

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра геоінженерії  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 502/504

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій КРЮЧКОВ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 101 Екологія**  
(код та назва спеціальності)

**на тему: «Покращення екологічного стану Закарпатської області шляхом  
застосування геотермальної енергії»**

**Студент групи** ОЗ-91мп Баклан В.Г.  
(шифр групи) (прізвище та ініціали) \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Науковий керівник** Кофанов О. Є., к.т.н., ст.вик.  
(прізвище та ініціали, науковий ступінь, вчене звання, посада) \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Консультант** Стартап-проекту Шевчук Н. А., к. т. н., доцент  
(назва розділу) (прізвище та ініціали, науковий ступінь, вчене звання) \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Рецензент** Василькевич О.І., доцент  
\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали, науковий ступінь, вчене звання) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра геоінженерії

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою  
Спеціальність (спеціалізація) – 101 Екологія («Інженерна екологія та  
ресурсозбереження»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій КРЮЧКОВ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

### ЗАВДАННЯ

#### на магістерську дисертацію

студенту \_\_\_\_\_ Баклану Владиславу Геннадійовичу  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації «Покращення екологічного стану Закарпатської області  
шляхом застосування геотермальної енергії "»,

науковий керівник дисертації Кофанов О.Є. к.т.н., ст.вик.,  
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання, посада)

затверджені наказом по університету від « 03 » листопада 2020 р. №3199-с

2. Дата подання студентом дисертації « 21 » грудня 2020 р.

3. Об'єкт дослідження – робота бінарної геотермальної електростанції.

4. Предмет дослідження – показники роботи бінарної геотермальної електростанції  
з органічним циклом Ренкіна.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- здійснити огляд літературних джерел та наукових напрацювань за темою дослідження;
- розглянути ряд моделей для вирішення проблем прогнозування і проаналізувати досвід їх використання;
- зібрати експериментальні дані в Закарпатській області;
- на основі зібраних даних створити модель впровадження бінарної геотермальної електростанції;
- розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу: схема роботи геотермальної електростанції, схема роботи теплового насоса, геометричні моделі роботи геотермальної електростанції.
7. Орієнтовний перелік публікацій: в XII науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» на тему «Забруднення дворових територій через «колодязну» міську забудову».
8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали, посада	Дата, підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Репін М.В., к.т.н., асистент		
Стартап-проект	Шевчук Н.А., к.т.н., доцент		

9. Дата видачі завдання: «01 » вересня 2020 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вибір і затвердження теми.	01.09.20-07.09.20	Виконано
2.	Підбір і ознайомлення з літературою	08.09.20-28.09.20	Виконано
3.	Складання плану, розробка індивідуального завдання	29.09.20-12.10.20	Виконано
4.	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини.	13.10.20-09.11.20	Виконано
5.	Збір і аналітична обробка статистичного матеріалу з теми дослідження	10.11.20-23.11.20	Виконано
6.	Написання дисертації та її оформлення	24.11.20-10.12.20	Виконано
7.	Подання роботи в ДЕК та її захист	11.12.20-22.12.20	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Баклан Владислав

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олексій Кофанов

(ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить 76 сторінок, 17 ілюстрацій, 23 таблиці та 46 джерел за переліком посилань.

**Актуальність теми дослідження.** Значна кількість забруднення екології при використанні електростанцій з викопним паливом зумовлює необхідність дослідження та впровадження відновлюваних джерел енергії, а саме геотермальної, яка може використовуватися в Україні та дати позитивні зміни.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Актуальність даного дослідження обумовлене завданнями Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», зокрема створенням на загальнодержавному рівні основ для впровадження відновлюваних джерел енергії, забезпечення вивчення новітніх технологій та обміну інформацією щодо зменшення викидів в енергетичному секторі.

**Мета дослідження:** виявлення можливості застосування геотермальних електростанцій на Закарпатті, для зменшення негативного впливу на екологію регіону.

Для досягнення встановленої мети дослідження необхідно розв'язати наступні завдання:

- здійснити огляд літературних джерел та наукових напрацювань за темою дослідження;
- проаналізувати існуючі технології та способи використання геотермальних енергетичних ресурсів;
- виконати моделювання та оптимізація бінарної геотермальної електростанції;
- провести моделювання впровадження геотермальної енергетики в закарпатській області;
- розробити стартап-проект.

**Об'єкт дослідження:** робота бінарної геотермальної електростанції.

**Предмет дослідження:** показники роботи бінарної геотермальної електростанції з органічним циклом Ренкіна.

**Методи дослідження:** в роботі використані загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних та експериментальних досліджень; методи математичної та статистичної обробки даних для моделювання досліджуваних параметрів; методи обчислювальної техніки при проведенні трудомістких розрахунків; методи математичного моделювання для визначення оптимальних характеристик досліджуваних систем та комп'ютерного моделювання для візуалізації отриманих результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів:** в роботі вперше визначено показники безпеки та енергетичну доцільність функціонування бінарної геотермальної електростанції, доведено можливість її застосування в Закарпатській області.

**Практичне значення отриманих результатів:** результати досліджень доцільно застосовувати при проектуванні та впровадженні бінарної геотермальної електростанції із значним зниженням негативного впливу на екосистему .

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи викладено на II Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГІЯ, БІНАРНА ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ОРГАНІЧНИЙ ЦИКЛ РЕНКІНА, ТЕПЛОВИЙ НАСОС, РОБОЧА РІДИНА.

## ABSTRACT

The master's dissertation contains 76 pages, 17 illustrations, 23 tables and 46 sources according to the list of references.

