

**Міністерство освіти і науки України**  
**Одеський національний технологічний університет**

Інститут Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнології та  
екоенергетики ім. В.С. Мартиновського  
Кафедра Нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики  
Ступінь вищої освіти Бакалавр  
Спеціальність 144 Теплоенергетика  
Освітня програма Енергетичний інжиніринг та енергоаудит



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**на тему:** Проект автономної системи термостабілізації на базі сонячних батарей

Здобувача

Шаповалова Данила  
В'ячеславовича

4 курсу  
Керівник

ТЕ-441 групи  
проф. Нікітін Дмитро  
Миколайович

Консультанти:

проф. Басюркіна Н.І.  
доц. Кологривов М.М.

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від  
В.О. завідувача  
кафедрою НТІТ

від 10 червня 2026 року

протокол № 12

Олександр ТІТЛОВ

(підпис)

Одеса – 2026 рік

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнології та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського
Кафедра	Нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики
Ступінь вищої освіти	Бакалавр
Спеціальність	144 Теплоенергетика
Освітня програма	Енергетичний інжиніринг та енергоаудит

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри НТІТ  
Тітлов О.С.

02 лютого 2026 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Шаповалов Данило В'ячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): «Проект автономної системи термостабілізації на базі сонячних батарей».

керівник проекту (роботи): Нікітін Дмитро Миколайович, доктор технічних наук, професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

наук, професор

затверджені наказом вищого навчального закладу від 30.01.2026 р., № 51-03

2. Строк подання студентом проекту (роботи): 02.06.2026

3. Вихідні дані до (роботи): фермерська теплиця площею 100 м<sup>2</sup> (довжина 20 м, ширина 5 м); місцезнаходження – м. Одеса; розрахункова температура зовнішнього повітря взимку мінус 15 °С; розрахункова температура внутрішнього повітря 20 °С; необхідна теплова потужність 30 кВт; наявність автономної сонячної електростанції типу Off-Grid; використання інверторного теплового насоса типу «повітря-повітря» та пластинчастого рекуператора повітря.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: провести аналіз існуючих методів підтримання мікроклімату в теплицях; розрахувати тепловий баланс теплиці для визначення необхідної теплової потужності; здійснити вибір основного обладнання (тепловий насос, сонячні панелі, акумулятори, інвертор); виконати тепловий та конструктивний розрахунок пластинчастого рекуператора; провести оцінку економічної ефективності автономної системи; розробити комплекс заходів з охорони праці та пожежної безпеки під час монтажу та експлуатації.

5. Перелік графічного матеріалу: а) загальна принципова схема роботи теплиці на основі сонячних батарей; б) принципова схема роботи пластинчастого рекуператора; в) конструктивне креслення рекуперативного теплообмінника.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання видав
Економіка	Басюркіна Н.І., професор		
Охорона праці	Нікітін Д.М., професор		
Н. контроль	Кологривов М.М., доцент		

7. Дата видачі завдання 02.02.2026

Керівник

\_\_\_\_\_ Нікітін Д.М.  
(підпис)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_ Шаповалов Д.В.  
(підпис)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел, методик розрахунків, підготовка структури роботи	01.03-10.03.26	
2	Підготовка теоретичного розділу роботи	11.03-21.03.26	
3	Підготовка проєктного розділу роботи	22.03-22.04.26	
4	Підготовка розділу з охорони праці	23.04-30.04.26	
5	Підготовка економічного розділу	01.05-07.05.26	
6	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	08.05-11.05.26	
7	Підготовка графічної частини роботи	12.05-23.05.26	
8	Підготовка презентації та доповіді	24.05-31.05.26	
9	Відгук керівника, рецензування, підготовка до захисту кваліфікаційної роботи	01.06-08.06.26	

Здобувач-дипломник

\_\_\_\_\_ Шаповалов Д.В.  
(підпис)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Нікітін Д.М.  
(підпис)

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.*

*Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач-дипломник

\_\_\_\_\_ Шаповалов Данило В'ячеславович

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з: 71 сторінок тексту, 11 рисунків, 9 таблиць, 12 посилань на літературні джерела.

Об'єкт дослідження – процеси забезпечення та підтримання температурного режиму (термостабілізації) в автономних приміщеннях закритого ґрунту (теплицях).

Мета роботи – розробка проєкту автономної системи термостабілізації теплиці на базі сонячних батарей з використанням теплонасосного обладнання та рекуперативного теплообмінника для забезпечення оптимального мікроклімату при мінімальних витратах традиційної енергії.

У роботі проведено аналіз сучасних методів термостабілізації та обґрунтовано переваги використання відновлюваних джерел енергії. Виконано теплотехнічний розрахунок огорожувальних конструкцій теплиці площею 100 м<sup>2</sup> для кліматичних умов м. Одеса. Розраховано необхідну теплову потужність (30 кВт) та підібрано інверторний тепловий насос «повітря-повітря».

Для забезпечення енергетичної автономності розраховано параметри сонячної електростанції (Off-Grid) потужністю 77 кВт та блок акумуляторних батарей ємністю понад 3000 А · год. З метою зниження енергоспоживання спроектовано пластинчастий рекуператор повітря, що забезпечує повернення 1,92 кВт тепла.

Техніко-економічний аналіз показав, що проєкт потребує інвестицій у розмірі 1,31 млн. грн. та має термін окупності 2,54 роки. Розроблено заходи з охорони праці та пожежної безпеки.

Ключові слова: ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЯ, ТЕПЛИЦЯ, СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ, ТЕПЛОВИЙ НАСОС, РЕКУПЕРАТОР, ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНІСТЬ, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

## ABSTRACT

The qualification work consists of: 71 pages of text, 11 figures, 9 tables, 12 references to literary sources.

The object of research is the processes of providing and maintaining the temperature regime (thermal stabilization) in autonomous indoor premises (greenhouses).

The goal of the work is to develop a project for an autonomous thermal stabilization system for a greenhouse based on solar panels using heat pump equipment and a recuperative heat exchanger to ensure an optimal microclimate with minimal consumption of traditional energy.

The paper analyzes modern methods of thermal stabilization and substantiates the advantages of using renewable energy sources. A thermal engineering calculation of the building envelopes of a 100 m<sup>2</sup> greenhouse for the climatic conditions of Odesa was performed. The required heating capacity (30 kW) was calculated and an air-to-air inverter heat pump was selected.

To ensure energy autonomy, the parameters of an Off-Grid solar power plant with a capacity of 77 kW and a battery storage unit with a capacity of more than 3000 Ah were calculated. In order to reduce energy consumption, a plate air recuperator was designed, which provides 1.92 kW of heat recovery.

Technical and economic analysis showed that the project requires investments in the amount of 1.31 million UAH and has a payback period of 2.54 years. Occupational health and safety and fire safety measures have been developed.

Key words: THERMAL STABILIZATION, GREENHOUSE, SOLAR PANELS, HEAT PUMP, RECUPERATOR, ENERGY INDEPENDENCE, THERMAL ENERGY ENGINEERING, ECONOMIC EFFICIENCY.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ .....	5
ABSTRACT.....	6
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНИХ ОБ'ЄКТІВ .....	10
1.1. Аналіз методів підтримання мікроклімату в теплицях .....	10
1.2. Використання теплових насосів як термотрансформаторів для систем мікроклімату .....	13
1.3. Сонячні фотоелектричні системи як джерело енергоживлення .....	17
1.4. Рекуперація тепла у системах вентиляції.....	22
1.5. Постановка задачі на проєктування .....	26
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТА ПІДБОРУ ОБЛАДНАННЯ .....	29
2.1. Вихідні дані та геометричні характеристики об'єкта .....	29
2.2. Методика розрахунку теплових втрат у холодний період року .....	29
2.3. Методика розрахунку теплонадходжень у теплий період .....	31
2.4. Методика розрахунку потужності системи термостабілізації .....	31
2.5. Вихідні дані та розрахунок теплових навантажень теплиці .....	32
2.5.1. Вихідні дані .....	32
2.5.2. Результати розрахунку теплових навантажень теплиці .....	34
2.6. Розрахунок та підбір сонячних фотоелектричних панелей і акумуляторних батарей .....	37
2.6.1. Визначення добового енергоспоживання .....	37
2.6.2. Розрахунок масиву сонячних панелей .....	38
2.6.3. Розрахунок ємності акумуляторних батарей (АКБ).....	40
2.6.4. Аналіз динаміки енергоспоживання та добового балансу системи	42
2.7. Висновок до розділу .....	44
РОЗДІЛ 3. ТЕПЛОВИЙ ТА КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІННИКА .....	46
3.1. Вихідні дані для розрахунку теплообмінника .....	46

3.2. Тепловий розрахунок апарату.....	46
3.3. Визначення коефіцієнта теплопередачі та площі поверхні нагрівання .	47
3.4. Конструктивний розрахунок рекуператора.....	49
3.4.1. Геометрія теплообмінних поверхонь та оребрення каналів.....	50
3.5. Оптимізація параметрів рекуператора та підбір тягово-технічного обладнання.....	52
3.6. Аналіз процесу конденсації та система відведення вологи .....	53
3.7. Висновок до розділу.....	54
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ .....</b>	<b>56</b>
4.1. Загальні положення та SWOT-аналіз проєкту.....	56
4.2. Розрахунок капітальних інвестицій (CAPEX) .....	58
4.3. Розрахунок експлуатаційної економії (OPEX) та терміну окупності ....	60
4.4. Висновок до розділу.....	61
<b>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ .....</b>	<b>62</b>
5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	62
5.2. Електробезпека при роботі з фотоелектричними системами .....	62
5.3. Безпека при експлуатації теплового насоса та посудин під тиском .....	63
5.4. Методи визначення місць витоків холодительного агента (фреону) .....	64
5.4.1 Виявлення витoku за допомогою мильного розчину .....	64
5.4.2 Метод перевірки системи під тиском (опресування азотом).....	65
5.4.3 Метод проникаючого ультрафіолетового барвника.....	65
5.4.4 Електронні течішукачі .....	66
5.5. Пожежна профілактика .....	66
5.6. Виробнича санітарія.....	67
5.7. Висновок до розділу.....	67
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>68</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>70</b>

## ВСТУП

В умовах постійного зростання вартості традиційних енергоносіїв та погіршення екологічної ситуації, питання переходу на відновлювані джерела енергії набуває критичного значення для сучасної теплоенергетики. Для об'єктів, які потребують цілорічного підтримання заданого мікроклімату (наприклад, сучасних теплиць), використання автономних систем є одним із найперспективніших рішень. Воно дозволяє не лише забезпечити енергетичну незалежність об'єкта, а й суттєво знизити загальні експлуатаційні витрати.

Одним з найбільш ефективних способів реалізації такого підходу є використання сонячних батарей у комбінації з тепловим насосом та системами рекуперації тепла. Замість того, щоб спалювати органічне паливо або використовувати дорогу електроенергію з мережі, ми можемо перетворити безкоштовну сонячну енергію на електричну, яка і буде живити кліматичне обладнання.

Переді мною стоїть завдання розробки проєкту такої автономної системи термостабілізації. Забезпечення необхідного температурного режиму об'єкта можна здійснити кількома способами:

1. Локальний підігрів або охолодження найбільш критичних зон (наприклад, безпосередньо ґрунту або робочих місць).
2. Повна термостабілізація всього об'єму приміщення з інтеграцією системи вентиляції.

Оскільки чітких вихідних даних щодо розмірів чи стану існуючої будівлі немає, найбільш доцільно прийняти, що об'єкт знаходиться на стадії проєктування. Це дозволяє від початку закласти в проєкт правильну теплоізоляцію та оптимальні інженерні рішення.

Термостабілізація передбачає підтримання стану повітря відповідно до встановлених норм. Тому розроблена автономна система має гарантовано забезпечувати всередині приміщення температуру на рівні 18 – 22 °С, оптимальну відносну вологість та необхідний повітрообмін, незалежно від коливань зовнішніх погодних умов.

# РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНИХ ОБ'ЄКТІВ

## 1.1. Аналіз методів підтримання мікроклімату в теплицях

Історично розвиток споруд захищеного ґрунту пройшов тривалий шлях від примітивних укриттів до високотехнологічних автоматизованих комплексів. Перші згадки про вирощування рослин у штучно створеному мікрокліматі датуються ще часами Римської імперії, де використовувалися так звані «sresularia» – приміщення з вікнами зі слюди, які підігрівалися вогнем. Проте справжній розквіт тепличних технологій розпочався у XVII-XVIII століттях в Європі з появою оранжерей, де використовувалося скління.



Рис. 1.1. Основні типи конструкцій сучасних фермерських теплиць (<https://fieldreport.caes.uga.edu/publications/B910/hobby-greenhouses/>)

На сучасному етапі розвитку теплоенергетики теплиці розглядаються не просто як сільськогосподарські об'єкти, а як складні теплотехнічні системи. Глобальна тенденція «Green Deal» та перехід до сталого розвитку диктують нові вимоги: відмова від викопного палива та перехід до вуглецево-нейтральних технологій. В агропромисловому секторі це означає пошук рішень, які дозволяють підтримувати життєдіяльність рослин без спалювання газу чи вугілля, що особливо актуально для України в контексті енергетичної безпеки.

Складність завдання термостабілізації теплиці полягає в тому, що цей об'єкт має надзвичайно малу теплову інерцію через світлопрозорі огороження. На відміну від капітальних будівель, теплиця миттєво реагує на зміну сонячної активності та температури зовнішнього повітря. Це вимагає від інженерних систем високої динамічності та точності керування. Основними чинниками, що формують мікроклімат, є:

- Радіаційний режим: надходження прямої та розсіяної сонячної радіації.
- Тепловий режим: баланс між теплонадходженнями та тепловтратами.
- Повітрообмін: необхідність видалення надлишкової вологи та подачі  $CO_2$  для фотосинтезу.

Традиційні підходи, описані далі, поступово вичерпують свій потенціал через низьку енергоефективність, що спонукає до впровадження термотрансформаторів та систем на базі відновлюваної енергії.

На сьогодні ж тепличне господарство є одним із найбільш енергоємних секторів агропромислового комплексу. Для забезпечення цілорічного вирощування сільськогосподарських культур необхідно підтримувати строго визначені параметри мікроклімату: температуру повітря та ґрунту, відносну вологість, рухливість повітряних мас та газовий склад. Відхилення цих параметрів від нормативних значень призводить до

уповільнення росту рослин, розвитку захворювань та суттєвого зниження врожайності.

Головним завданням системи термостабілізації теплиці є компенсація теплових втрат у холодний період року (опалення) та відведення надлишкового тепла від сонячної радіації у теплий період (охолодження та вентиляція).

Традиційно для опалення теплиць застосовують такі системи:

- Водяне опалення. Найбільш поширений метод, при якому теплоносії (гаряча вода) циркулює по трубах, розміщених по периметру теплиці, під дахом або безпосередньо в ґрунті. Джерелом тепла зазвичай виступають газові або твердопаливні котли. Недоліками такої системи є висока металоємність, значна теплова інерція та постійна залежність від постачання викопного палива, вартість якого невпинно зростає.
- Повітряне опалення. Здійснюється за допомогою теплогенераторів або калориферів, які нагрівають повітря і нагнітають його в приміщення вентиляторами. Цей метод дозволяє швидко підняти температуру, але має суттєві мінуси: він сильно пересушує повітря (що шкодить більшості рослин) та створює нерівномірні температурні зони.
- Електричне опалення (кабельне або інфрачервоне). Забезпечує високу точність регулювання температури та простоту автоматизації. Інфрачервоні обігрівачі нагрівають безпосередньо рослини та ґрунт, а не об'єм повітря. Однак використання електроенергії з централізованої мережі робить цей вид опалення економічно найменш вигідним для великих об'єктів.

