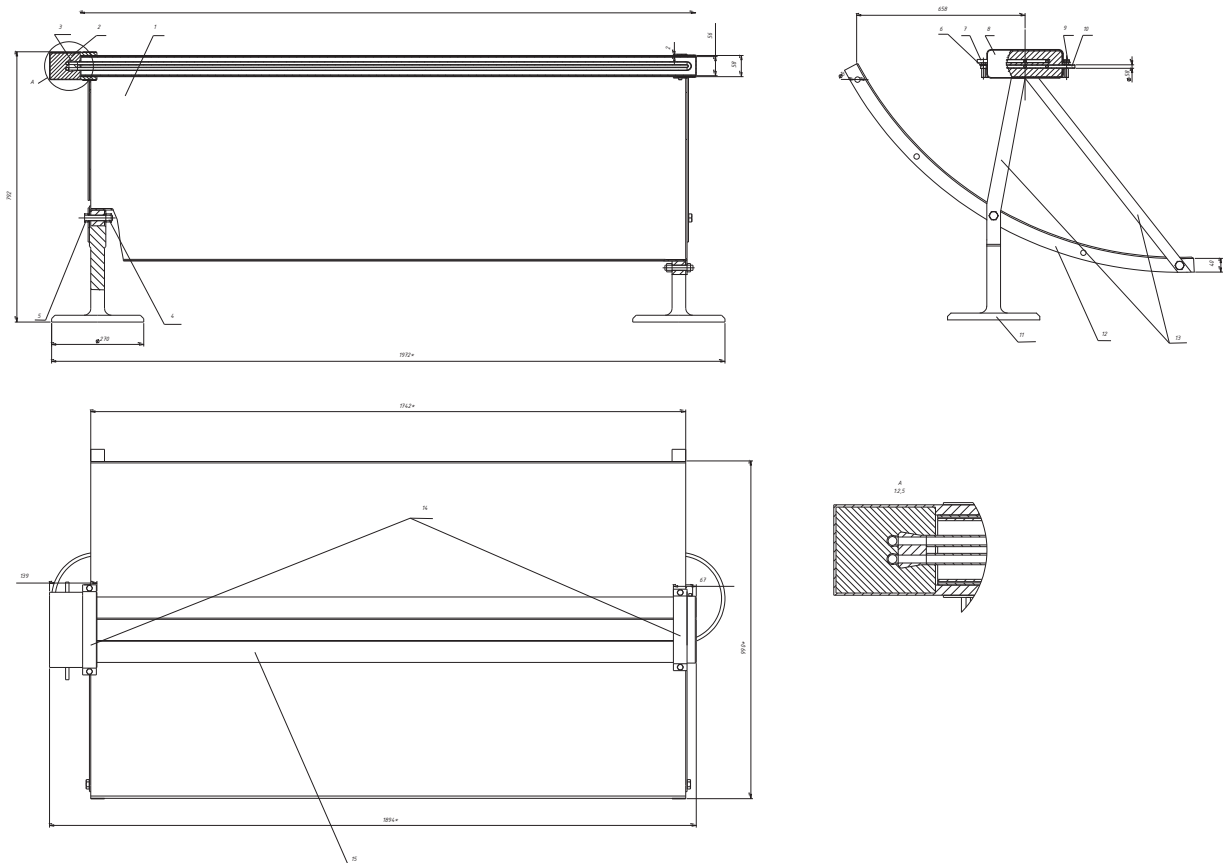


Рисунок 3.4 – Загальний вид сонячного концентратора для нагрівання води

Технічні характеристики

1. Площа поглинаючої поверхні 1,56 м
2. Кількість води, що заливається у колектор 10 л
3. Максимальний тиск робочої рідини у теплообміннику 0,7 МПа
4. Коефіцієнт корисної дії концентратора 46%

Висновки до третього розділу.