**Actuality of theme.** A significant amount of environmental pollution when using fossil fuel power plants necessitates research and implementation of renewable energy sources, namely geothermal, which can be used in Ukraine and give positive changes.

**Relationship of work with scientific programs.** The relevance of this study is due to the objectives of the New Energy Strategy of Ukraine until 2035: "Security, energy efficiency, competitiveness", including the creation of a nationwide framework for the introduction of renewable energy, ensuring the study of new technologies and information on reducing emissions in the energy sector.

**The purpose of the study** to identify the possibility of using geothermal power plants in Transcarpathia to reduce the negative impact on the ecology of the region.

Research objectives:

- analyze existing technologies and methods of using geothermal energy resources;
- perform modeling and optimization of binary geothermal power plant;
- to model the implementation of geothermal energy in the Transcarpathian region;
- develop a startup project;

**Object of research:** operation of a binary geothermal power plant.

**Subject of research:** performance indicators of a binary geothermal power plant with an organic Rankine cycle.

**Research methods.** The general scientific methods of analysis and synthesis are used in the work - in the study of literature data and experimental research; methods of mathematical and statistical data processing for modeling the studied parameters; methods of computer technology for time-consuming calculations; methods of mathematical modeling to determine the optimal characteristics of the studied systems and computer modeling to visualize the results.

**Scientific novelty of the obtained results.** For the first time the safety indicators and energy expediency of binary geothermal power plant functioning are determined in the work, the possibility of its application in Zakarpattia region is proved.

**The practical value of the results.** The research results should be used in the design and implementation of a binary geothermal power plant with a significant reduction in the negative impact on the ecosystem.

**Approbation of the results of the dissertation.** The results of the conducted researches were published in the materials of the I Scientific and Technical Conference of the Master's students of the Energy Saving and Energy Management Institute (based on the results of the dissertation researches of the undergraduate students).

**KEY WORDS:** GEOTHERMAL ENERGY, BINARY GEOTHERMAL POWER PLANT, RANKIN ORGANIC CYCLE, HEAT PUMP, WORKING LIQUID.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СПОСОБІВ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ .....	12
1.1 Геотермальні енергетичні ресурси .....	12
1.2 Застосування геотермальної енергії .....	15
1.3 Геотермальні енергетичні технології .....	17
Висновки до розділу 1 .....	21
2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ БІНАРНОЇ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ .....	22
2.1 Розробка моделі.....	24
2.2 Модель бінарної геотермальної електростанції з застосуванням ОЦР .....	29
2.3 Оптимізація роботи ОЦР .....	34
Висновки до розділу 2 .....	41
3 ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ЗАКАРПАТСЬКІЙ ОБЛАСТІ .....	42
3.1 Геотермальний потенціал існуючих родовищ.....	42
3.2 Чисельна імітаційна модель .....	44
3.3 Еколого-економічне обґрунтування застосування геотермальної енергетики в Закарпатській області .....	51
Висновки до розділу 3 .....	57
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	59
4.1 Обґрунтування актуальності та новизна інноваційної ідеї стартап- проекту.....	59
4.2 Аналіз конкурентного середовища .....	60
4.3 Ключові види діяльності та ключові партнери.....	62
4.4 Фінансове обґрунтування стартап-проекту .....	63
4.5 Обґрунтування рівня рентабельності інноваційної ідеї.....	68
4.6 Цільові групи потенційних споживачів .....	69
4.7 Оцінка ефективності впровадження стартап-проекту .....	70
Висновки до розділу 4 .....	71
ВИСНОВКИ .....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	73



## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ОЦР – Органічний цикл Ренкіна;

РР – Робоча рідина;

ГР – Геотермальний розсол;

EES – Engineering Equation Solver;

ЄС – Європейський Союз;

ПЗЧ – привід змінної частоти;

ТОБ – теплообмінник

СРТ – середня різниця температур

ФОП – фізична особа підприємець

ППЧ – привід постійної частоти

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Значна кількість забруднення екології при використанні електростанцій з викопним паливом зумовлює необхідність дослідження та впровадження відновлюваних джерел енергії, а саме геотермальної, яка може використовуватися в Україні та дати позитивні зміни.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Актуальність даного дослідження обумовлене завданнями Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», зокрема створенням на загальнодержавному рівні основ для впровадження відновлюваних джерел енергії, забезпечення вивчення новітніх технологій та обміну інформацією щодо зменшення викидів в енергетичному секторі.

**Мета дослідження** – виявлення можливості застосування геотермальних електростанцій на Закарпатті, для зменшення негативного впливу на екологію регіону.

**Задачі дослідження:**

- проаналізувати існуючі технології та способи використання геотермальних енергетичних ресурсів;
- виконати моделювання та оптимізація бінарної геотермальної електростанції;
- провести моделювання впровадження геотермальної енергетики в закарпатській області;
- розробити стартап-проект.

**Об'єкт дослідження:** робота бінарної геотермальної електростанції.

**Предмет дослідження:** показники роботи бінарної геотермальної електростанції з органічним циклом Ренкіна.

**Методи дослідження.** В роботі використані загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних та експериментальних досліджень; методи математичної та статистичної обробки даних для моделювання досліджуваних параметрів; методи обчислювальної техніки при проведенні трудомістких розрахунків; методи математичного моделювання для визначення оптимальних характеристик досліджуваних систем та комп'ютерного моделювання для візуалізації отриманих результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі вперше визначено показники безпеки та енергетичну доцільність функціонування бінарної геотермальної електростанції, доведено можливість її застосування в Закарпатській області.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень доцільно застосовувати при проектуванні та впровадженні бінарної геотермальної електростанції із значним зниженням негативного впливу на екосистему .