Для охолодження та вентиляції у теплий період року застосовують:

- Природну вентиляцію (аерацію). Відбувається за рахунок відкривання вентиляційних отворів на даху та стінах. Це найдешевший спосіб, але він неефективний у спекотну безвітряну погоду і не дозволяє точно контролювати температуру.

- Примусову вентиляцію. Використовуються витяжні та припливні вентилятори.
- Системи випарувального охолодження. Повітря проходить через спеціальні зволожені касети, охолоджуючись за рахунок випаровування води. Недолік – значне споживання електроенергії вентиляторами та насосами, а також підвищення вологості повітря до критичних позначок.

Таким чином аналіз традиційних систем показує, що всі вони мають спільний критичний недолік – тотальну залежність від зовнішніх енергетичних мереж (газопроводів або ліній електропередач). З урахуванням сучасних тенденцій до подорожання енергоресурсів, використання класичних котлів або мережевих кондиціонерів робить продукцію теплиць неконкурентоспроможною.

Ця проблема диктує гостру необхідність пошуку та впровадження альтернативних, автономних методів термостабілізації. Найбільш перспективним напрямком є відмова від прямого спалювання палива на користь трансформації теплової енергії навколишнього середовища (теплові насоси) з використанням відновлюваних джерел енергії (сонячні батареї).

## **1.2. Використання теплових насосів як термотрансформаторів для систем мікроклімату**

Вирішення проблеми енергоефективної термостабілізації автономних об'єктів лежить у площині використання теплових насосів. З точки зору термодинаміки, тепловий насос відноситься до класу теплових трансформаторів (ТТ).

Тепловий трансформатор – це установка, у якій здійснюється перенесення енергії від джерела з відносно низькою температурою до джерела з відносно високою температурою за допомогою робочої речовини (холодоагенту) і витрат зовнішньої енергії. Залежно від цільового призначення, якщо тепловий трансформатор служить переважно для виробництва холоду, він називається холодильником, якщо для виробництва тепла – тепловим

насосом, а якщо виконує обидві функції – кондиціонером. Саме остання функція є ключовою для систем термостабілізації теплиць.

В основі роботи будь-якого парокомпресійного теплового насоса лежить зворотний цикл Карно, теоретично обґрунтований ще у ХІХ столітті. Проте ідея використання холодильної машини для цілей опалення вперше була сформульована Вільямом Томсоном (лордом Кельвіном) у 1852 році. Він назвав такий пристрій «множником тепла», вказавши на те, що робота, витрачена на стиснення газу, дозволяє «перекачати» набагато більшу кількість енергії з навколишнього середовища.

З точки зору класичної термодинаміки, тепловий насос реалізує процес трансформації низькопотенційного тепла (енергія повітря, ґрунту або води) у високе, придатне для опалення. Ефективність цього процесу критично залежить від різниці температур між джерелом тепла та споживачем. Чим менша ця різниця, тим вищим буде коефіцієнт перетворення (COP).

Еволюція робочих тіл (холодоагентів). Для теплоенергетики важливим аспектом є вибір робочого тіла, що циркулює в контурі. Історично перші машини працювали на ефірі, аміаку або діоксиді сірки. У середині ХХ століття широкого поширення набули хлорфторвуглеці (фреони), проте через їх руйнівний вплив на озоновий шар (згідно з Монреальським протоколом) вони були замінені на більш безпечні сполуки.

- R410A: сучасний стандарт для систем "повітря-повітря", що характеризується високою холодопродуктивністю та стабільністю.
- R32: перспективний холодоагент з низьким потенціалом глобального потепління (GWP), який забезпечує на 5 – 10 % вищу енергоефективність порівняно з попередниками.

Використання саме інверторних компресорів у сучасних теплових насосах дозволяє плавно регулювати частоту обертів двигуна. Це дає змогу системі не вимикатися при досягненні потрібної температури, а лише знижувати потужність, що економить до 30-40 % електроенергії та значно подовжує термін служби обладнання».

За принципом організації роботи найбільш поширеними у світовій практиці є термомеханічні компресійні машини. Робота парокомпресійного теплового насоса базується на зворотному термодинамічному циклі Карно. Основний принцип полягає не у прямій генерації теплової енергії (як у випадку зі спалюванням газу чи роботою електричних ТЕНів), а в її перенесенні з одного середовища в інше.

Основні елементи парокомпресійного циклу:

- Випарник: рідкий холодоагент при низькому тиску та температурі поглинає тепло з навколишнього середовища (наприклад, з вуличного повітря) і переходить у газоподібний стан.
- Компресор: стискає газоподібний холодоагент, внаслідок чого його тиск і температура різко зростають. На цей процес витрачається електрична енергія.
- Конденсатор: гарячий стиснений газ віддає тепло внутрішньому середовищу теплиці (нагріваючи повітря або воду), конденсується і знову стає рідиною.
- Дросельний (регулюючий) вентиль: знижує тиск і температуру рідкого холодоагенту перед його поверненням у випарник, замикаючи цикл.

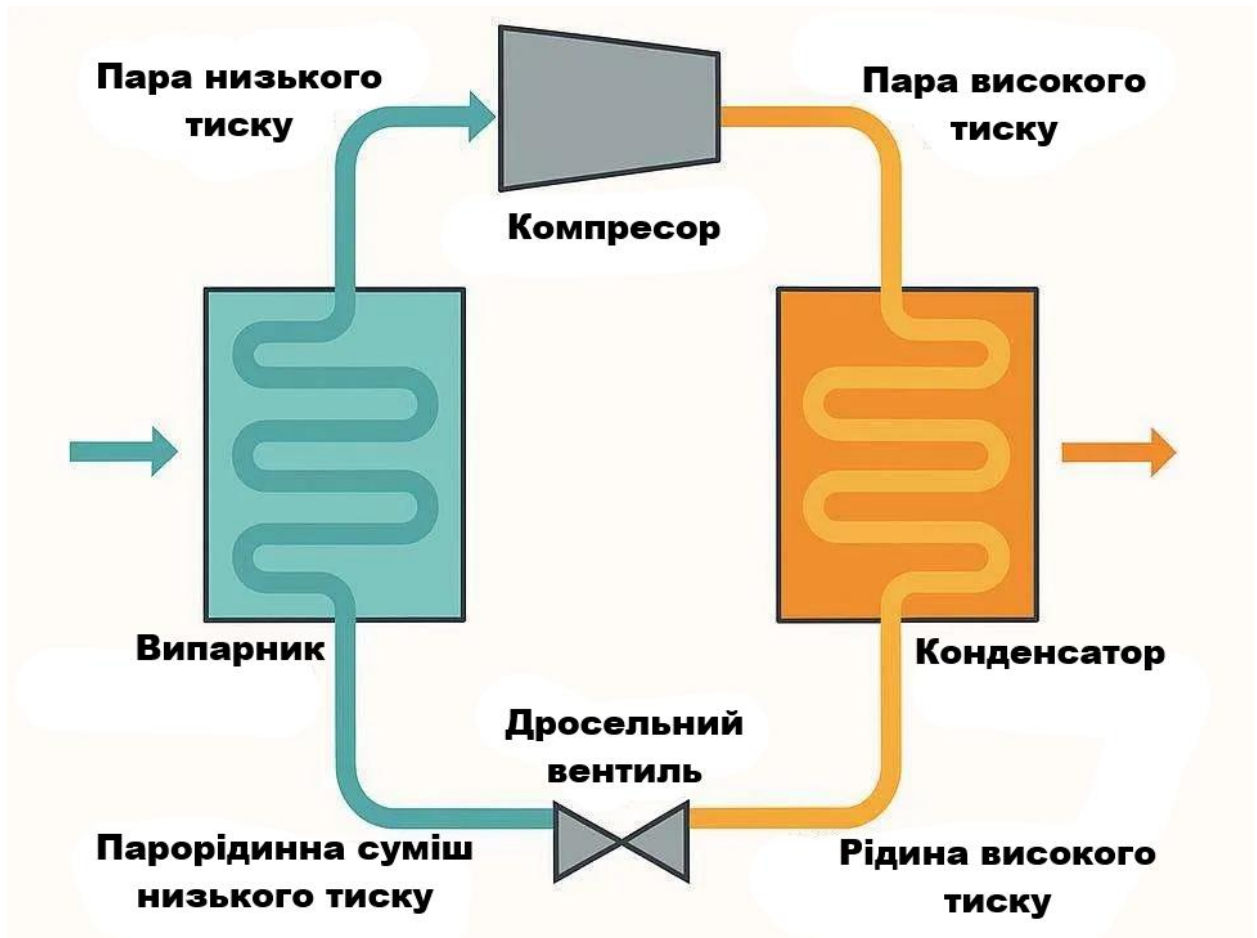


Рис. 1.2. Принципова схема парокompресійного теплового насоса  
[\(https://standard-tech.it/en/refrigeration-cycle/\)](https://standard-tech.it/en/refrigeration-cycle/)

Головною перевагою теплових насосів є їх висока енергетична ефективність, яка виражається коефіцієнтом перетворення (COP – Coefficient of Performance). У сучасних системах коефіцієнт перетворення становить від 3 до 5. Це означає, що витративши 1 кВт електричної енергії на роботу компресора, система здатна перенести в приміщення від 3 до 5 кВт теплової енергії з навколишнього середовища.

За типом джерела низькопотенційного тепла та теплоносія теплові насоси класифікують на:

- «Ґрунт-вода» (геотермальні): використовують стабільну температуру ґрунту. Мають найвищий та найстабільніший коефіцієнт перетворення протягом року, але потребують дорогих і

масштабних земляних робіт (буріння свердловин або укладання горизонтальних контурів), що часто є економічно недоцільним для невеликих фермерських теплиць.

- «Повітря-вода»: відбирають тепло з вуличного повітря і передають його в систему водяного опалення (труби, радіатори, теплі підлоги). Простіші в монтажі, але ефективність знижується при сильних морозах.
- «Повітря-повітря»: працюють за принципом реверсивного кондиціонера, відбираючи тепло з вулиці та безпосередньо нагріваючи повітря всередині приміщення. Ця система відрізняється найнижчими капітальними витратами, швидким монтажем та високою динамікою нагріву або охолодження, що робить її оптимальною для приміщень з малим тепловим опором стінок, такі як світлопрозорі конструкції теплиць.

Ще однією критично важливою властивістю теплових насосів для цілей термостабілізації є їх здатність до реверсивної роботи. Завдяки наявності чотириходового клапана, система може змінювати напрямок руху холодоагенту. У теплий період року випарник і конденсатор міняються ролями: установка починає забирати надлишкове тепло зсередини теплиці та скидати його в навколишнє середовище, працюючи в режимі охолодження.

Таким чином, використання парокомпресійних теплових насосів дозволяє комплексно вирішити задачу термостабілізації об'єкта протягом усього року, використовуючи один і той самий комплект обладнання. Проте, для забезпечення повної автономності такого комплексу, необхідне стабільне та незалежне джерело електричної енергії для приводу компресора.

### **1.3. Сонячні фотоелектричні системи як джерело енергоживлення**

Для забезпечення роботи компресійного теплового насоса та допоміжного обладнання (вентиляторів, насосів, автоматики) в автономному

режимі необхідне надійне джерело електричної енергії. В умовах півдня України, зокрема Одеського регіону, найбільш ефективним рішенням є використання фотоелектричних систем (ФЕС), оскільки рівень сонячної інсоляції тут є одним з найвищих у країні.

Сонячні фотоелектричні системи здійснюють пряме перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію постійного струму за допомогою напівпровідникових фотоелементів (сонячних панелей).

Фундаментом сучасної сонячної енергетики є фотоелектричний ефект, явище прямого перетворення світла на електрику. Вперше цей ефект був відкритий у 1839 році французьким фізиком Александром Едмоном Беккерелем під час експериментів з електролітичною коміркою. Проте теоретичне обґрунтування цього явища, а саме зовнішнього фотоефекту, було здійснене лише у 1905 році Альбертом Ейнштейном (за що він згодом отримав Нобелівську премію), який описав світло як потік квантів (фотонів). Перша ж практична кремнієва сонячна батарея була створена у 1954 році в лабораторіях Bell Labs (США), що стало відправною точкою для комерційної сонячної енергетики.

З інженерної точки зору, робота сучасної сонячної панелі базується на властивостях напівпровідників, найчастіше – кремнію (Si). Кремнієва пластина складається з двох шарів з різною провідністю: n-типу (з надлишком електронів) та p-типу (з «дірками» – нестачею електронів). На межі їхнього контакту утворюється так званий p-n перехід. Коли фотони сонячного світла потрапляють на поверхню панелі, вони передають свою енергію електронам кремнію. Якщо енергія фотона достатня, електрон "вибивається" зі своєї орбіти, долає p-n перехід і створює спрямований рух заряджених частинок, тобто постійний електричний струм.

Важливим експлуатаційним параметром фотомодулів є їхній температурний коефіцієнт. Парадоксально, але для більшості панелей підвищення температури їхньої поверхні вище стандартних тестових умов (STC, 25 °C) призводить до зниження генерації. Нагрівання напівпровідника

збільшує опір кристалічної решітки, що знижує напругу холостого ходу і, як наслідок, загальну потужність модуля. Саме тому забезпечення природної або штучної вентиляції тильної сторони сонячних панелей є важливою задачею при їх монтажі на дахах теплиць.

На сучасному ринку представлено три основні покоління та типи сонячних панелей, які суттєво відрізняються за технологією виробництва, ефективністю та сферою застосування:

- Монокристалічні кремнієві панелі (Mono-Si): виготовляються з єдиного кристала чистого кремнію, вирощеного за методом Чохральського. Їх легко впізнати за однорідним темним (майже чорним) кольором та заокругленими кутами комірок. Вони мають найвищий коефіцієнт корисної дії (ККД) серед комерційних моделей і найкраще працюють в умовах прямого сонячного випромінювання.
- Полікристалічні кремнієві панелі (Poly-Si): виготовляються шляхом контрольованого охолодження розплавленого кремнію, в результаті чого утворюється структура з багатьох дрібних кристалів. Мають характерний синій колір з видимими гранями кристалів. Технологія їх виробництва дешевша, проте і ККД таких модулів нижчий.
- Тонкоплівкові (аморфні) панелі (Thin-film/a-Si): створюються шляхом нанесення тонкого шару фотоелектричного матеріалу на скло, пластик або метал. Вони гнучкі, найдешевші у виробництві і найменш чутливі до нагрівання та затінення (добре працюють у похмуру погоду), але мають найнижчий ККД, що вимагає величезних площ для досягнення потрібної потужності.

Для наочності, порівняльні характеристики основних типів фотомодулів зведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика основних типів сонячних панелей

Характеристика	Монокристалічні (Mono-Si)	Полікристалічні (Poly-Si)	Тонкоплівкові (a-Si)
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	17-22 %	15-18 %	7-12 %
Температурний коефіцієнт втрати потужності	Низький (мінус 0,35 % / °C)	Середній (мінус 0,40 % / °C)	Дуже низький (мінус 0,20 % / °C)
Ефективність у похмуру погоду	Середня	Задовільна	Висока
Вимоги до площі монтажу	Мінімальні	Середні	Максимальні
Орієнтовний термін експлуатації	25-30 років	20-25 років	10-15 років
Відносна вартість	Висока	Середня	Низька

Враховуючи обмеженість вільної площі навколо тепличного комплексу та необхідність максимізації генерації енергії з кожного квадратного метра, для даного проєкту найбільш доцільним є використання саме монокристалічних сонячних панелей останнього покоління (наприклад, з технологіями PERC або Half-Cell). Вони забезпечать необхідну електричну потужність для роботи компресора теплового насоса при мінімальних габаритах масиву.

За принципом роботи та взаємодії з зовнішніми мережами ФЕС поділяються на три типи:

- Мережеві (On-Grid): Вся вироблена енергія передається в загальну мережу (часто за «Зеленим тарифом»). Акумулятори відсутні. При зникненні напруги в зовнішній мережі така станція також

вимикається з міркувань безпеки. Для автономного живлення цей тип не підходить.