У третьому розділі сформульовано технічні вимоги до конструкції сонячного концентратора, здійснено вибір відповідних матеріалів для відбивної пове-

| | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата |
| | | | | |

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

52

рхні, несного каркаса та вузлів кріплення. Виконано розрахунок точного розміщення вакуумних трубок у фокальній лінії, що забезпечує ефективне поглинання сонячного випромінювання. Проведено попереднє 3D-моделювання конструкції, що підтвердило її функціональність та придатність до подальшого виготовлення. Розроблена система є технологічно доцільною, адаптованою до локальних умов експлуатації та придатною для використання в освітньому процесі або побуті.

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 53 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи було розроблено конструкцію параболоциліндричного концентратора для нагрівання води, в якій поєднано переваги геометричної концентрації сонячного випромінювання та високої теплової ефективності вакуумних трубок. Проведено огляд і аналіз сучасних систем сонячного водонагріву, визначено перспективи застосування таких установок в умовах України.

На основі теоретичних розрахунків побудовано модель концентратора, що дозволяє обрати оптимальні геометричні та теплотехнічні параметри. Запропоновано конструктивну схему і здійснено комп'ютерне моделювання пристрою, яке підтвердило ефективність та технологічну придатність обраного рішення.

Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень, удосконалення конструкції геліосистем, а також для створення навчально-демонстраційних установок.

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 54 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

Перелік джерел посилання

1. Скорук О.П. Перспективи розвитку відновлювальної енергетики в Україні // Економіка АПК. 2013. № 5. С. 63-66.
2. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: методичні рекомендації до лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі 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. – 203 с.
3. Яворський А.В., Ващишак І.Р. Нетрадиційні енергоресурси: конспект лекцій – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 164 с.
4. Романюк М. О., Крочук А. С., Пашук І. П. Оптика. Л.: ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. 564 с.
5. Попович В., Заводовська Н. Температурне поле скінченного термочутливого циліндра законвективного теплообміну з середовищами змінних температур. Вісник ТНТУ. 2013. Том 72. № 4. С. 252–260.
6. Сегментний концентратор випромінювання. Патент UA 97781 опубл.10.04.2015. Бюл. №7;
7. Андрійчук В. А. Дослідження енергетичного потенціалу сонячного випромінювання в Тернополі. Вісник ТНТУ. 2017. Том 85. № 1. С. 95–100.
8. Сонячний модуль зі стаціонарним параболо циліндричним концентратором: пат. UA 118295; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
9. Параболо циліндричний концентратор сонячної енергії: пат. UA 121837; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.
10. В. І. Сидоров, Вивільнення та концентрація відновлюваної енергії, Черкаси: Вертикаль, видавець Кандич С. Г., 2024, 476 с., ISBN 978-617-7957-21-7.
11. Студенець В.П., Славінська К.О. Чисельний розрахунок параметрів параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів для сонячної енергетичної установки на базі двигуна Стірлінга. Відновлювана енергетика. 2019. № 1. С.36-44.

12. Боярчук В., Сиротюк В., Гальчак В., Сиротюк С., Болтянський Б. Розробка експериментального стенда для дослідження ефективності застосування пристроїв, які слідкують за сонцем. Вісник Львівського НАУ : агроінженерні дослідження. 2013. №17. С. 286-293.

13. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник / В.М. Арсен'єв, С.С. Мелейчук. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 364 с.

14. Д.О. Пупков. Переносний параболоциліндричний сонячний нагрівач харчових продуктів. Одеська національна академія. Розділ 2. Енергетика та енергозбереження. с. 71-77.

15. Енергоефективні технології : навчальний посібник / А. С. Мандрика та ін. ; за заг. ред. А. С. Мандрики. – Суми: Сумський державний університет, 2021. – 330 с.

16. А.О. Kasych, Y.O. Lytvynenko. Factors for the development of alternative energy in modern conditions. Економіка і суспільство. 2017. №12. Р.93-99.

17. Danko V.M., S.V. Smutko., Polishchuk O.S. Розробка конструкції трекерної системи для сонячних панелей. Herald of Khmelnytskyi National University. 2017. №1. Р. 232-235.

18. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.

19. Форкун Я. Б. 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.

Додатки

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | БРМА 25.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 57 |
| Зм. | Арк. | №докум. | Підпис | Дата | | |