**Апробація результатів дисертації.** Результати проведених досліджень оприлюднені у матеріалах I Науково-технічної конференції магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СПОСОБІВ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

## 1.1 Геотермальні енергетичні ресурси

Величезний ресурс геотермальної енергії здебільшого лежить під поверхнею землі. Джерело тепла, яке є вирішальним ресурсом геотермальної енергії, яка зазвичай знаходиться у пласті рідини всередині мантийної пори. Підземне тепло, розташоване у неглибокій або навіть глибокій водоймі, слід добувати економно, оскільки використання геотермальної енергії не повинно перевищувати певної точки економічної межі, яка зазвичай відноситься до звичайних енергоносіїв, таких як електростанція на базі нафти та вугілля. Окрім підземного геотермального ресурсу, в деяких високоактивних вулканічних районах геотермальні енергетичні ресурси також можна знайти на поверхні (так звані геотермальні маніфести), такі як гейзер[1].

На даний час із застосуванням сучасних технологій, електростанція з генератором геотермальної енергії ефективно використовується в гірській та активній вулканічній зонах (рис.1.1). Наприклад, більш вигідними є райони, які оточені переважно активною вулканічною місцевістю.



Рисунок 1.1 – Карта існуючих геотермальних електростанцій

В Індонезії зуміли побудувати найбільшу в світі геотермальну

електростанцію під назвою «Геотермальний проект Сарулла». Цей геотермальний проект містить три різні енергетичні установки з розрахунковою потужністю 110 МВт на кожній електростанції. Крім того, геотермальну енергію в активній вулканічній зоні легше добувати, оскільки можна використовувати ресурс, що знаходиться ближче до поверхні, де тепловий градієнт вищий, тому геотермальна свердловина може бути менш глибокою (<1000 метрів), ніж в не вулканічних областях (> 2000 метрів), щоб отримати достатньо тепла, яке потрібно для функціонування[2].

Найбільш очевидні докази геотермальної водойми - це, надходження рідини з під землі через породу. Зовнішній вигляд поверхневих проявів можна розділити на такі форми як:

Гаряча або тепла весна. Цей вид поверхневих проявів є одним із свідчень того, що певна територія має геотермальний енергетичний потенціал. Гаряче/тепле джерело, утворене потоком теплових рідин з підводних запасів, які надходять на поверхню. Теплі і гарячі рідини в товщі поверхні класифікуються за температурою, теплі джерела зазвичай підтримують температуру менше 50°C, гарячі джерела мають температуру більше 50°C. Джерело також може вказувати на домінуючу рідину всередині геотермальної водойми - пара або гаряча вода.

Фумарол - це невеликий отвір на поверхні землі з сухим або вологим паром, що проходить крізь цей отвір. Крім того, фумарол, який пропускав високошвидкісну пару, зазвичай можна побачити в гідротермальній системі пластів, де домінує пара. Ця пара також може містити SO<sub>2</sub>, який може утворюватися лише при температурі понад 500°C[3].

Більшість геотермальних енергетичних ресурсів розташовані в надрах. Потенціал геотермальної енергії, розташованої під земною поверхнею, класифікується як понад 50 ГВт енергії, яку можна отримати.

Існує кілька видів геотермальної енергії, такі як: енергія землі, гідротермальна, магма, а також енергія геопреса, яка потенційно може бути використана для масового видобутку енергії. З іншого боку, при всьому різноманітті геотермальних підземних ресурсів найбільше в якості

основного джерела енергії в усьому світі використовується гідротермальна енергія, оскільки розвідка та експлуатація гідротермальних систем застосовується здебільшого разом із розвиненою нафтогазовою технологією[3].

На відміну від гідротермальної системи, решта геотермальних систем все ще перебувають у попередньому розрахунку та технологічному розвитку. Наприклад, петротермальна енергія для якої вчені з Китаю вивчають потенційні ресурси цієї системи. Група вчених пробурила свердловину глибиною 3,705м і дійшла до джерел петротермальної енергії з розрахунковою температурою 236°C, а також спроектували геотермальні системи з розрахунковою глибиною від 3000 до 10 000 метрів, які можуть виробити енергію з температури більше 150 ° C, вона буде використана як для виробництва електроенергії, так і для опалення. Крім того, попередні розрахунки передбачали, що потенційний запас петротермальної енергії у всьому світі еквівалентний 10-кратному видобутку нафти, природного газу та вугілля[4].

В даний час такий же шлях розвитку спостерігається в енергетиці магмових покладів, поточний стан розвитку цієї енергії все ще перебуває на стадії досліджень. В одному конкретному випадку наукова група з США намагалася пробурити покинуте місце геотермальної енергетичної ділянки в ісландській діючій вулканічній горі. Команда пробурила свердловину безпосередньо до магматичної області і виявила хорошу якість геотермальної свердловини. Крім того, випробувана командою свердловина магми може виробляти пар температурою 400°C, отже, цей пар може забезпечити електростанцію потужністю 25 МВт, що більше ніж звичайна геотермальна свердловина, яка зазвичай має потужність від 5 до 8 МВт[5].