- Автономні (Off-Grid): Працюють ізольовано від зовнішньої мережі. Обов'язково включають акумуляторні батареї (АКБ) для накопичення енергії вдень та її використання вночі. Це єдиний варіант для об'єктів, віддалених від інженерних комунікацій.
- Гібридні: Поєднують функції обох типів, можуть як подавати енергію в мережу, так і працювати автономно від АКБ при аваріях.

Для проєкту автономної теплиці обирається схема Off-Grid. До її складу

входять:

- Фотоелектричні модулі (сонячні панелі): Генерують постійний струм. Найбільш поширеними є монокристалічні панелі (вищий ККД, краща робота в похмуру погоду) та полікристалічні (дешевші, але потребують більшої площі).
- Контролер заряду: Регулює струм та напругу, що надходять від панелей до акумуляторів, запобігаючи перезаряду та глибокому розряду.
- Акумуляторні батареї (АКБ): Критично важливий елемент для системи термостабілізації. Оскільки пікове навантаження на опалення припадає на нічний час (коли генерація відсутня), ємність АКБ має забезпечувати роботу теплового насоса протягом усієї ночі та похмурих днів. Сучасним стандартом є літій-залізо-фосфатні акумулятори, які мають великий ресурс циклів заряд-розряд.
- Інвертор: Перетворює постійний струм (DC) напругою 12/24/48В від акумуляторів у змінний струм (AC) 220В/50Гц, необхідний для живлення компресора теплового насоса.



Рис. 1.3. Структурна схема автономної сонячної електростанції (Off-Grid)

([https://rimstar.org/renewnrg/off\\_grid\\_solar\\_power\\_systems.htm](https://rimstar.org/renewnrg/off_grid_solar_power_systems.htm))

Головним викликом при проектуванні такої системи є дотримання енергетичного балансу: масив сонячних панелей повинен мати достатню потужність, щоб за короткий зимовий світловий день встигнути не лише жити поточні навантаження, а й повністю зарядити блок акумуляторів на ніч.

#### 1.4. Рекуперація тепла у системах вентиляції

Окрім опалення, важливою складовою мікроклімату теплиці є вентиляція, яка забезпечує надходження свіжого повітря, необхідного для фотосинтезу рослин, та регулювання вологості. У класичних системах вентиляції взимку холодне вуличне повітря подається всередину, а тепле внутрішнє повітря викидається назовні. Це призводить до колосальних теплових втрат, які можуть складати до 40-50 % від загального теплового навантаження на систему опалення.

Для вирішення цієї проблеми застосовують технологію рекуперації тепла. Рекуператор – це теплообмінний апарат поверхневого типу, в якому

відбувається теплообмін між двома потоками повітря без їх змішування. Тепле витяжне повітря, проходячи через теплообмінник, віддає своє тепло стінкам каналів, які, в свою чергу, нагрівають холодне припливне повітря.

Процес передачі теплоти в пластинчастому рекуператорі повітря є класичним прикладом складного теплообміну, який включає в себе конвекцію та теплопровідність. З точки зору теплофізики, рушійною силою цього процесу є різниця температур між гарячим витяжним повітрям (теплоносій 1) та холодним припливним вуличним повітрям (теплоносій 2).

Процес теплопередачі через плоску стінку рекуператора відбувається у три послідовні стадії:

- Тепловіддача конвекцією від гарячого повітря до поверхні розділювальної пластини. Цей процес описується законом Ньютона-Ріхмана, згідно з яким тепловий потік пропорційний площі поверхні, різниці температур та коефіцієнту тепловіддачі ( $\alpha_1$ ), який сильно залежить від швидкості руху повітря та режиму його течії (турбулентний чи ламінарний).
- Теплопровідність крізь матеріал самої пластини. Описується законом Фур'є. Інтенсивність передачі тепла тут залежить від товщини пластини ( $\delta$ ) та коефіцієнта теплопровідності матеріалу ( $\lambda$ ).
- Тепловіддача конвекцією від другої поверхні пластини до холодного припливного повітря (з коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha_2$ ).

Загальна інтенсивність цього комплексного процесу характеризується коефіцієнтом теплопередачі ( $k$ ). Оскільки повітря має дуже низькі коефіцієнти тепловіддачі порівняно з рідинами, саме термічний опір на межі «повітря-стінка» є лімітуючим фактором у повітряних рекуператорах. Тому для інтенсифікації теплообміну виробники часто роблять поверхню пластин ребристою або гофрованою, що штучно турбулізує потік і збільшує площу контакту.

Ефективність, довговічність та санітарна безпека системи рекуперації критично залежать від вибору матеріалу теплообмінних пластин. Для об'єктів сільськогосподарського призначення (теплиць) цей вибір ускладнюється специфічними умовами експлуатації: високою відносною вологістю витяжного повітря, наявністю конденсату та спор грибків.

Розглянемо основні матеріали, що застосовуються у сучасному виробництві пластинчастих рекуператорів:

- Мідь. Має найвищий коефіцієнт теплопровідності серед доступних металів. Забезпечує ідеальний теплообмін, проте має ряд суттєвих недоліків: дуже високу вартість, велику питому вагу та схильність до інтенсивного окислення у вологому середовищі.
- Алюміній. Є «золотим стандартом» для промислових та напівпромислових систем вентиляції. Має відмінну теплопровідність, малу вагу та порівняно невисоку вартість. Завдяки природній оксидній плівці алюміній стійкий до корозії. Він не вбирає вологу і запахи, а конденсат легко відводиться з його поверхні, що робить його ідеальним для теплиць.
- Полімерні матеріали (пластики). Дешеві у виробництві, абсолютно не схильні до корозії, легкі. Проте їхня теплопровідність у сотні разів нижча за метали. Щоб компенсувати цей недолік, виробники роблять пластикові стінки надзвичайно тонкими, що знижує їхню механічну міцність.
- Спеціальна целюлоза (ентальпійні рекуператори). Здатні пропускати крізь себе не лише тепло, а й молекули води. Вони повертають вологу назад у приміщення, не утворюючи рідкого конденсату. Це чудове рішення для житлових квартир, де взимку пересихає повітря, але категорично неприйнятне для теплиць, оскільки целюлоза може стати середовищем для розмноження цвілі та патогенної мікрофлори, а зайва волога у теплиці призводить до хвороб рослин.

Таблиця 1.2 – Характеристика матеріалів для пластинчастих рекуператорів

Матеріал пластин	Коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda$ ), Вт/(м · К)	Стійкість до корозії та конденсату	Санітарна безпека (для теплиць)	Відносна вартість
Мідь	390-400	Задовільна (окислюється)	Висока	Дуже висока
Алюміній	200-300	Висока	Висока	Середня
Полімери	0,2-0,5	Абсолютна	Висока	Низька
Целюлоза (папір)	0,05-0,1	Низька (розкисає у воді)	Низька (ризик грибків)	Низька

За конструкцією рекуператори поділяються на:

- Роторні: Мають обертовий барабан. Високоєфективні, але складні в обслуговуванні та допускають часткове змішування потоків (повернення запахів або спор грибків назад у приміщення), що небажано для теплиць.
- Пластинчасті: Складаються з пакету тонких пластин (металевих або полімерних), що утворюють систему каналів. Потоки повітря рухаються перехресно або протитечією. Вони прості, надійні, дешеві та виключають перемішування повітря.

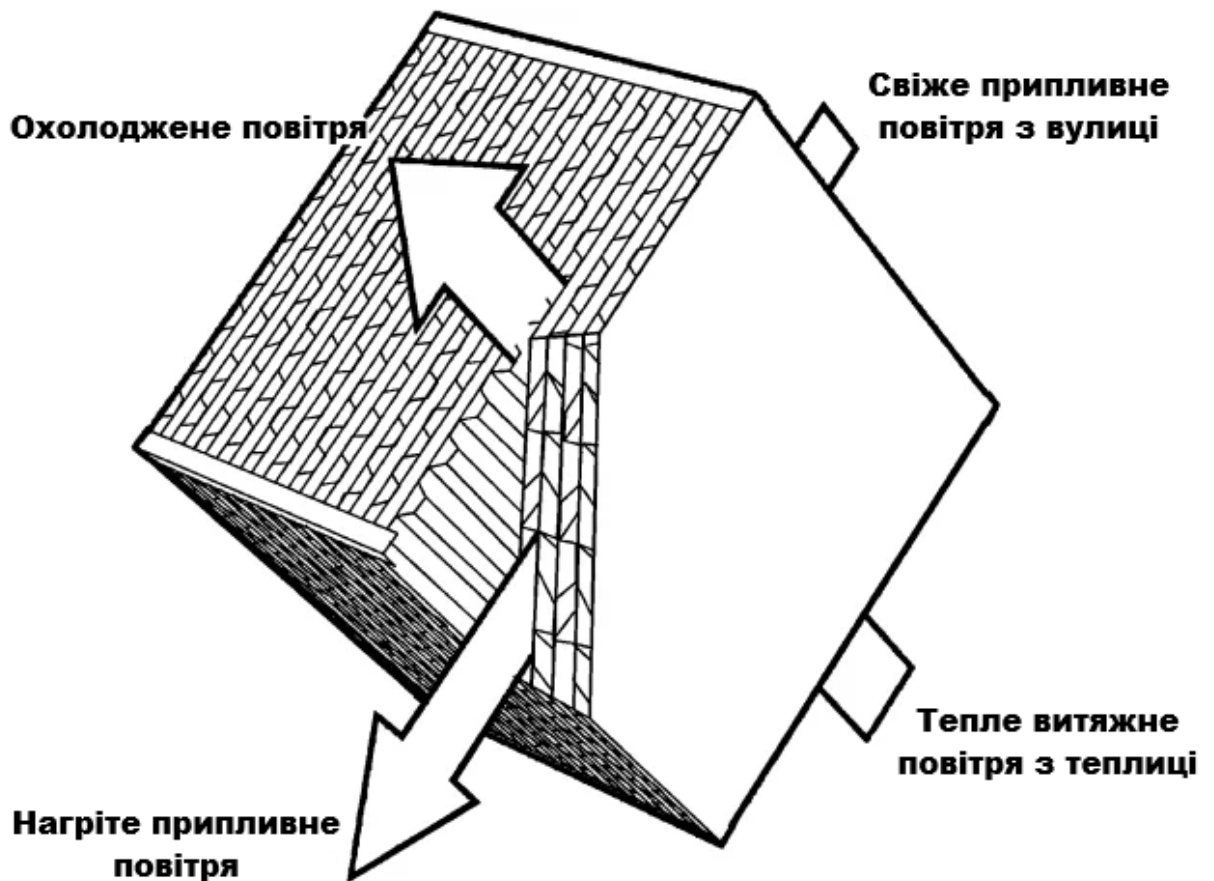


Рис. 1.4. Схема руху потоків повітря у перехрестно-токовому пластинчасто-ребристому рекуператорі

([https://www.researchgate.net/figure/Fixed-Plate-Cross-Flow-Heat-Exchanger-ASHARE-2008\\_fig2\\_301544606](https://www.researchgate.net/figure/Fixed-Plate-Cross-Flow-Heat-Exchanger-ASHARE-2008_fig2_301544606))

Використання пластинчастого рекуператора у складі системи термостабілізації дозволяє повернути назад у приміщення до 70-80 % тепла, яке зазвичай втрачається при провітрюванні, що суттєво знижує навантаження на тепловий насос і, відповідно, на систему сонячних батарей.

Враховуючи теплофізичні розрахунки та специфіку тепличного мікроклімату, для конструювання рекуператора у даному проєкті безальтернативно обирається листовий алюміній. Товщина пластин при цьому приймається мінімальною (1 мм) для зниження термічного опору стінки.

## 1.5. Постановка задачі на проєктування

Проведений аналіз існуючих методів термостабілізації та систем енергозабезпечення дозволив сформулювати концепцію проєкту. В умовах південного регіону України, місто Одеса, де спостерігається високий рівень сонячної інсоляції, найбільш доцільним є перехід від традиційних систем опалення на базі спалювання викопного палива до повністю автономних електричних систем, що живляться від енергії сонця.

Враховуючи необхідність підтримки стабільного температурного режиму (18 – 22 °С) та вентиляції для фермерської теплиці площею 100 м<sup>2</sup>, у дипломній роботі пропонується розробити комплексну систему, яка складається з трьох основних підсистем:

1. Джерело тепла/холоду: Парокомпресійний тепловий насос типу «повітря-повітря». Це обладнання обрано через його високий коефіцієнт перетворення енергії (COP > 3), можливість роботи в реверсивному режимі (опалення взимку, охолодження влітку) та відсутність потреби у складній системі водяних труб.

2. Система енергоживлення: Автономна сонячна електростанція (Off-Grid). Вона включає поле фотоелектричних панелей, блок акумуляторних батарей для роботи в нічний час та гібридний інвертор. Розрахунок цієї системи є критичним для забезпечення безперебійної роботи кліматичного обладнання.

3. Система вентиляції з рекуперацією: Для зниження теплових втрат при провітрюванні теплиці буде використано пластинчастий рекуперативний теплообмінник. Його впровадження дозволить зменшити пікове навантаження на тепловий насос і, як наслідок, скоротити необхідну кількість сонячних панелей та акумуляторів.

Таким чином, основними завданнями проєктування є:

- Розрахунок теплового балансу теплиці для визначення необхідної теплової потужності.
- Вибір основного обладнання (тепловий насос, сонячні панелі, акумулятори, інвертор).

- Конструктивний та тепловий розрахунок пластинчастого рекуператора (як основного елемента енергозбереження за фахом).
- Оцінка економічної ефективності автономної системи порівняно з традиційними методами.

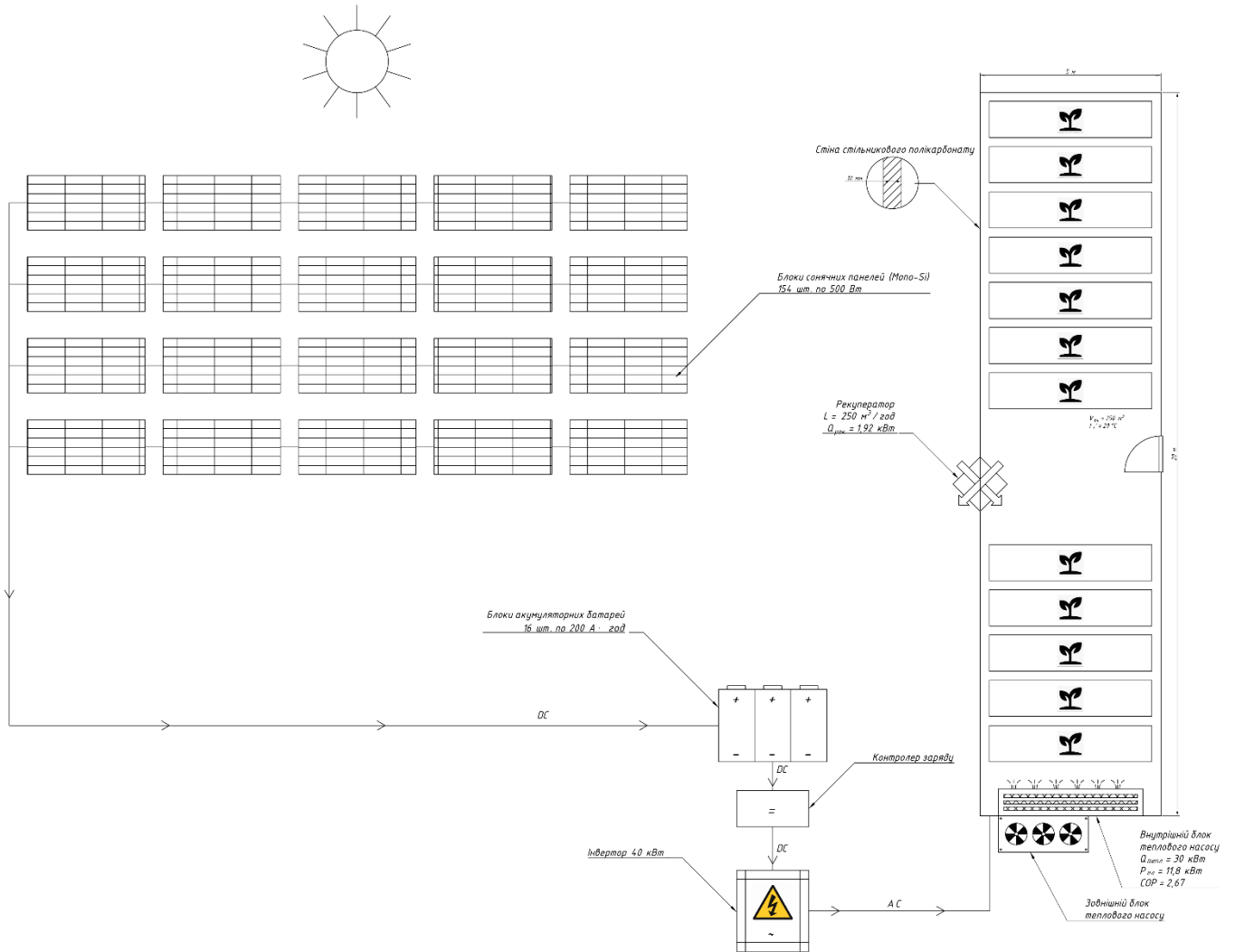


Рис. 1.5. Принципова схема роботи теплиці

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТА ПІДБОРУ ОБЛАДНАННЯ

### 2.1. Вихідні дані та геометричні характеристики об'єкта

Для проведення теплотехнічного розрахунку автономної системи термостабілізації необхідно спершу визначити геометричні параметри об'єкта та теплофізичні властивості огорожувальних конструкцій.