## 1.2 Застосування геотермальної енергії

Як зазначалося раніше, геотермальна енергетика (в основному гідротермальна), яка має достатню кількість тепла для роботи електростанції, в основному знаходиться в гірських та вулканічно активних зонах. Тепло, яке надходить із підземної свердловини, передається безпосередньо по трубі до енергогенератора, який виробляє електроенергію. Крім того, після використання пари, що залишилася, залишки води, а також хімічні речовини з підводних поверхонь знову закачуються в нагнітальну свердловину. Ось чому геотермальна енергія класифікується як відновлювана, оскільки використовується лише тепло від надр, таким чином решта води та хімічні речовини з пари знову потрапляють в свердловину[6].

В основному, у світі зараз використовуються три типи електростанцій, що виробляють гідротермальну енергію: сухі парові установки, вологі парові установки та бінарні парові установки. З цих трьох типів геотермальних електростанцій станція сухого пару є найбільш розповсюдженою серед тих, що використовується в даний час, хоч технологія бінарної станції і є більш складною, але залишки води та будь-яка конденсована пара вводяться знову таким чином, щоб залишити тиск і зробити ресурси більш стійкими для збереження.

Пізніше ще одна складна технологія геотермальної енергії була розроблена для проекту геотермальної електростанції Сарулла в Індонезії. Технологія, яка називається геотермальними комбінованими циклічними об'єднаннями (GCCU), стверджує, що є більш ефективною і захоплює достатньо пару з надр, щоб потім виробляти електроенергію стабільно без будь-яких перешкод[6-7].

Використання геотермальної енергії для прямого нагріву - це найпростіше її застосування. Мета прямого опалення може бути виконана в широкому масштабі, від домогосподарств до багатоцільових

комерційних галузей[2].

Відповідно до діаграми Ліндаля, вимоги до температури прямого нагрівання геотермально поділяються на три шкали від 15°C до 200°C. Починаючи з нижньої температури від 15°C до 60°C, такі здебільшого використовуються для обігріву приміщень за допомогою теплових насосів, або кондиціонування повітря, також для невеликих галузей промисловості, невеликих громад. Ця геотермальна енергія може бути використана в більшості субтропічних і холодних районів, оскільки технологія, яка використовується, є простою і може застосовуватися з тепловим насосом для опалення домогосподарств та невеликих громад.

При більшому температурному масштабі від 80°C до 150°C технологія виробництва тепла застосовується для опалення будівель та теплиць для середніх галузей промисловості, таких як сушіння сільськогосподарської продукції, риби, цементного блоку. Помірна температура (140-150°C ) може використовуватися для випаровування або консервування харчових продуктів. Також помірна температура, яка використовується для прямого нагрівання, може виробляти невелику кількість електроенергії. Тепло, яке видобувається за сучасним станом технології, може бути використано в повному обсязі для опалення приміщень та зробити галузі більш стійкими у споживанні енергії[8].

Найвища температура, яка зазвичай використовується для прямого нагрівання в геотермальній енергії, коливається від 140°C до 200°C. Звичайна генерація енергії, яка використовується для прямого нагрівання, в основному достатня для електростанції, пряме тепло, яке використовується при цій температурі, в основному поєднується з парою, яка використовується для виробництва електроенергії на електростанції.

У рейтингу країн з виробництва геотермальної енергії США є найбільшим виробником, який використовує геотермальне джерело енергії для прямого опалення та виробництва електроенергії. Країна виробляє понад 3,5 ГВт енергії.



Частка промислового використання геотермальної енергії посідає останнє місце з менш ніж 3% загальної світової потужності, як з урахуванням теплових насосів, так і без них (навіть у загальному відсотку теплових насосів вона складає менше 1% ). Використання цієї програми може застосовуватися для багатьох промислових процесів, таких як: опалення, кондиціонування промислових приміщень, сушіння продуктів харчування та риби, обробка целюлози та паперу, прання текстилю, навіть виробництво палива та збагачення масел[8].

Промислове використання потребує лише джерела тепла, яке може подаватися від низько-температурних до середньо-температурних геотермальних полів. В основному може використовуватися тепло від 10 до 149°C, яке повинно подаватися з геотермальних родовищ, тоді як більшість галузей промисловості в даний час використовують звичайні джерела тепла, такі як газ та вугілля[9].

Оскільки 54% енергії споживається промисловим сектором і в основному все ще не використовують відновлювані джерела енергії як основне джерело, геотермальна енергія може бути альтернативою, що використовуватиметься галузями, із широким застосуванням.

### 1.3 Геотермальні енергетичні технології

Інструменти фази розвідки геотермальної енергії переважно адаптовані до технологій розвідки нафти та газу. Існує 5 різних етапів вивчення теплових потенціалів; геохімія, буріння, дистанційне зондування, аналіз та моделювання геології, геофізика потенційного поля та сейсмічна активність. Більшість пошукових робіт геотермальної енергії стосується геології та геофізики (GnG).

Оскільки різноманітність геотермальних типів та використання цієї енергії є мінливими, дослідження геологорозвідувальних робіт, особливо картографування, може бути корисним, за допомогою карти з обстеження

можна передбачити конкретні типи розвідки та використання з урахуванням потреб утилізації. Процес GnG може також включати сейсморозвідки, картографування, дистанційне зондування, аналіз та моделювання геології, геофізику. Інструменти, які використовувались у цій фазі, в основному є такими як сейсмічні інструменти, за винятком геохімічної діяльності. Геохімічна діяльність на фазі розвідки здебільшого аналізує вміст рідини в поверхні, а також пари, що надходить з надр[10].