Як об'єкт дослідження прийнято фермерську теплицю прямокутної форми з двосхилим дахом. Така конструкція є найбільш технологічною у виготовленні та забезпечує оптимальне співвідношення площі до об'єму.

Матеріал огорожувальних конструкцій – стільниковий полікарбонат товщиною  $\delta = 10$  мм. Цей матеріал обрано через його високі теплоізоляційні властивості порівняно зі склом (завдяки повітряним прошаркам у стільниках) та високу світлопропускаючу здатність.

Площа огорожувальних конструкцій  $F_{ог}$  визначається як сума площ вертикальних стін та похилого даху:

$$F_{ог} = F_{стін} + F_{дах} \quad (2.1)$$

де:

$F_{стін}$  – площа вертикальних стін,  $m^2$ ;

$F_{дах}$  – площа покриття даху,  $m^2$ .

Об'єм внутрішнього повітря  $V_{вн}$ , який необхідно кондиціонувати, розраховується виходячи з лінійних розмірів теплиці (довжини  $L$ , ширини  $B$  та висоти стін  $H_{ст}$  і гребня даху  $H_{дах}$ ).

### 2.2. Методика розрахунку теплових втрат у холодний період року

Основним завданням системи опалення є компенсація теплових втрат, щоб температура всередині ( $t_{вн}$ ) залишалася стабільною незалежно від температури зовнішнього повітря ( $t_{зовн}$ ).

Повні теплові втрати теплиці ( $Q_{\text{заг}}$ ) складаються з двох основних компонентів:

- Трансмісійні втрати (теплопередача через стінки та дах).
- Втрати на інфільтрацію (нагрів холодного повітря, що просочується через нещільності або надходить при вентиляції).

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{інф}} \quad (2.2)$$

Трансмісійні тепловтрати розраховуються за основним рівнянням теплопередачі:

$$Q_{\text{тр}} = k_{\text{ог}} \cdot F_{\text{ог}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \cdot n \quad (2.3)$$

де:

$k_{\text{ог}}$  – коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій (полікарбонату), Вт/(м<sup>2</sup> · К). Для стільникового полікарбонату 10 мм це значення зазвичай становить 3,0 ... 3,3 Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$F_{\text{ог}}$  – площа поверхні теплообміну м<sup>2</sup>;

$t_{\text{вн}}$  – розрахункова внутрішня температура повітря, °С;

$t_{\text{зовн}}$  – розрахункова температура зовнішнього повітря для найхолоднішої п'ятиденки (для м. Одеса), °С;

$n$  – коефіцієнт, що враховує положення огорожувальної конструкції відносно зовнішнього повітря (для теплиць  $n = 1$ ).

Втрати тепла на інфільтрацію ( $Q_{\text{інф}}$ ) залежать від кратності повітрообміну та об'єму приміщення. Оскільки теплиця не є герметичною, частина теплого повітря постійно заміщується холодним:

$$Q_{\text{інф}} = c_{\text{пов}} \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot V_{\text{вн}} \cdot K_{\text{об}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \quad (2.4)$$

де:

$c_{\text{пов}}$  – питома теплоємність повітря, кДж/(кг · К) (приймаємо 1,005 кДж/(кг · К));

$\rho_{\text{пов}}$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup> (приймаємо середнє значення 1,2 кг/м<sup>3</sup>);

$V_{\text{вн}}$  – внутрішній об'єм теплиці, м<sup>3</sup>;

$K_{об}$  - кратність повітрообміну (скільки разів на годину повітря повністю оновлюється), 1/год.

### 2.3. Методика розрахунку теплонадходжень у теплий період

У літній період завданням системи термостабілізації є охолодження. Тепловий баланс у цьому випадку визначається надлишковим теплом від сонячної радіації ( $Q_{сон}$ ).

$$Q_{сон} = F_{підл} \cdot I_{сон} \cdot \tau_{пк} \cdot \eta_{зат} \quad (2.5)$$

де:

$F_{підл}$  – площа підлоги теплиці, м<sup>2</sup>;

$I_{сон}$  – інтенсивність сонячної радіації на горизонтальну поверхню в даній місцевості, Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_{пк}$  – коефіцієнт світлопропускання полікарбонату (зазвичай 0,80 ... 0,86);

$\eta_{зат}$  – коефіцієнт затінення (з урахуванням забруднення поверхні та конструктивних елементів каркасу).

### 2.4. Методика розрахунку потужності системи термостабілізації

Необхідна теплова потужність теплового насоса ( $N_{ТН}^{тепл}$ ) для режиму опалення визначається як сумарні тепловтрати з урахуванням коефіцієнта запасу ( $K_{зап}$ ):

$$N_{ТН}^{тепл} = Q_{заг} \cdot K_{зап} \quad (2.6)$$

Електрична потужність ( $P_{ел}$ ), яку споживатиме компресор теплового насоса, залежить від його коефіцієнта перетворення ( $COP$ ):

$$P_{ел} = \frac{N_{ТН}^{тепл}}{COP} \quad (2.7)$$

Саме величина  $P_{ел}$  є вихідною для розрахунку кількості сонячних панелей та ємності акумуляторів у наступних розділах.

## 2.5. Вихідні дані та розрахунок теплових навантажень теплиці

### 2.5.1. Вихідні дані

- Місцезнаходження: м. Одеса.
- Розрахункова температура зовнішнього повітря взимку (для проектування опалення):  $t_{\text{зовн}} = \text{мінус } 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Розрахункова температура внутрішнього повітря:  $t_{\text{вн}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Різниця температур:  $\Delta T = t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}} = 20 - (-15) = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- Матеріал покриття стільниковий полікарбонат товщиною 10 мм з коефіцієнтом теплопередачі  $K_{\text{ог}} = 3,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Геометричні параметри теплиці:

- Довжина,  $L = 20 \text{ м}$ ;
- Ширина,  $B = 5 \text{ м}$ ;
- Висота вертикальних стін,  $H_{\text{ст}} = 2 \text{ м}$ ;
- Висота у гребні даху,  $H_{\text{дах}} = 3 \text{ м}$ ;

Вибір міста Одеса як локації для проектування автономної теплиці зумовлений його високим природним потенціалом альтернативних джерел енергії. Південний регіон України характеризується помірно-континентальним кліматом з м'якою зимою та високою кількістю сонячних безхмарних днів, що є критично важливим для стабільної генерації електроенергії фотоелектричними системами.

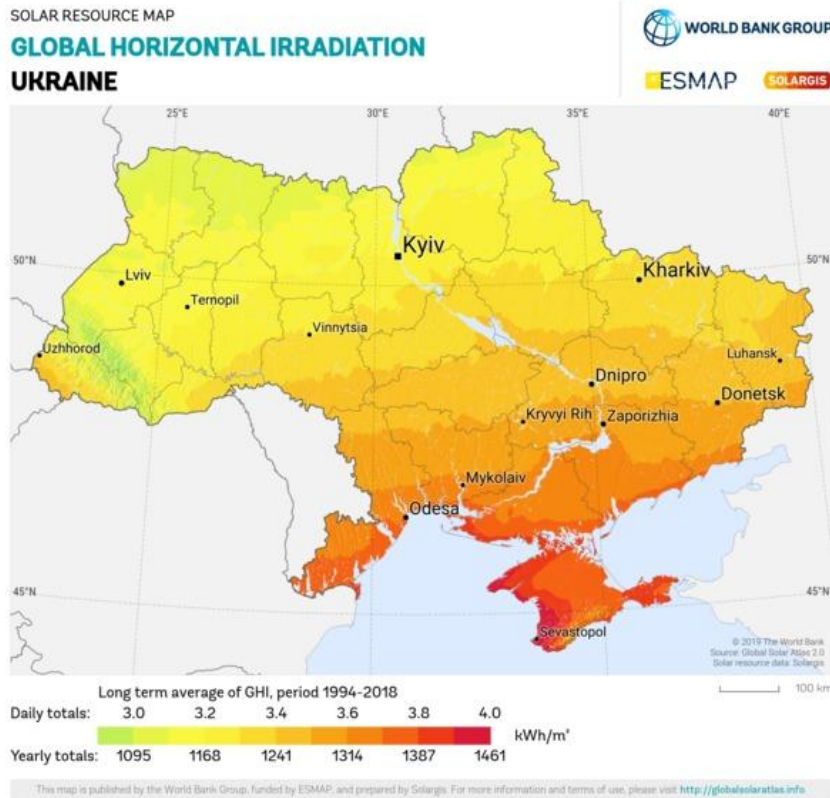


Рис. 2.1. Мапа розподілу сумарної сонячної радіації на території України  
 (<https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=ukraine>)

Для точного розуміння умов експлуатації теплового насоса та сонячних панелей, наведемо усереднені багаторічні кліматологічні дані для даного регіону (Табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Усереднені кліматичні характеристики м. Одеса

Місяць	Середня температура повітря, °С	Середній рівень сонячної інсоляції на горизонтальну поверхню, кВт · год/м <sup>2</sup>
Січень	мінус 0,5	45
Лютий	0,2	68
Березень	4,5	110
Квітень	10,0	150
Травень	16,0	205
Червень	20,5	225
Липень	23,0	235
Серпень	22,5	205
Вересень	17,0	145
Жовтень	11,5	95
Листопад	5,5	50
Грудень	1,0	38

Аналіз даних Табл. 2.1 підтверджує, що найскладнішими місяцями для автономної системи термостабілізації є грудень та січень. Саме в цей період спостерігається мінімальна сонячна інсоляція (38 – 45 кВт · год/м<sup>2</sup> на місяць) при від'ємних розрахункових температурах, що диктує необхідність встановлення потужного масиву сонячних панелей та акумуляторних батарей.

### 2.5.2. Результати розрахунку теплових навантажень теплиці

Спочатку визначимо площу огорожувальних конструкцій ( $F_{ог}$ ).

Площа вертикальних стін (дві поздовжні та дві торцеві) разом із фронтонами (трикутними частинами під дахом) розраховується як:

$$F_{стін} = 2 \cdot (L \cdot H_{ст}) + 2 \cdot (B \cdot H_{ст}) + 2 \cdot [0,5 \cdot B \cdot (H_{дах} - H_{ст})] \quad (2.8)$$

$$F_{стін} = 2 \cdot (20 \cdot 2) + 2 \cdot (5 \cdot 2) + 2 \cdot [0,5 \cdot 5 \cdot (3 - 2)] = 105 \text{ м}^2$$

Для розрахунку площі даху знайдемо довжину одного схилу ( $l_{\text{сх}}$ ) за теоремою Піфагора:

$$l_{\text{сх}} = \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + (H_{\text{дах}} - H_{\text{ст}})^2} = \sqrt{2,5^2 + 1^2} = \sqrt{7,25} = 2,69 \text{ м} \quad (2.9)$$

Тоді площа двосхилого даху складе:

$$F_{\text{дах}} = 2 \cdot (l_{\text{сх}} \cdot L) = 2 \cdot (2,69 \cdot 20) = 107,6 \text{ м}^2 \quad (2.10)$$

Загальна площа теплообміну згідно з формулою (2.1):

$$F_{\text{ог}} = 105 + 107,6 = 212,6 \text{ м}^2$$

Внутрішній об'єм теплиці ( $V_{\text{вн}}$ ) для подальшого розрахунку інфільтрації:

$$V_{\text{вн}} = (L \cdot B \cdot H_{\text{ст}}) + [0,5 \cdot L \cdot B \cdot (H_{\text{дах}} - H_{\text{ст}})] \quad (2.11)$$

$$V_{\text{вн}} = (20 \cdot 5 \cdot 2) + (0,5 \cdot 20 \cdot 5 \cdot 1) = 200 + 50 = 250 \text{ м}^3$$

Розрахунок теплових втрат:

Трансмісійні тепловтрати розраховуємо за формулою (2.3):

$$Q_{\text{тр}} = 3,3 \cdot 212,6 \cdot 35 \cdot 1 = 24555 \text{ Вт} \approx 24,5 \text{ кВт}$$

Втрати тепла на інфільтрацію розраховуємо за формулою (2.4).

Приймаємо кратність закритої теплиці взимку  $K_{\text{об}} = 1 \text{ год}^{-1}$ , питому теплоємність повітря  $c_{\text{пов}} = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  та його густину  $\rho_{\text{пов}} = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Для переведення кДж/год у Вати поділимо результат на 3,6:

$$Q_{\text{інф}} = \frac{1,005 \cdot 1,2 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 35}{3,6} = 2931 \approx 2,9 \text{ кВт}$$

Загальні тепловтрати теплиці в найхолоднішу п'ятиденку згідно з формулою (2.2) становитимуть:

$$Q_{\text{заг}} = 24,5 + 2,9 = 27,4 \text{ кВт}$$

Вибір потужності теплового насоса:

Щоб система термостабілізації працювала надійно та не на межі своїх можливостей, вводимо коефіцієнт запасу потужності  $K_{\text{зап}} = 1,1$  (10 %). Згідно з формулою (2.6), необхідна теплова потужність теплового насоса складе:

$$N_{\text{тн}}^{\text{тепл}} = 27,4 \cdot 1,1 = 30,1 \text{ кВт}$$

Враховуючи отриманий результат, для проектування обираємо промисловий інверторний тепловий насос типу «повітря-повітря» номінальною тепловою потужністю 30 кВт.

Оскільки взимку при температурі мінус 15 °С ефективність повітряних теплових насосів дещо знижується, прийmemo реальний розрахунковий коефіцієнт перетворення  $COP = 2,5$ . Тоді електрична потужність компресора ( $P_{ел}$ ), згідно з формулою (2.7), яку повинна забезпечити наша сонячна електростанція, складе:

$$P_{ел} = \frac{30,1}{2,5} = 12,04 \text{ кВт}$$

Проведений розрахунок показав, що для підтримання температури 20 °С у фермерській теплиці площею 100 м<sup>2</sup> в кліматичних умовах м. Одеса необхідний тепловий насос потужністю 30 кВт. У найхолодніші зимові дні він споживатиме близько 12 кВт електричної енергії. Саме ця цифра є відправною точкою для розрахунку площі сонячних батарей та ємності акумуляторів, що буде виконано в наступному підрозділі.

Для практичної реалізації системи термостабілізації обрано промисловий інверторний тепловий насос типу «повітря-повітря» (аналог сучасних серій від провідних виробників, таких як Mitsubishi Electric або Daikin). Використання інверторного компресора з технологією упорскування рідкого холодоагенту дозволяє зберігати високу теплопродуктивність навіть при зниженні температури зовнішнього повітря до мінус 15 °С

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики обраного теплового насоса

Параметр	Значення
Тип системи	Реверсивна (опалення/охолодження)
Номінальна теплопродуктивність	31,5 кВт
Номінальна холодопродуктивність	28,0 кВт
Споживана електрична потужність (опалення)	11,8 кВт
Коефіцієнт перетворення енергії (COP)	2,67
Тип холодоагенту	R410A або R32
Рівень звукового тиску зовнішнього блоку	58 дБ(А)
Електроживлення	380-415 В, 3 фази, 50 Гц
Габаритні розміри зовнішнього блоку	1338 x 1050 x 330 мм
Експлуатаційний температурний діапазон	від мінус 20 °С до 46 °С

Завдяки вбудованій системі автоматики, цей тепловий насос здатен інтегруватися у загальну мережу управління теплицею, модулюючи свою потужність залежно від поточних тепловтрат, що додатково економить ресурс акумуляторних батарей.

## 2.6. Розрахунок та підбір сонячних фотоелектричних панелей і акумуляторних батарей

### 2.6.1. Визначення добового енергоспоживання

Для розрахунку автономної сонячної електростанції необхідно визначити добову потребу об'єкта в електричній енергії ( $W_{\text{доб}}$ ).

Отримане у п. 2.5 значення електричної потужності компресора  $P_{\text{ел}} = 12,0$  кВт є піковим (для температури мінус 15 °С). Проте середня температура

зимових місяців у м. Одеса становить близько 0 °С. Тому середня температурна різниця складе  $\Delta T_{\text{сер}} = 20 - 0 = 20$  °С.

Середнє електричне навантаження теплового насоса ( $P_{\text{ел.сер}}$ ) пропорційне цій різниці:

$$P_{\text{ел.сер}} = P_{\text{ел}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{сер}}}{\Delta T_{\text{макс}}} = 12,0 \cdot \frac{20}{35} \approx 6,8 \text{ кВт} \quad (2.8)$$

Тепловий насос не працює безперервно на повну потужність. Приймаємо еквівалентний час роботи компресора на номінальній потужності протягом доби  $\tau_{\text{роб}} = 12$  годин. Також врахуємо споживання енергії автоматикою, циркуляційними вентиляторами та освітленням ( $W_{\text{доп}} \approx 5$  кВт · год/добу).

Загальне середньодобове споживання електроенергії взимку складе:

$$\begin{aligned} W_{\text{доб}} &= (P_{\text{ел.сер}} \cdot \tau_{\text{роб}}) + W_{\text{доп}} = \\ &= (6,8 \cdot 12) + 5 = 81,6 + 5 = 86,6 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{добу}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

## 2.6.2. Розрахунок масиву сонячних панелей

Потужність фотоелектричних модулів розраховується виходячи з найгірших умов (зимовий період), коли тривалість світлового дня мінімальна. Для Одеської області середній показник пікових сонячних годин ( $h_{\text{пик}}$ ) у грудні-січні становить близько 1,5 год/добу (еквівалент роботи сонця на потужності 1000 Вт/м<sup>2</sup>).

Необхідна встановлена потужність масиву сонячних панелей ( $P_{\text{ФЕМ}}$ ) визначається за формулою:

$$P_{\text{ФЕМ}} = \frac{W_{\text{доб}}}{h_{\text{пик}} \cdot \eta_{\text{заг}}} \quad (2.10)$$

де:

$\eta_{\text{заг}}$  – загальний коефіцієнт корисної дії системи (враховує втрати в інверторі, проводах, контролері заряду та АКБ). Приймаємо  $\eta_{\text{заг}} = 0,75$ .

Підставляємо значення:

$$P_{\text{ФЕМ}} = \frac{86,6}{1,5 \cdot 0,75} \approx 77,0 \text{ кВт}$$

Для генерації такої потужності оберемо сучасні монокристалічні сонячні панелі номінальною потужності 500 Вт кожна.

Необхідна кількість панелей ( $N_{\text{панелей}}$ ):

$$N_{\text{панелей}} = \frac{P_{\text{ФЕМ}}}{0,5 \text{ кВт}} = \frac{77}{0,5} = 154 \text{ шт.}$$

У сучасній альтернативній енергетиці на ринку представлено широкий спектр фотоелектричних модулів різної потужності, наприклад, монокристалічні панелі типу Sunport. Для оптимізації площі монтажу та зменшення кількості комутаційних з'єднань, у проєкті прийнято рішення використовувати високоефективні монокристалічні панелі номінальною потужністю 500 Вт, створені за технологією Half-Cell (половинчасті комірки). Ця технологія дозволяє знизити внутрішній опір панелі та мінімізувати втрати потужності при частковому затіненні (наприклад, снігом чи опалим листям).

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики сонячної панелі (Mono-Si, 500 Вт)

Параметр	Значення при стандартних умовах
Номінальна максимальна потужність	500 Вт
Оптимальна робоча напруга	42,8 В
Оптимальний робочий струм	11,69 А
Напруга холостого ходу	51,7 В
Струм короткого замикання	12,28 А
Ефективність модуля (ККД)	21,1 %
Температурний коефіцієнт	мінус 0,35 % / °С
Габаритні розміри	2180 x 1090 x 35 мм
Вага	26,5 кг
Ступінь захисту розподільчої коробки	IP68

Масив із 154 таких панелей займе фізичну площу близько 366 м<sup>2</sup>. Це підтверджує раніше зроблені висновки про необхідність впровадження системи рекуперації тепла для зменшення загального енергоспоживання об'єкта та, як наслідок, скорочення площі сонячного поля.

### 2.6.3. Розрахунок ємності акумуляторних батарей (АКБ)

Акумуляторний блок має забезпечити роботу теплового насоса протягом темної частини доби (приблизно 16 годин взимку) або у періоди суцільної хмарності.

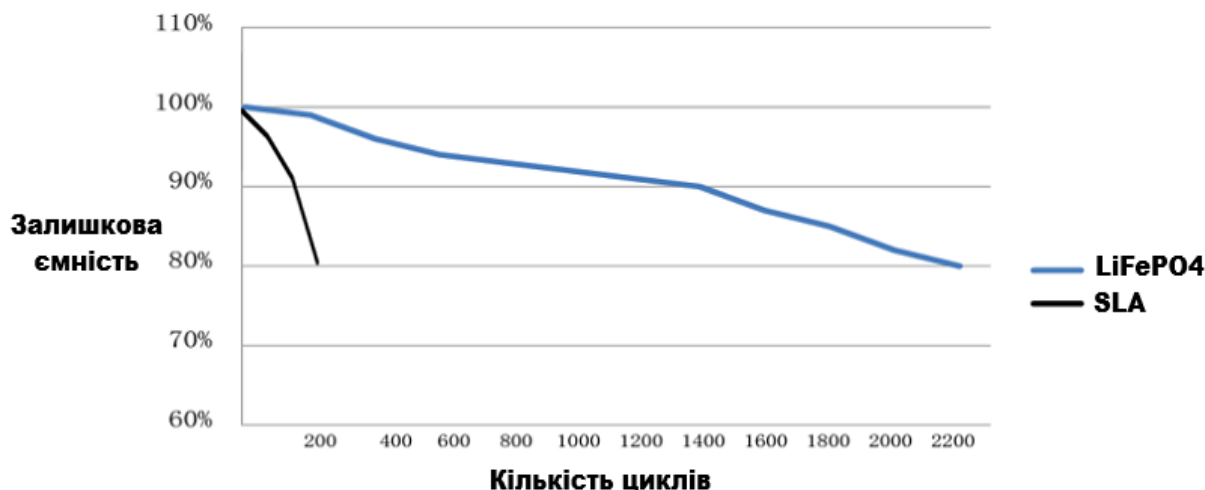


Рис. 2.2. Порівняльний графік падіння ємності літій-залізо-фосфатних та свинцево-кислотних акумуляторів

(<https://etekware.com/lithium-ion-vs-lead-acid-batteries/>)

Необхідна енергетична ємність акумуляторів ( $W_{\text{АКБ}}$ ) для покриття нічного навантаження:

$$W_{\text{АКБ}} = P_{\text{ел.сер}} \cdot \tau_{\text{ніч}} + W_{\text{доп}}^{\text{ніч}} = 6,8 \cdot 16 + 2,5 = 111,3 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.11)$$

Для забезпечення довговічності обираємо літій-залізо-фосфатні (LiFePO<sub>4</sub>) акумулятори з напругою системи  $U_{\text{АКБ}} = 48 \text{ В}$ . Допустима глибина розряду (Depth of Discharge або DoD) для них становить 80 % (0,8).

Необхідна електрична ємність блоку АКБ ( $C_{\text{АКБ}}$ ) в Ампер-годинах:

$$C_{\text{АКБ}} = \frac{W_{\text{АКБ}} \cdot 1000}{U_{\text{АКБ}} \cdot \text{DoD} \cdot \eta_{\text{інв}}} \quad (2.12)$$

де:

$\eta_{\text{інв}} = 0,95$  – ККД інвертора.

$$C_{\text{АКБ}} = \frac{111,3 \cdot 1000}{48 \cdot 0,8 \cdot 0,95} = \frac{111300}{36,48} \approx 3051 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Для реалізації такого масиву можна використати збірки АКБ ємністю 200 А · год (48 В) у кількості:

$$N_{\text{АКБ}} = \frac{3051}{200} = 16 \text{ блоків}$$

#### 2.6.4. Аналіз динаміки енергоспоживання та добового балансу системи

Для оцінки надійності автономної системи термостабілізації необхідно розглянути характер зміни енергетичних навантажень протягом доби у різні пори року. Особливістю теплиці як об'єкта енергоспоживання є те, що пік потреби в теплі припадає на нічний час у зимовий період, коли генерація від сонячної електростанції відсутня.

Порівняльний аналіз електричних навантажень для різних сценаріїв експлуатації наведено у Табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняльна характеристика енергетичних навантажень системи

Режим експлуатації	Джерело навантаження	Електрична потужність, кВт	Тривалість, год/добу	Добове споживання, кВт·год
Зимова ніч (пік)	Тепловий насос (макс.) + вентиляція	12,11	16	193,76
Зимовий день (середній)	Тепловий насос (частк.) + вентиляція	4,5	8	36,0
Літній день (пік)	Тепловий насос (охолодження)	8,5	10	85,0
Літній день (ніч)	Вентиляція + рекуперація	0,5	12	6,0

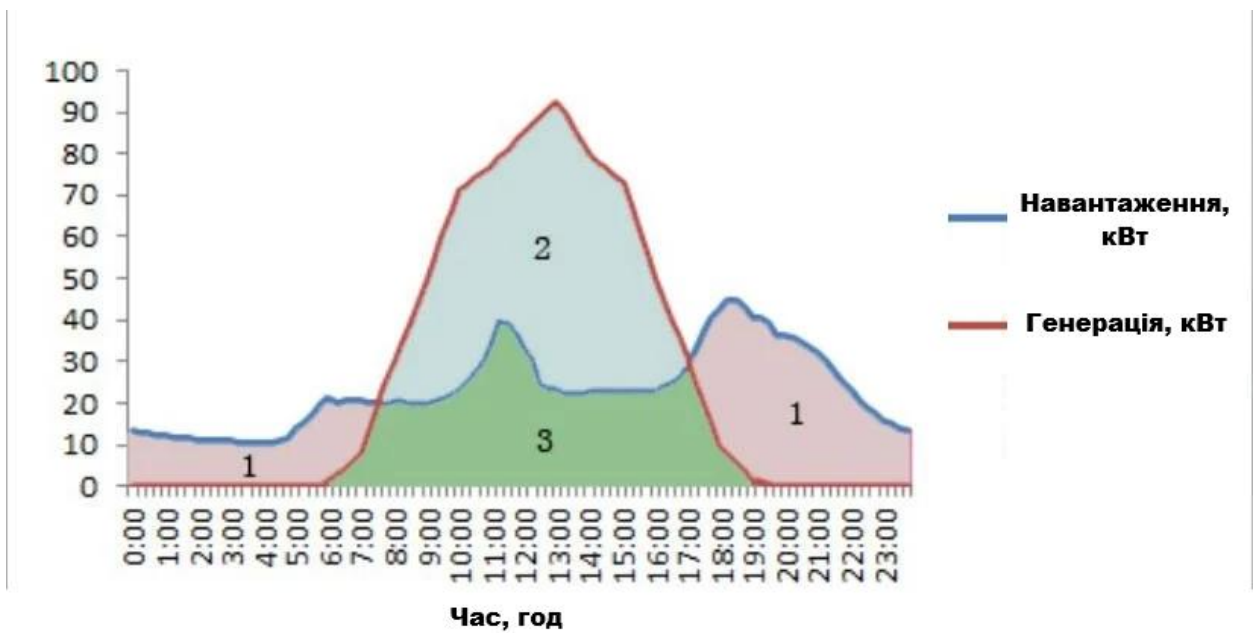


Рис. 2.3. Графік добового енергетичного балансу автономної системи термостабілізації

([https://www.researchgate.net/figure/Typical-daily-solar-generation-curve-and-load-curve\\_fig1\\_326118936](https://www.researchgate.net/figure/Typical-daily-solar-generation-curve-and-load-curve_fig1_326118936))

Як видно з розрахунків, зимовий нічний період є найбільш критичним. В цей час тепловий насос працює з максимальним навантаженням для компенсації трансмісійних втрат через полікарбонатне огородження за відсутності сонячних теплонадходжень.

Аналіз енергетичного балансу:

- Денний цикл (зима): протягом світлового дня (близько 8 годин) масив сонячних панелей потужністю 77 кВт генерує енергію, яка одночасно живить тепловий насос та заряджає акумуляторний блок. Завдяки сонячній інсоляції через прозорі стінки (ефект «парника»), навантаження на систему опалення вдень знижується на 30 – 40 % порівняно з ніччю.
- Нічний цикл (зима): після заходу сонця система повністю переходить на живлення від LiFePO4 акумуляторів. Розрахована ємність блоку АКБ (понад 3000 А · год) дозволяє покрити нічне споживання навіть при критично низьких температурах зовнішнього повітря (мінус 15 °С).

- Вплив рекуперації на баланс: впровадження пластинчастого рекуператора дозволяє стабільно повертати до 1,92 кВт теплової енергії. Це зменшує амплітуду коливань енергоспоживання між днем і ніччю, оскільки витрати на нагрів припливного повітря вночі мінімізуються.
- Літній період: у літній період баланс зміщується у бік денного споживання. Хоча сонячна інсоляція в Одесі досягає  $235 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ , надлишкове тепло відводиться реверсивною роботою теплового насоса. В цей період сонячна генерація надлишкова, що гарантує 100 % заряд АКБ та стабільну роботу системи кондиціонування.

Таким чином, розраховані параметри обладнання забезпечують «позитивний баланс» енергії навіть у найнесприятливіші періоди року, що підтверджує повну автономність та життєздатність спроектованого об'єкта.