Найбільш ризикованим, вирішальним і дорогим на етапі розвідки є процес буріння. На процес створення свердловини для видобування тепла з надр можна витратити мільйони доларів без впевненості у знаходженні точного пласта. Більша частина інструментів для буріння адаптується до фази буріння нафти та газу, єдиним відмінним процесом геотермального буріння є розмір свердловини та труби. Розмір геотермальної свердловини може варіюватися від мікро розміру (свердловина  $< 2$  см) до отвору великого діаметру ( $> 8,5$ см). Мікро отвір геотермальної зони, в основному, використовується як розвідувальна свердловина для знаходження розрахункової температури у водоймі під поверхнею, тоді як більший отвір ефективно використовує з метою видобутку геотермальної енергії[9-10].

Технології виробництва геотермальної енергії можна розділити на дві різні види діяльності - пряме використання та використання електростанції.

Звичний вид геотермальної електростанції можна побачити на рис.1.2. Видобуток цього виду геотермальної енергії залежить від пари, що протікає через виробничу свердловину. Пара використовується для обертання турбіни, яка підключається до генератора для виробництва електроенергії. Після використання рідини та пара потрапляють в градирню, і таким чином охолоджена вода потрапляє назад у резервуар через свердловину.

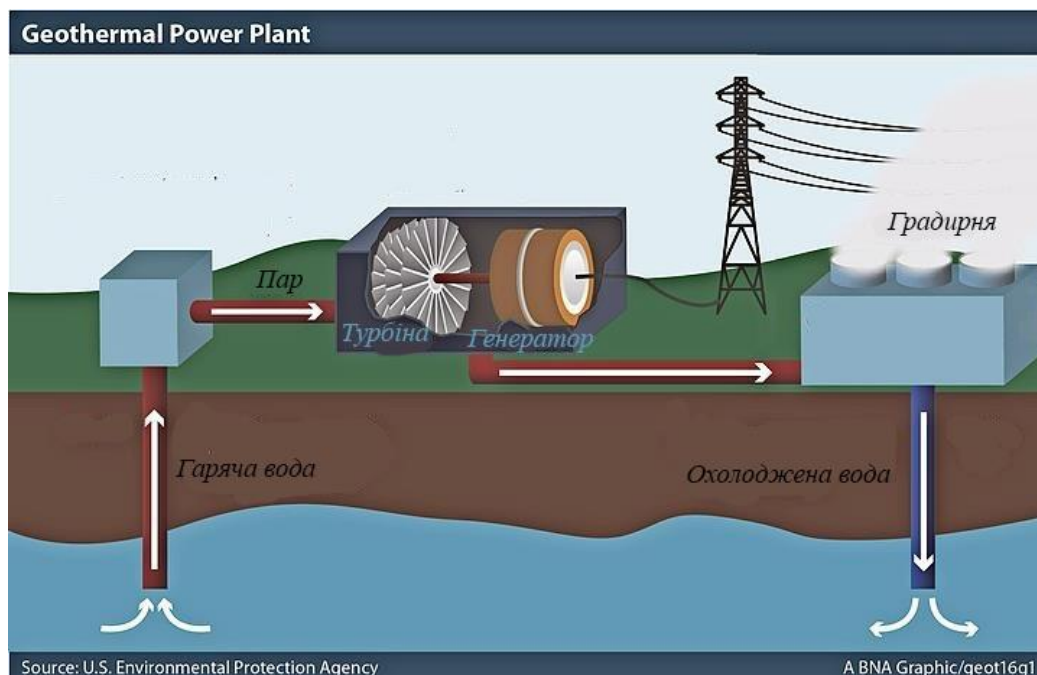


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд геотермальної електростанції

Для прямого нагрівання використовують більш легкі та різноманітні технології. По-перше, найбільш відоме застосування це теплові насоси від землі. Цей геотермальний тепловий насос залежить від постійної температури під землею[12]. Температура під поверхнею відносно вища взимку, а також нижча влітку, тому джерела тепла від землі можна використовувати для обігріву взимку, а також можуть відводити тепло від будівлі в літній час, оскільки геотермальні теплові насоси не потребують надзвичайних геологічних умов, таких як гарячі джерела, їх можна використовувати будь де.

Теплові насоси з наземним джерелом (ТННД) також є екологічно чистою технологією, яка дозволяє зменшити викиди на 66% порівняно із звичайними тепловими системами, що використовують викопне паливо.

ТННД поділяють на три типи систем; відкриті, закриті та інші системи. Вони можуть бути обрані шляхом перегляду кількох факторів; геологія, гідрологія, площа та використання, існування джерел тепла поряд, а також характерні для теплих або холодних районів.

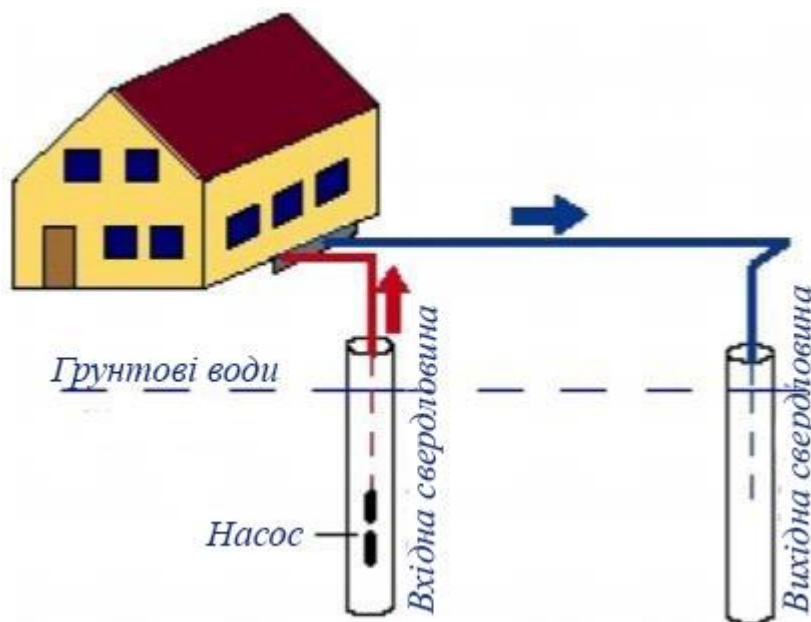


Рисунок 1.3 – Схема роботи підземного теплового насосу[13]

Системи з відкритим циклом використовують підземні води або поверхневі води як теплообмінні середовища. Вони складаються з видобувних свердловин, зворотніх свердловин, а також систем поверхневих вод. Якість води та доступність води є двома вирішальними факторами, оскільки якість води може викликати корозію, забруднення, а також забиття труби, тоді як мінімум 1,5-3,0 галона води на хвилину слід перекачувати між теплообмінником і холодоагентом[13].

З іншого боку, закриті системи прямого використання теплової геотерми в основному використовують наземний теплообмінник. Труби, які працюють як ґрунтовий теплозбірник або теплообмінник. Ці труби розташовані горизонтально під верхнім шаром ґрунту, але через обмеження в деяких менших країнах, таких як Західна та Центральна Європа, теплообмінник підключають послідовно або паралельно для ефективного використання земель, тоді як в американському варіанті використовується більше місця та більша площа[14].

Системи, які класифікуються як «інші», це ті системи, які мають відмінності як із відкритою, так і закритою системами. Вони можуть бути,

як вже існуючими раніше так і використовуватися як теплові джерела, такі як шахтна вода, тунельна вода або покинуті колодязі.

### Висновки до розділу 1

З цього розділу можна зробити висновок, що геотермальні ресурси можна класифікувати як поверхневі та підземні. Поверхневий ресурс геотермальної енергії може свідчити про значний тепловий потенціал в надрах і може використовуватися для виробництва електроенергії та інших багатофункціональних потреб. По-друге, електростанція є найбільш бажаним використанням геотермальної енергії під час щоденного використання, оскільки вона потребує мінімального тепла для видобутку електроенергії, тоді як безпосереднє використання тепла може служити для обігріву будинків та могло б допомогти потребам комерційного використання, наприклад, сушіння продуктів та в сільському господарстві. Технологічний аспект геотермальної енергетики переважно адаптується модифікованими інструментами розвідки та видобутку нафти і газу. На етапі розвідки, особливо при бурінні геотермальних свердловин, здебільшого використовувалася технологія буріння нафти з особливим передбаченням високої температури та високого тиску.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ БІНАРНОЇ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Стратегії сталого енергетичного розвитку базуються на підвищенні ефективності існуючих енергетичних систем та впровадженні відновлюваних джерел енергії замість викопних видів палива. Незважаючи на те, що глобальний внесок систем відновлюваної енергетики у загальний обсяг енергопостачання невеликий, відновлювані джерела енергії, через їх потенціал, викликали величезний інтерес за останні десятиліття. Особливий інтерес представляють низько- і середньо-температурні джерела теплової енергії завдяки їх розповсюдженості. Ця всюдисущість та доцільність використання в малих енергетичних циклах сприяють децентралізованому застосуванню цих джерел енергії. Органічний цикл Ренкіна (ОЦР) - один із перспективних циклів, що використовується для вилучення теплової енергії з різних джерел енергії, таких як сонячна енергія, біомаса та геотермальна[15].

Ресурси теплової енергії можна охарактеризувати чотирма параметрами: направленість потоку, температура ( $T$ ), швидкість передачі енергії ( $\dot{Q}$ ) та вартість. Характеристики джерела теплової енергії впливають на оптимальний вибір робочої рідини (РР) для ОЦР.

Для вибору РР використовувались різні цільові функції, такі як відношення чистої вихідної потужності до площі теплообмінника ( $W_{\text{чист.}} / A$ ), чиста вихідна потужність ( $W'_{\text{чист.}}$ ) і ефективність першого чи другого закону. Данна робота розрахована на бінарну систему, в якій геотермальний потік має форму гарячої рідини під тиском, яку називають геотермальним розсолом (ГР). Геотермальний потік забезпечує теплову енергію для РР ОЦР через теплообмінник. Для цих геотермальних джерел ефективність першого (або теплового) та другого закону ОРЦ можна визначити як

$$\begin{aligned}\eta_I &= \frac{W'_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{тв}}} \\ n_{II} &= \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\Delta \dot{X}_{\text{тв}}}\end{aligned}\tag{2.1}$$

де  $\dot{Q}_{ttB}$  – величина здобутої теплової енергії ОЦР з геотермального потоку;

$\Delta X \cdot ttB$  різниця ексергії між вхідними та вихідними геотермальними потоками.

Відповідно до вибору РР, конфігурація циклу є ще одним важливим фактором для оптимальної роботи[16]. Типовим вдосконаленням стандартного циклу Ранкіна є вбудовування внутрішнього теплообмінника.

РР поділяють на дві категорії залежно від форми купола насичення на діаграмі Ts: дзвоноподібний Ts (тип В), який має негативний нахил лінії випаровування для всіх температур (рис.2.1 (а)) та нависаючий Ts (типу О), що показує позитивний нахил лінії випаровування (рис.2.1 (b)) . Зазвичай органічні рідини, що складаються з малих молекул (кількість атомів С менше 3), в основному мають тип В, а ті, що складаються із складних молекул (кількість атомів С більше 3), переважно мають О-Тип[17].