## **2.7. Висновок до розділу**

Проведені теплоенергетичні розрахунки виявили критичну інженерну проблему. Для забезпечення повної автономності фермерської теплиці площею  $100 \text{ м}^2$  у зимовий період необхідний масив сонячних панелей потужністю 77 кВт (154 панелі), площа якого (близько  $300 \text{ м}^2$ ) втричі перевищує площу самої теплиці. Крім того, потрібен надзвичайно великий та дорогий масив акумуляторів.

Головною причиною такого величезного енергоспоживання є колосальні втрати тепла, зокрема на вентиляцію (інфільтрацію) приміщення. Отже, для зменшення капітальних витрат на сонячну станцію та підвищення загальної рентабельності проєкту, життєво необхідним є впровадження системи рекуперації тепла витяжного повітря. Її розрахунок та конструювання буде детально розглянуто у наступному розділі.

Крім того, проведений аналіз добового енергетичного балансу підтвердив, що найбільш критичним режимом експлуатації є зимова ніч, коли навантаження на систему сягає максимуму (понад  $190 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ ) за повної

відсутності генерації. Проте, розрахована потужність масиву сонячних панелей та ємність акумуляторного блоку гарантують покриття цих пікових витрат, забезпечуючи 100% автономність об'єкта навіть у найсуворіших погодних умовах.

### РОЗДІЛ 3. ТЕПЛОВИЙ ТА КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Як було доведено у Розділі 2, для забезпечення енергетичної автономності теплиці життєво необхідно мінімізувати теплові втрати. Значну частку цих втрат становить інфільтрація та вентиляція. Для утилізації теплоти витяжного повітря спроектуємо повітряний пластинчастий рекуператор перехресного току.

#### 3.1. Вихідні дані для розрахунку теплообмінника

Згідно з нормами проектування теплиць, кратність повітрообміну прийнята  $K_{об} = 1 \text{ год}^{-1}$ , що для об'єму теплиці  $V_{вн} = 250 \text{ м}^3$  становить витрату повітря  $L = 250 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Визначимо масову витрату теплоносіїв (повітря):

$$G = \frac{L \cdot \rho}{3600} = \frac{250 \cdot 1,2}{3600} = 0,083 \text{ кг/с} \quad (3.1)$$

Гарячий теплоносій (витяжне повітря з теплиці):

- Початкова температура  $t'_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Масова витрата  $G_1 = 0,083 \text{ кг/с}$

Холодний теплоносій (приливне вуличне повітря):

- Початкова температура  $t'_2 = \text{мінус } 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Масова витрата  $G_2 = G_1 = 0,083 \text{ кг/с}$  (баланс приливу та витяжки)

Ефективність сучасних пластинчастих рекуператорів ( $\eta$ ) становить 60 ... 75 %. Для розрахунку приймаємо консервативне значення  $\eta = 0,65$ .

#### 3.2. Тепловий розрахунок апарату

Визначимо кількість переданої теплоти та кінцеві температури теплоносіїв.

Температура приливного повітря після нагрівання в рекуператорі ( $t''_2$ ):

$$t''_2 = t'_2 + \eta \cdot (t'_1 - t'_2) = -15 + 0,65 \cdot (20 - (-15)) = 7,75 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

Приймаємо кінцеву температуру припливу  $t_2'' = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ .

З рівняння теплового балансу знайдемо температуру витяжного повітря на виході з апарату ( $t_1''$ ):

$$t_1'' = t_1' - (t_2'' - t_2') = 20 - (8 - (-15)) = -3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

Теплове навантаження (потужність) рекуператора ( $Q_{\text{рек}}$ ) визначається як:

$$Q_{\text{рек}} = G_2 \cdot c_p \cdot (t_2'' - t_2') \cdot 1000 \quad (3.4)$$

де  $c_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність повітря.

$$Q_{\text{рек}} = 0,083 \cdot 1,005 \cdot (8 - (-15)) \cdot 1000 \approx 1918 \text{ Вт} \approx 1,92 \text{ кВт}$$

Проводимо розрахунок середнього температурного напору. Оскільки водяні еквіваленти потоків рівні, використовуємо середньоарифметичний температурний напір:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{(t_1' - t_2'') + (t_1'' - t_2')}{2} = \frac{(20 - 8) + (-3 - (-15))}{2} = 12 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

### 3.3. Визначення коефіцієнта теплопередачі та площі поверхні нагрівання

Для точного визначення площі поверхні нагрівання необхідно розрахувати дійсний коефіцієнт теплопередачі ( $k$ ), який лімітується термічним опором з боку повітря (коефіцієнтами тепловіддачі  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ ).

Для знаходження коефіцієнтів тепловіддачі виконаємо гідродинамічний розрахунок повітряних каналів. Загальна витрата припливного повітря становить  $L = 250 \text{ м}^3/\text{год}$  (або  $0,0694 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Оскільки ми проектуємо пакет із  $N = 80$  пластин, кількість каналів для одного потоку (наприклад, припливного) становить  $n = 40$  шт.

Приймаємо розмір однієї пластини  $a = 0,4 \text{ м}$ , а відстань між пластинами (висоту каналу)  $h = 0,005 \text{ м}$ .

Площа живого перерізу одного каналу ( $f_{\text{кан}}$ ):

$$f_{\text{кан}} = a \cdot h = 0,4 \cdot 0,005 = 0,002 \text{ м}^2 \quad (3.6)$$

Загальна площа прохідного перерізу для одного потоку ( $F_{\text{пер}}$ ):

$$F_{\text{пер}} = n \cdot f_{\text{кан}} = 40 \cdot 0,002 = 0,08 \text{ м}^2 \quad (3.7)$$

Дійсна швидкість руху повітря у каналах рекуператора ( $w$ ):

$$w = \frac{L_{\text{сек}}}{F_{\text{пер}}} = \frac{0,0694}{0,08} \approx 0,87 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (3.12)$$

Для визначення режиму течії знайдемо еквівалентний (гідрравлічний) діаметр каналу ( $d_e$ ):

$$d_e \frac{4 \cdot f_{\text{кан}}}{P} = \frac{4 \cdot 0,002}{2 \cdot (0,4 + 0,005)} \approx 0,01 \text{ м} \quad (3.13)$$

Критерій Рейнольдса ( $Re$ ) для повітря при середній температурі  $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  (кінематична в'язкість  $\nu = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) складе:

$$Re = \frac{w \cdot d_e}{\nu} = \frac{0,87 \cdot 0,01}{14,16 \cdot 10^{-6}} = 614 \quad (3.14)$$

Оскільки отримане значення  $Re < 2320$ , течія повітря в гладкому каналі мала б строго ламінарний режим. Для плоских щілинних каналів при ламінарному режимі критерій Нуссельта є сталою величиною і становить  $Nu = 7,54$ .

Теоретичний коефіцієнт тепловіддачі ( $\alpha_{\text{теор}}$ ) для гладкої стінки розраховується як:

$$\alpha_{\text{теор}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{пов}}}{d_e} \quad (3.15)$$

де  $\lambda_{\text{пов}} = 0,025 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  – теплопровідність повітря.

$$\alpha_{\text{теор}} = \frac{7,54 \cdot 0,025}{0,01} = 18,85 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \quad (3.16)$$

Конструктивне оребрення та турбулізація:

Значення  $18,85 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  є занадто низьким і призвело б до збільшення габаритів апарату. Тому в спроектованому рекуператорі канали не є порожніми: між пластинами розміщується гофрована алюмінієва стрічка. Вона виконує дві функції:

1. Виступає як додаткове оребрення (збільшує поверхню теплообміну).
2. Штучно турбулізує потік: повітря постійно зривається з країв гофри, руйнуючи прикордонний ламінарний шар.

Завдяки цьому введенню, реальна інтенсивність тепловіддачі зростає.

Приймаємо коефіцієнт інтенсифікації оребреного каналу  $k_{\text{турб}} = 1,35$ .

Дійсний розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1 \approx \alpha_2$ ):

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{теор}} \cdot k_{\text{турб}} = 18,85 \cdot 1,35 = 25,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \quad (3.17)$$

Приймаємо для подальших розрахунків  $\alpha_1 = \alpha_2 = 25,4 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Коефіцієнт теплопередачі для алюмінієвої пластини (товщина  $\delta_{\text{пл}} = 0,001 \text{ м}$ ,  $\lambda_{\text{пл}} = 209 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)}$ ):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{пл}}}{\lambda_{\text{пл}}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{25,4} + \frac{0,001}{209} + \frac{1}{25,4}} \approx 12,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (3.18)$$

Знаходимо необхідну площу поверхні нагрівання:

$$F = \frac{Q_{\text{рек}}}{k \cdot \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{1918}{12,5 \cdot 12} \approx 12,8 \text{ м}^2$$

### 3.4. Конструктивний розрахунок рекуператора

Для забезпечення площі теплообміну  $F = 12,8 \text{ м}^2$  сконструюємо пакет із квадратних пластин. Приймаємо розмір однієї пластини  $\alpha = 0,4 \text{ м}$ .

Площа однієї теплообмінної пластини:

$$f_{\text{пл}} = \alpha \cdot \alpha = 0,4 \cdot 0,4 = 0,16 \text{ м}^2 \quad (3.8)$$

Визначаємо необхідне число секцій (пластин):

$$N_{\text{пл}} = \frac{F}{f_{\text{пл}}} = \frac{12,8}{0,16} = 80 \text{ шт.} \quad (3.9)$$

Приймаючи відстань між пластинами (висоту повітряного каналу)

$h = 0,005 \text{ м}$  (5мм), розрахуємо загальну довжину (товщину) пакету теплообмінника ( $L_{\text{пак}}$ ):

$$L_{\text{пак}} = N_{\text{пл}} \cdot (h + \delta_{\text{пл}}) = 80 \cdot (0,005 + 0,001) = 80 \cdot 0,006 = 0,48 \text{ м} \quad (3.10)$$

### 3.4.1. Геометрія теплообмінних поверхонь та оребрення каналів

Особливістю теплообмінних апаратів типу «повітря-повітря» є низькі значення коефіцієнтів тепловіддачі ( $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ ) через низьку теплопровідність та теплоємність газів. Розрахована раніше площа поверхні теплообміну ( $F = 12,8 \text{ м}^2$ ) є фактичною площею контакту повітря з металом, необхідною для передачі 1,92 кВт тепла. Якби конструкція складалася виключно з абсолютно плоских паралельних листів, це призвело б до значного збільшення габаритів апарату та неефективного використання об'єму.

Для досягнення розрахованих компактних габаритів пакета (0,4 x 0,4 x 0,48 м) та інтенсифікації теплообміну, конструкція спроектованого рекуператора є пластинчасто-ребристою.

Повітряний канал (висотою  $h = 5 \text{ мм}$ ) формується не просто як порожній зазор між двома сусідніми розділювальними пластинами, а заповнюється гофрованою алюмінієвою насадкою. Ця гофра виконує роль вторинної теплообмінної поверхні (ребер).

Застосування внутрішнього оребрення каналів виконує три критично важливі функції:

1. Збільшення площі теплообміну: Гофрована структура дозволяє розмістити набагато більше металевої поверхні в одиниці об'єму (збільшується так звана компактність теплообмінника,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ). Співвідношення повної поверхні з урахуванням ребер до поверхні гладких пластин називається коефіцієнтом оребрення ( $\beta$ ). У сучасних пластинчасто-ребристих апаратах  $\beta$  становить від 2 до 5.
2. Турбулізація потоку: Ребра руйнують ламінарний прикордонний шар повітря, який має найвищий термічний опір. Штучна турбулізація потоку (відрив вихорів від кромки ребер) дозволяє підвищити коефіцієнти тепловіддачі ( $\alpha$ ) на 30–50%.
3. Механічна міцність: В умовах перепаду тисків між припливним та витяжним каналами, алюмінієва фольга товщиною  $\delta = 1 \text{ мм}$  могла б

деформуватися. Внутрішні гофровані ребра виступають у ролі жорстких розпірок, що забезпечують механічну цілісність пакета при роботі вентиляторів.

Таким чином, розраховані 80 пластин формують матрицю теплообмінника, а необхідна площа поверхні  $F = 12,8 \text{ м}^2$  досягається завдяки щільному внутрішньому оребренню (крок гофри становить 2–3 мм). Тепло від витяжного повітря передається конвекцією на ребра, звідти теплопровідністю перетікає на основну розділювальну пластину, а потім через ребра сусіднього каналу віддається холодному припливному повітрю.

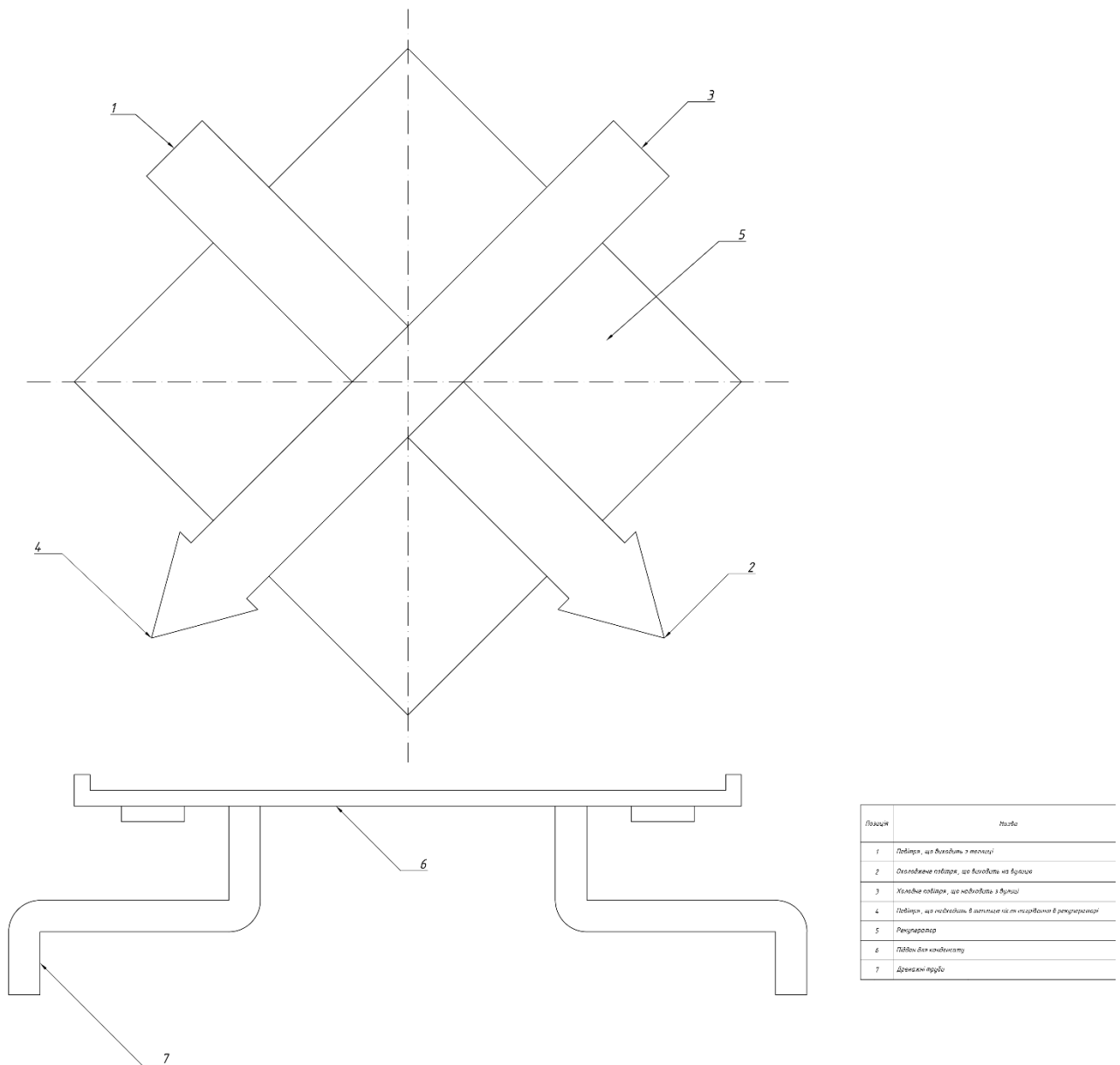


Рис. 3.1. Принципова схема роботи рекуператора

### 3.5. Оптимізація параметрів рекуператора та підбір тягово-технічного обладнання

Для обґрунтування вибору габаритних розмірів апарату було проведено порівняльний аналіз трьох варіантів компонування теплообмінного пакета при незмінній витраті повітря 250 м<sup>3</sup>/год. Результати порівняння наведені у табл.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз варіантів компонування рекуператора

Параметр	Варіант 1 (Малий)	Варіант 2 (Проектний)	Варіант 3 (Великий)
Розмір пластини, м	0,25 x 0,25	0,4 x 0,4	0,6 x 0,6
Кількість пластин, шт.	205	80	36
Швидкість повітря <i>w</i> , м/с	2,2	0,87	0,39
Аеродинамічний опір	320	125	45
Споживана потужність вентиляторів, Вт	140	65	40
Компактність та металоємність	Незадовільна	Оптимальна	Завелика конструкція

Аналіз результатів:

1. Варіант 1 має занадто високу швидкість повітря, що призводить до значного аеродинамічного опору (320 Па). Це потребує встановлення потужних високонапірних вентиляторів, що збільшує навантаження на акумуляторні батареї системи автономного енергозабезпечення.

2. Варіант 3 є найбільш енергоефективним, проте його габарити (0,6 x 0,6 м) та велика площа пластин роблять конструкцію занадто важкою та дорогою у виготовленні.
3. Варіант 2 (0,4 x 0,4 м) обраний як оптимальний. Він забезпечує помірний опір (125 Па), що дозволяє використовувати малопотужні енергоефективні вентилятори, зберігаючи при цьому компактність установки.

Підбір вентилятора:

Виходячи з розрахованого опору системи та необхідної витрати повітря, для забезпечення циркуляції обрано два відцентрові вентилятори (припливний та витяжний) з наступними характеристиками:

- Продуктивність: до 300 м<sup>3</sup>/год;
- Робочий тиск: 150 Па;
- Номінальна потужність: 35 Вт кожний (сумарно 70 Вт).

Така низька потужність вентиляційного обладнання підтверджує правильність обраної швидкості повітря у каналах рекуператора та дозволяє мінімізувати добове споживання енергії автономною системою.

### **3.6. Аналіз процесу конденсації та система відведення вологи**

Особливістю експлуатації рекуператорів у теплицях є екстремально висока вологість витяжного повітря (до 80–90 %). Коли тепле вологе повітря стикається з пластинами, що охолоджуються вуличним повітрям, його температура падає нижче «точки роси». Це призводить до інтенсивного випадіння конденсату всередині каналів рекуператора.

Випадіння конденсату має двоякий вплив на роботу апарату:

- Позитивний: при конденсації пари виділяється прихована теплота фазового переходу, що додатково підігріває припливне повітря, збільшуючи фактичний ККД рекуператора на 5-10 %.

- Негативний: шар води на пластинах збільшує аеродинамічний опір. Крім того, при сильних морозах (нижче  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) конденсат може перетворитися на лід, що призведе до повного перекриття каналів.

Для забезпечення безперебійної роботи системи термостабілізації у проєкті передбачено наступні заходи:

- Нахил корпусу: рекуператор встановлюється під кутом 3-5 градусів у бік витяжки для самопливного відведення води.
- Дренажний піддон: під теплообмінним пакетом монтується піддон з корозійностійкого матеріалу (пластик або нержавіюча сталь) з відвідним патрубком у систему поливу теплиці.
- Система розморожування: при спрацюванні датчика диференціального тиску (що свідчить про обмерзання) автоматика на 5-10 хвилин вимикає припливний вентилятор. Тепле повітря з теплиці швидко розтоплює лід, після чого система повертається у штатний режим.

Такий детальний підхід до вологовидалення гарантує стабільність мікроклімату та запобігає розвитку плісняви всередині вентиляційних каналів, що критично важливо для здоров'я рослин.

### **3.7. Висновок до розділу**

Спроектований пластинчастий рекуператор габаритами  $0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,48$  м дозволяє постійно повертати у теплицю  $1,92$  кВт теплової енергії. Це означає, що за добу економиться  $46,1$  кВт · год електроенергії. Завдяки цьому інженерному рішенню ми маємо змогу майже вдвічі зменшити кількість сонячних панелей та акумуляторів, розрахованих у Розділі 2, що кардинально покращує економіку всього проєкту.

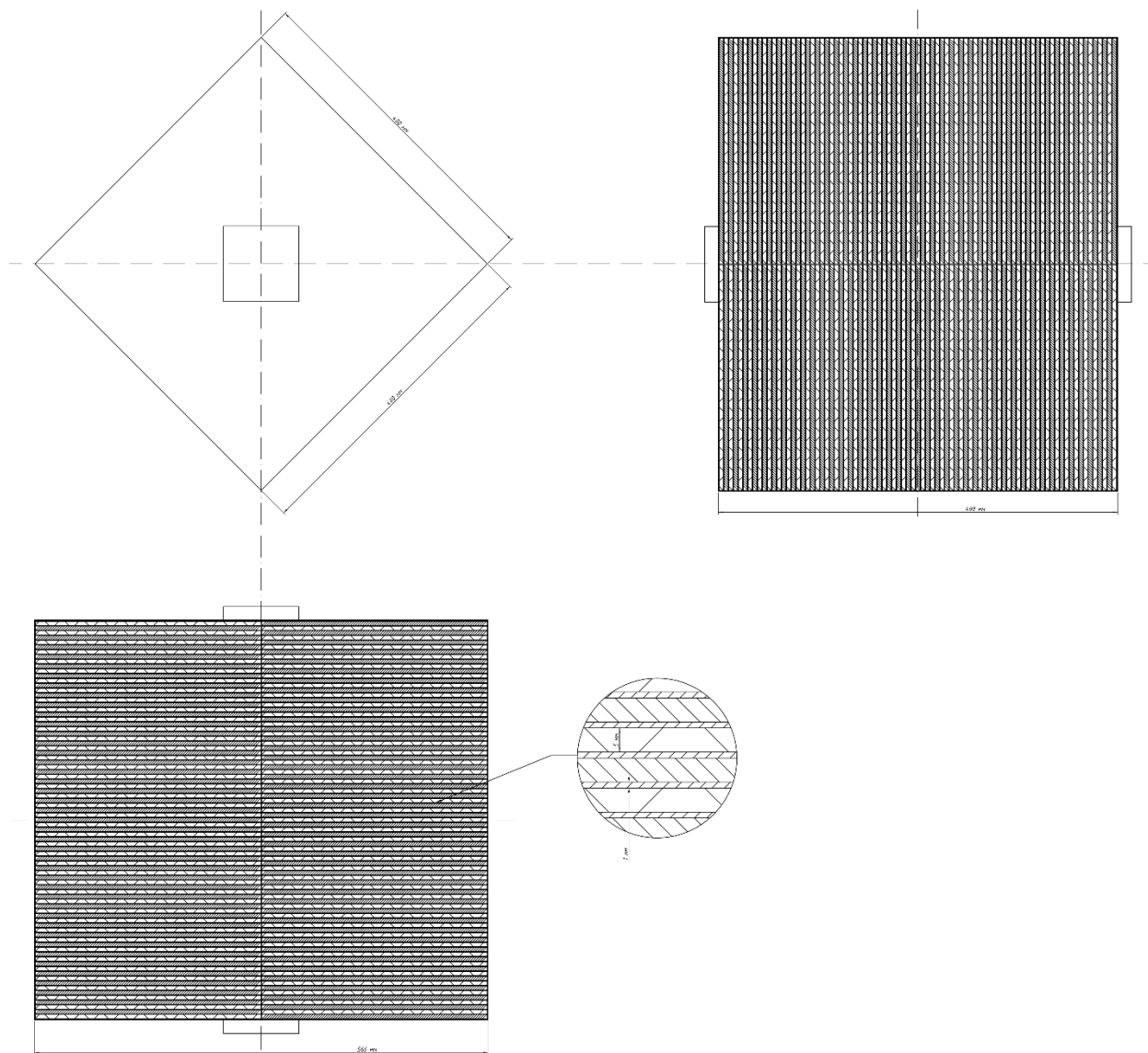


Рис. 3.2. Креслення спроектованого рекуператора

## РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ

### 4.1. Загальні положення та SWOT-аналіз проєкту

При розробці нової техніки та впровадженні інноваційних інженерних рішень необхідно пам'ятати про дефіцит і постійно зростаючу високу вартість органічних паливних ресурсів, що є особливо відчутним у даний час в усьому світі. Одночасно з цим на державному та міжнародному рівнях постійно посилюються екологічні вимоги щодо зниження викидів парникових газів в атмосферу планети та зменшення вуглецевого сліду від сільськогосподарської діяльності.

Саме тому будь-яке сучасне інженерне рішення, навіть якщо воно є ідеальним з точки зору термодинаміки, не має права на існування без детального техніко-економічного обґрунтування. Наш проєкт автономної термостабілізації теплиці є комплексним: він має економічний, соціальний, науково-технічний та екологічний аспекти. В основі схемного рішення лежить використання безкоштовної енергії сонця, вискоєфективного теплового насоса та рекуперативного теплообмінника, який ми розраховали у попередньому розділі.

Для оцінки стратегічної доцільності впровадження такої системи, нами проведено SWOT-аналіз використання сонячної енергії в умовах нашого проєкту.

SWOT-аналіз ділиться на 4 основні фактори: сильні сторони (Strengths), слабкі сторони (Weakness), можливості (Opportunities) та загрози (Threats).

Сильні сторони (Strengths) запропонованого рішення полягають у такому:

- Значний природний потенціал альтернативних джерел енергії у південному регіоні (м. Одеса).
- Підтримання стабільного мікроклімату приміщення протягом всього року без прив'язки до лімітів електромережі.

- Повна автономність та енергетична незалежність об'єкта.
- Екологічність виробництва (відсутність викидів CO<sub>2</sub>).
- Довгий термін експлуатації фотоелектричних модулів (понад 25 років).
- Відсутність шумової віддачі від сонячних панелей.

Слабкі сторони (Weaknesses) у використанні автономної сонячної енергії такі:

- Висока вартість початкових капітальних вкладень в обладнання (інвертори, панелі, АКБ).
- Пряма залежність ефективності роботи станції від поточної погоди та пори року.
- Достатньо великий термін окупності у порівнянні з простим підключенням до існуючої мережі.
- Необхідність періодичного догляду за панелями (очищення від пилу та снігу).
- Важкість екологічної переробки літєвих акумуляторів після завершення їхнього ресурсу.

Можливості (Opportunities) розвитку та експлуатації системи:

- Використання невичерпного джерела енергії – Сонця.
- Постійне збільшення ККД (коефіцієнту корисної дії) в нових поколіннях сонячних панелей.
- Можливість масштабування: додавання нових акумуляторів або панелей у майбутньому.

Загрозливими чинниками (Threats) є такі обставини:

- Ймовірність поломки високовартісного обладнання (інвертора або теплового насоса).
- Зміна законодавства або тарифів на енергоносії, що може вплинути на порівняльну економіку проекту.

## 4.2. Розрахунок капітальних інвестицій (CAPEX)

У Розділі 2 було визначено, що без рекуперації тепла нам би знадобилося 154 сонячні панелі та 16 блоків акумуляторів. Проте, завдяки впровадженню розробленого у Розділі 3 пластинчастого рекуператора, теплове навантаження на систему вентиляції знизилося на 65 %. Це дозволило перерахувати електричні навантаження та зменшити масив сонячних батарей і акумуляторів майже вдвічі, що кардинально знижує капітальні витрати.

Загальна сума капітальних вкладень ( $K_{\text{заг}}$ ) визначається за формулою:

$$K_{\text{заг}} = \sum K_{\text{обл}} + K_{\text{монт}} + K_{\text{мат}} \quad (4.1)$$

де:

$\sum K_{\text{обл}}$  – сумарна вартість основного обладнання, грн.;

$K_{\text{монт}}$  – витрати на монтаж та пусконаладжувальні роботи (приймаємо орієнтовано 15 % від вартості обладнання), грн.;

$K_{\text{мат}}$  – вартість допоміжних матеріалів (кабелі, автоматика, труби, каркаси), грн..

Складемо кошторис базових витрат на впровадження нашої системи термостабілізації для фермерської теплиці (ціни є орієнтовними, приведеними до сучасних ринкових умов).

Таблиця 4.1 – Базові капітальні витрати на автономну систему термостабілізації

Найменування витрати	Кількість	Вартість, грн.
Тепловий насос «повітря-повітря» (інверторний, 30 кВт)	1 шт.	160 000
Сонячні фотоелектричні панелі (монокристал, 500 Вт)	80 шт.	400 000
Акумуляторні батареї LiFePO4 (48 В, 200 А · год)	8 шт.	360 000
Гібридний інвертор (40 кВт) з контролерами заряду	1 шт.	120 000
Матеріали для виготовлення рекуператора (алюміній, корпус)	1 компл.	25 000
Система автоматичного управління та вентилятори	1 компл.	35 000
Допоміжні матеріали (кабелі, кріплення, теплоізоляція)	-	45 000
Загальна вартість обладнання та матеріалів ( $\sum K_{обл} + K_{мат}$ )	-	1 145 000
Монтаж та пусконаладжувальні роботи ( $K_{монт}$ )	15 %	171 750
<b>СУМАРНІ ІНВЕСТИЦІЙНІ ВИТРАТИ (<math>K_{заг}</math>)</b>	-	<b>1 316 750</b>

Отже, сумарні інвестиційні витрати на реалізацію проекту становлять близько 1 млн. 316 тис. гривень.

### 4.3. Розрахунок експлуатаційної економії (ОРЕХ) та терміну окупності

При проведенні розрахунку інвестиційної привабливості проєкту, ми маємо порівняти наші нульові експлуатаційні витрати (енергія сонця, що є безкоштовною) із традиційним варіантом.

Якби ми опалювали цю теплицю за допомогою звичайного електричного котла (без теплового насоса і без рекуператора) комерційною електроенергією з мережі, витрати були б колосальними. Розрахункова теплова потужність становила б понад 30 кВт. Річна потреба в тепловій енергії ( $Q_{\text{річ}}$ ) за опалювальний період (приймаємо час опалювального періоду 6 місяців, або 180 діб) становить орієнтовно:

$$Q_{\text{річ}} = N_{\text{сер}} \cdot \tau_{\text{доб}} \cdot D_{\text{оп}} \quad (4.2)$$

де:

$N_{\text{сер}} = 15$  кВт – середнє теплове навантаження;

$\tau_{\text{доб}} = 24$  год – час використання опалення на добу;

$D_{\text{оп}} = 180$  діб – кількість діб використання опалення у сезон.

$$Q_{\text{річ}} = 15 \cdot 24 \cdot 180 = 64800 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

При вартості комерційної електроенергії для підприємств на рівні 8 грн. за 1 кВт · год, річні експлуатаційні витрати традиційної системи ( $E_{\text{трад}}$ ) склали б:

$$E_{\text{трад}} = 64800 \cdot 8 = 518400 \text{ грн./рік}$$

Оскільки наша автономна сонячна система покриває ці потреби на 100 % за рахунок сонця та високого COP теплового насоса, річна економія коштів  $E_{\text{річ}}$  дорівнює вартості некупленої електроенергії:

$$E_{\text{річ}} = 518400 \text{ грн./рік}$$

Термін окупності капітальних вкладень ( $T_{\text{ок}}$ ) розраховується як відношення сумарних інвестицій до річної економії:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{заг}}}{E_{\text{річ}}} \quad (4.3)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1316750}{518400} \approx 2,5 \text{ роки}$$

Таблиця 4.2 – Основні показники інвестиційної проєкту

Показник	Значення
Базова вартість проєкту (інвестиції), тис. грн.	1 316,7
Економія коштів за опалувальний період (прибуток), тис. грн.	518,4
Термін окупності, роки	2,54

#### 4.4. Висновок до розділу

Техніко-економічний аналіз показав, що незважаючи на високі стартові інвестиції (понад 1,3 млн. грн.), проєкт є надзвичайно вигідним. Завдяки повній відмові від купівлі дорогої комерційної електроенергії та синергії трьох технологій (сонце, тепловий насос, рекуператор), річна економія становить понад 500 тисяч гривень. Проєкт є ефективним та інвестиційно привабливим, оскільки повністю окуповується приблизно за 2,5 роки, після чого система починає приносити чистий прибуток власнику теплиці.