На рис 2.1 зображена схема двох типів Ts діаграм для таких рідин, як вода, аміак, пентафторетан (R125), фторид метилу (R32), трифторетан (R143a), хлордифторметан (RE125) відносяться до типів В такі рідини, як октафторпропан (R218), пентафторпропан (R600), ізобутан (R600a), н-пентан (R601) та ізопентан (R601a) відносяться до категорії О-типу.

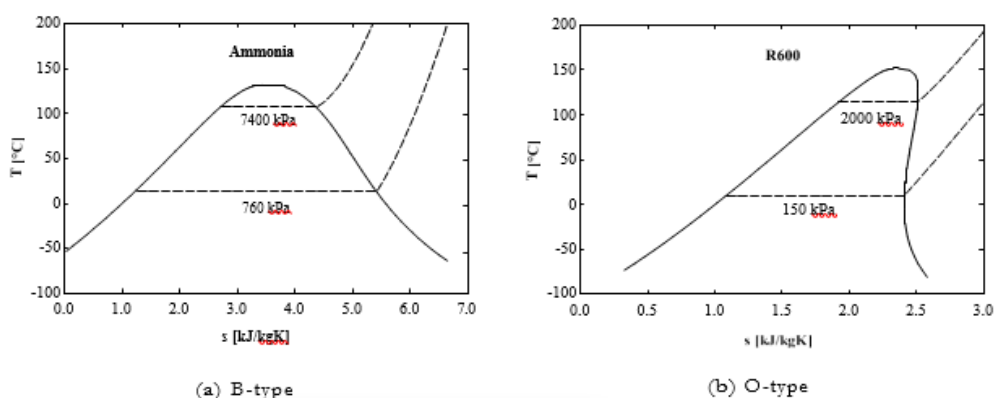


Рисунок 2.1 - Схема двох типів Ts діаграм

У цій роботі розроблена модель для існуючого комерційного ОЦР з регенерацією (з використанням рекуператора) та Ізобутаном як його РР. Система конденсації має повітряне охолодження. Модель включає фактичні характеристики всіх компонентів, включаючи насоси, теплообмінники, турбіни та конденсатори з повітряним охолодженням. Швидкість теплопередачі та перепад тиску для кожного компонента визначаються співвідношеннями з літератури та підтверджуються за допомогою моделей теплообмінників Aspen Exchanger Design & Rating (EDR). Модель реалізована в тренажері Aspen Plus. Розроблена модель підтверджена наявним набором даних. Оптимізація операційних стратегій ОЦР виконується двома підходами, що характеризують  $\dot{W}_{чист}$ : одночасною багатоваріантною оптимізацією циклу в Aspen Plus та використанням нового розробленого підходу, впровадженого в EES (Engineering Equation Solver). Нова розроблена модель є швидким та простим підходом для прогнозування оптимальної роботи, але потребує певних вихідних даних від симулятора Aspen Plus. Проводиться повний аналіз продуктивності системи ОЦР та пропонуються нові оптимальні стратегії роботи для цих систем[18].

## 2.1 Розробка моделі

Як уже згадувалося, в центрі уваги цього дослідження - бінарна геотермальна система, що використовує ОЦР, показана на рис.2.2 разом із діаграмою T-s. На рис.2.3 показана більш детальна схема поточного циклу, що ілюструє паралельні блоки, такі як, турбіни, рекуператори та конденсатори. Процес відбувається на геотермальній електростанції, що експлуатується ENEL[19].



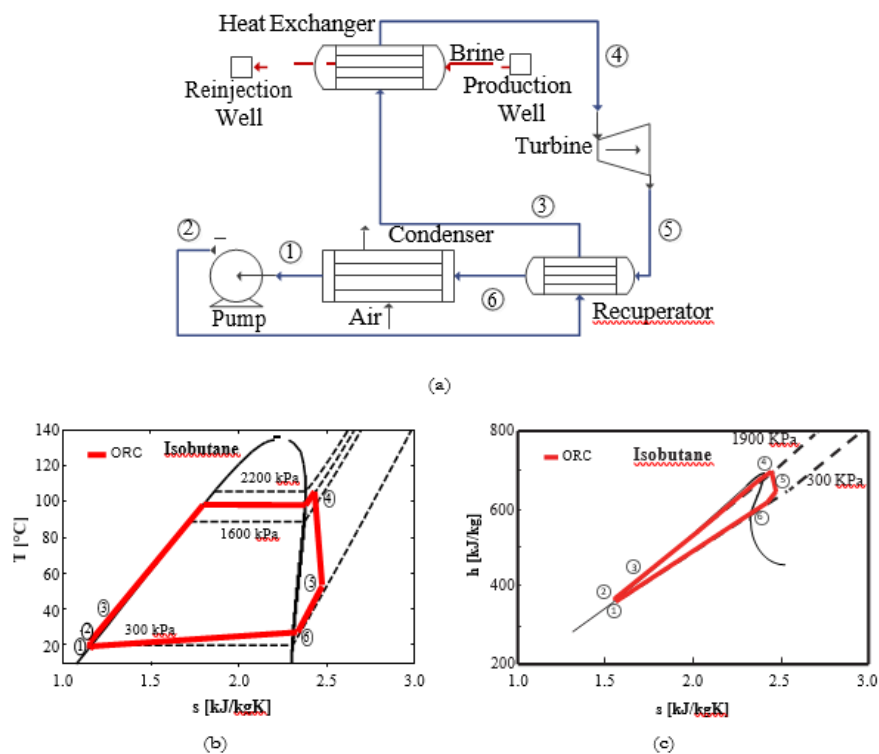


Рисунок 2.2 - (а) Схема ОЦР з рекуператором із використанням низькотемпературного геотермального джерела (б) Діаграма Ts ізобутану в діапазоні температур і тиску, що розглядається в поточному дослідженні (с) Hs-діаграма ізобутану в діапазоні властивостей розглянутої системи