## **РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ**

### **5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів**

Впровадження сучасних автономних систем мікроклімату на базі відновлюваних джерел енергії вимагає суворого дотримання правил охорони праці як на етапі монтажу, так і під час експлуатації. Об'єкт проектування (фермерська теплиця з сонячною електростанцією та тепловим насосом) характеризується наявністю комплексу специфічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

- Небезпека ураження електричним струмом: наявність постійного струму (DC) високої напруги від масиву сонячних панелей та змінного струму (AC) після інвертора.
- Термічні фактори: небезпека опіків при контакті з нагрітими елементами компресора або трубопроводами теплового насоса під час його роботи на опалення.
- Хімічні фактори: використання холодоагентів (фреонів типу R410A або R32) у контурі теплового насоса, а також електроліту в акумуляторних батареях.
- Небезпека обладнання під тиском: робота компресора та наявність ресиверів у фреоновому контурі.
- Робота на висоті: ризик падіння працівників під час монтажу та періодичного обслуговування (очищення) сонячних панелей на даху теплиці.

### **5.2. Електробезпека при роботі з фотоелектричними системами**

Головна особливість сонячних панелей полягає в тому, що вони генерують небезпечну напругу постійного струму весь час, поки на них потрапляє світло. Навіть при вимкненому інверторі кабелі, що йдуть від

сонячних модулів на даху, залишаються під напругою, яка може досягати 600-1000 В постійного струму.

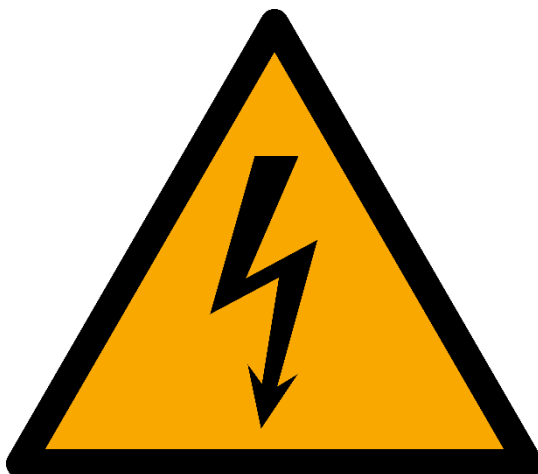


Рис. 5.1. Попереджувальний знак безпеки  
«Обережно! Електрична напруга»

Для забезпечення електробезпеки передбачаються такі заходи:

- Встановлення спеціальних розмикачів постійного струму (DC-автоматів) у безпосередній близькості від масиву панелей.
- Усі металеві конструкції (каркаси кріплення панелей, корпус інвертора, корпус теплового насоса) повинні бути надійно заземлені. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.
- Кабельні лінії прокладаються у захисних гофрованих трубах, стійких до ультрафіолетового випромінювання.
- Використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ) на стороні змінного струму для захисту персоналу від струмів витоку.

### **5.3. Безпека при експлуатації теплового насоса та посудин під тиском**

У контурі теплового насоса циркулює холодоагент під високим тиском. На відміну від аміаку, сучасні фреони (наприклад, R410A) не є токсичними у звичайних умовах, проте при великих витоках у закритому приміщенні вони

здатні витіснити кисень, що може призвести до задухи персоналу. Особлива увага приділяється елементам системи, що працюють під тиском. При гідравлічному випробуванні на міцність сторона нагнітання повинна витримати високий надлишковий тиск. Апарат (посудина) вважається таким, що витримав випробування, якщо після випробування не виявиться ознак розриву, пропуску холодоагенту або залишкових деформацій. Під час випробування посудин під тиском вживають суворого заходів обережності.

При технічному обслуговуванні теплового насоса категорично забороняється:

- Проводити ремонтні роботи на трубопроводах, що знаходяться під тиском.
- Допускати потрапляння відкритого вогню на елементи фреонового контуру, оскільки при термічному розкладанні фреонів можуть утворюватися небезпечні отруйні гази (фосген).

#### **5.4. Методи визначення місць витоків холодильного агента (фреону)**

Одним із найскладніших завдань при обслуговуванні герметичних систем парокомпресійного теплового насоса є пошук місця витoku холодоагенту. Витік може виникнути як у мідному трубопроводі, так і в будь-якому з компонентів системи (випарнику, конденсаторі, вальцювальних з'єднаннях), доступ до якого буває утруднений. Пошук витoku може вимагати великих зусиль, адже під час виконання цього виду робіт не можна бути впевненим, що розгерметизація виникла в єдиному місці. Розглянемо основні методи, що застосовуються для сучасних фреонових систем.

##### **5.4.1 Виявлення витoku за допомогою мильного розчину**

Даний метод є найбільш простим, традиційним і дешевим. Мильний розчин застосовується в тому випадку, коли з високим ступенем ймовірності відома область виникнення витoku (наприклад, після попередньої перевірки

електронним течішукачем). Особливі мильні розчини мають досить низьку щільність, що дає можливість виявити мікроскопічні витіки холодоагенту у вигляді бульбашок. До деяких видів мильних розчинів додають антифриз, який запобігає замерзанню рідини на охолоджених поверхнях фреонопроводу. Правило безпеки: Під час пошуку витіку забороняється підвищувати тиск в системі вище меж, встановлених виробником (рівень максимально допустимого тиску вказується на табличці агрегату).

#### **5.4.2 Метод перевірки системи під тиском (опресування азотом)**

Цей метод полягає в підвищенні тиску в контурі системи шляхом закачування сухого азоту (без кисню). Через певний проміжок часу слід перевірити систему на предмет зниження рівня тиску за допомогою манометра високого тиску. Чим вище тиск, тим швидше можна виявити витік. Позитивним моментом застосування цього методу є висока ймовірність виявлення розгерметизації в системі за рахунок фіксування падіння рівня тиску в контурі. Проте цей метод дозволяє визначити тільки наявність самого факту протікання, а не його конкретне місце. Зазвичай він застосовується при відсутності прямого доступу до компонентів системи.

#### **5.4.3 Метод проникаючого ультрафіолетового барвника**

Це метод додавання в масляний контур компресора спеціального флуоресцентного барвника, який виступить на місці протікання разом із холодильною оливою через певну кількість часу. Для реалізації цього методу потрібне специфічне обладнання:

- Ультрафіолетова лампа;
- Ультрафіолетовий барвник, сумісний з типом фреону;
- Спеціальні інжектори для закачування барвника в систему під тиском, що перешкоджають попаданню вологи і повітря.

Даний метод вимагає тривалого періоду часу, тому що закачаний в систему барвник перемішується з оливою і не відразу досягає місця витoku. Слід пам'ятати, що навіть невелика кількість неякісного барвника може змінити властивості мастила і негативно позначитися на тривалості служби компресора.

#### **5.4.4 Електронні течішукачі**

Електронні течішукачі є найбільш ефективними і дозволяють максимально чітко і швидко визначити місце витoku фреону (галогеновмісних холодоагентів). Такий вид пристроїв використовується в тому випадку, коли передбачуване місце витoku абсолютно невідомо. Сенсор приладу реагує на зміну концентрації газу в повітрі та подає звуковий або світловий сигнал. Правило безпеки: діоксид вуглецю ( $CO_2$ ) і пари спирту можуть негативно впливати на чутливість електронних течішукачів, тому перед використанням приладу слід переконатися у відсутності цих речовин у повітрі робочої зони.

#### **5.5. Пожежна профілактика**

Пожежна профілактика – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, запобігання пожежам, а також створення умов для успішного гасіння пожежі. У нашому проєкті найвищий ризик пожежі становить приміщення, де розташовані літєві акумуляторні батареї та інвертор. Для мінімізації пожежних ризиків вживаються такі заходи:

- Акумуляторна (інверторна) кімната має бути обладнана автономною системою припливно-витяжної вентиляції для недопущення перегріву обладнання.
- Забороняється спільне зберігання акумуляторів та горючих матеріалів (добрив, пластикової тари для розсади).

- Приміщення забезпечується вуглекислотними або порошковими вогнегасниками (гасіння електроустановок під напругою пінними або водними вогнегасниками суворо заборонено).
- Для захисту кабелів від перегріву струмами короткого замикання встановлюються швидкодіючі плавкі запобіжники та автоматичні вимикачі.

## **5.6. Виробнича санітарія**

Виробнича санітарія – одне з важливих засобів охорони праці, що забезпечує санітарно-гігієнічні умови праці, зберігає здоров'я трудящих на виробництві. Це система організаційних і санітарно-технічних заходів і засобів, що запобігають впливу шкідливих виробничих факторів на працівників.

Оскільки наша розроблена система термостабілізації спрямована на підтримку температури 20 °С та постійного повітрообміну через рекуператор, вона автоматично створює сприятливі та безпечні санітарно-гігієнічні умови не лише для рослин, а й для працівників фермерського господарства. Автоматизація кліматичних процесів позбавляє персонал необхідності виконувати важку фізичну роботу (наприклад, завантаження твердого палива у традиційні котли) та виключає контакт із продуктами горіння та золою.

## **5.7. Висновок до розділу**

Розглянувши даний розділ, можна зробити висновок, що експлуатація комплексної автономної системи термостабілізації вимагає суворого дотримання норм електробезпеки, пожежної безпеки та правил поводження з обладнанням під тиском. Проте, за умови правильного проектування захисного заземлення, встановлення відповідної автоматики та забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, запропонована система є повністю безпечною для обслуговуючого персоналу та навколишнього середовища.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра вирішено актуальну науково-практичну задачу з розробки проєкту автономної системи термостабілізації фермерської теплиці на базі відновлюваних джерел енергії. За результатами проведених досліджень та інженерних розрахунків можна зробити наступні висновки:

- Проведено аналіз існуючих методів підтримання мікроклімату в теплицях, який довів неефективність та екологічну небезпеку традиційних систем опалення на викопному паливі. Обґрунтовано доцільність використання комплексної енергозберігаючої системи: «сонячна електростанція + тепловий насос + рекуператор повітря».
- Виконано теплотехнічний розрахунок огорожувальних конструкцій теплиці (площею 100 м<sup>2</sup>, матеріал – полікарбонат) для кліматичних умов м. Одеса. Встановлено, що розрахункові теплові втрати у найхолоднішу п'ятиденку ( $t_{\text{зовн}} = \text{мінус } 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) становлять 27,4 кВт. Для забезпечення необхідного температурного режиму ( $t_{\text{вн}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) підібрано інверторний тепловий насос «повітря-повітря» номінальною тепловою потужністю 30 кВт.
- Доведено, що пряме живлення потужного кліматичного обладнання виключно від сонячних панелей у зимовий період потребує економічно недоцільних обсягів генеруючих та акумулюючих потужностей через значні втрати тепла на вентиляцію.
- З метою радикальної оптимізації енергетичного балансу спроектовано перехресно-токовий пластинчасто-ребристий рекуператор повітря. На основі гідродинамічного розрахунку обґрунтовано оптимальну швидкість руху повітря у каналах ( $w = 0,87 \text{ м/с}$ ) при ламінарному режимі течії ( $Re = 614$ ). Доведено, що використання внутрішнього гофрованого оребрення дозволяє штучно турбулізувати потік, інтенсифікувати

тепловіддачу до  $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  та зберегти високу компактність апарату (габарити 0,4 x 0,4 x 0,48 м).

- Оптимізація габаритів теплообмінника дозволила знизити загальний аеродинамічний опір системи до 125 Па. Завдяки цьому для циркуляції повітря підібрано економічні вентилятори із сумарною споживаною потужністю всього 70 Вт. Це інженерне рішення, разом із впровадженням системи автоматичного відведення конденсату та розморожування, мінімізує витрату заряду акумуляторних батарей і гарантує стабільність мікроклімату.
- Проведено техніко-економічне обґрунтування проєкту. Загальні капітальні інвестиції у систему становлять близько 1,31 млн. грн. Завдяки повній відмові від споживання комерційної електроенергії (економія понад 518 тис. грн. за опалувальний сезон), розрахунковий термін окупності проєкту становить 2,54 роки, що свідчить про високу інвестиційну привабливість розробленого рішення.
- Розроблено комплекс заходів з охорони праці та пожежної безпеки під час монтажу та експлуатації фотоелектричних систем, акумуляторних батарей і холодильних контурів теплового насоса під тиском, що гарантує безпечні умови праці обслуговуючого персоналу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Альтман, Е. І., & Бошкова, І. Л. (2019). Гідрогазодинаміка: навчальний посібник. ФОП Бондаренко М. О.  
<https://card-file.ontu.edu.ua/items/b47bfa70-214c-47df-a44c-eb699a034839>
2. Басюркіна, Н. Й. (2020). Ефективність використання інноваційно-інвестиційного потенціалу продовольчого бізнесу: монографія. ОНАХТ.  
<https://card-file.ontu.edu.ua/items/23974645-d090-4f90-bda6-2a99376212c4>
3. Богословський, В. Н. (1982). Будівельна теплофізика: теплофізичні основи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (переклад). Вища школа.  
[https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/san\\_technical/868555-1.pdf](https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/san_technical/868555-1.pdf)
4. ДБН В.2.2-2:2018. (2018). Теплиці та парники. Будівельні норми. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.
5. ДСТУ EN 378-1:2017. (2017). Холодильні установки та теплові насоси. Вимоги щодо безпеки та охорони довкілля. Частина 1. ДП «УкрНДНЦ».  
[https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=91625](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91625)
6. ДСТУ ISO 45001:2019. (2019). Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. ДП «УкрНДНЦ».  
[https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=88004](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004)
7. Жихарєва, Н. В. (2016). Моделювання та оптимізація систем кондиціонування повітря: навчальний посібник. ОНАХТ.  
<https://card-file.ontu.edu.ua/items/c646b93c-4616-4799-8313-e82a499e1785>
8. Мартиновський, В. С. (1979). Цикли, схеми та характеристики термотрансформаторів (переклад). Наукова думка.

9. Редько, А. О. (та ін.). (2016). Низькопотенційна енергетика. ТОВ «Друкарня Мадрид».

<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/9369/%D0%9D%D0%B8%D0%B7%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B0%20%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

10. Соколов, Є. Я. (1982). Теплофікація та теплові мережі (переклад). Вища школа.

11. Тітлов, О. С., Осадчук, Є. О., Цой, О. П., Алімкешова, А. Х., & Джамашева, Р. А. (2019). Розробка автономних систем охолодження з урахуванням відновлювальних і непридатних джерел теплової енергії. Холодильна техніка та технологія, 55(2), 84-96.

<https://card-file.ontu.edu.ua/items/e0d8602c-d45d-4ca0-90aa-908f206dcc1b>

12. Тітлов, О. С., & Осадчук, Є. О. (2020). Пошук енергоефективних режимів роботи систем отримання води з атмосферного повітря на базі абсорбційних водоаміачних термотрансформаторів тепла і сонячних колекторів. Холодильна техніка та технологія, 56(3-4), 78-91.

<https://card-file.ontu.edu.ua/items/bcfd0d1a-3706-49b3-8960-014f926dee3d>