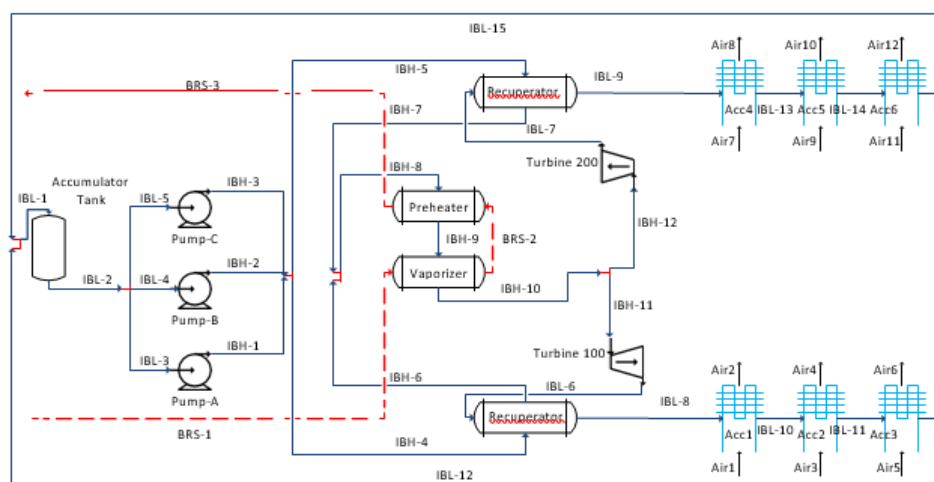


Рисунок 2.3 - Схема існуючого ОЦР на електростанції (ENEL) з використанням низькотемпературного ГР

На рис.2.3 температура на вході та тиск ГР складають  $T = 135^{\circ}\text{C}$  та  $P = 897 \text{ кПа}$ . РР, ГР та повітряні потоки зображені синім (суцільна лінія), червоним

(пунктирною лінією) та чорним (стрілка) відповідно. Система оснащена трьома насосами, два з них - ППЧ, а один - ПЗЧ. Для попереднього нагрівання РР використовуються два паралельно підключені рекуператори. ГР протікає через два теплообмінники, випарник та попередній нагрівач, щоб забезпечити теплову енергію ОЦР. Потужність в турбінах зростає, кожна з них підключена до окремої конденсаційної системи. Вентилятори конденсатора розроблені у вигляді комбінацій постійних та змінних частотних систем[20].

ОЦР моделюється з використанням Aspen Plus, послідовного модульного програмного забезпечення з використанням технологічної схеми. Підхід, орієнтований на рівняння (ЕО) в Aspen Plus, є ще одним варіантом моделювання та оптимізації системи. Такий підхід в принципі є більш придатним для оптимізації, однак у цій роботі через малу кількість змінних оптимізації розглядається перший підхід. База даних RefProp використовується для точного визначення термодинамічних властивостей як при моделюванні, так і при оптимізації ОЦР, що призводить до відносно довгої конвергенції[21].

В AspenPlus вбудовані модульні операції для представлення компонентів фактичного циклу. Схема розробленої моделі в AspenPlus така ж, як і на рис.2.3. Рухаючись зліва направо, використовуються такі моделі: "Змішувач" для акумуляторного бака, "Насос" для насосів А, В і С, "HeatX" для рекуператорів, підігрівача та випарника, "Compr" для турбін та "HeatX" для конденсаторів з повітряним охолодженням. Специфікації конструкції включені в модель.

Геотермальне джерело може подавати гарячий розсіл з температурою 135 °С і тиском 897 кПа. Зліва направо на рис. 3, РР, що зберігається в акумулятивному баку, розділеному на три лінії. Рідина нагнітається до високого тиску трьома паралельними насосами з потенційно різними витратами. Два насоси використовують приводи постійної частоти (насоси В і С), а один використовує привід змінної частоти (насос А). Для даної частоти вихідний тиск насоса однозначно залежить від масової витрати. Поєднання приводу постійної частоти та систем ПЗЧ дозволяє самостійно регулювати

масову витрату та тиск на виході насоса. Для кожного з трьох насосів отримані та включені в модель кореляційні зв'язки між тиском на виході насоса та масовими витратами. Ці два потоки надходять до двох паралельних рекуператорів.. Таким чином, перегрітий пар забезпечують теплову енергію РР, що знаходяться під тиском. Потім вихідні рідини двох рекуператорів змішуються між собою і надходять у попередній нагрівач з боку оболонки. На стороні трубки попереднього нагрівача тече ГР[22].

У процесі попереднього нагрівання частина РР також може випаровуватися. Потім попередньо нагріта рідина потрапляє до випарника з боку оболонки, щоб пройти процес зміни до парової фази. Значення перегріву після випарника - це ступінь свободи (DOF). ГР протікає зі сторони трубки випарника, а потім попереднього нагрівача, щоб подавати теплову енергію. Фаза перегрітої пари розділяється порівну на два потоки перед входом у турбіни. Турбіни забезпечують максимальну ізоентропну ефективність при певних об'ємних витратах та падінні ентальпії РР, що проходить через турбіну. Термодинамічний шлях поточного циклу показаний на рис.2.2. Оскільки РР (Ізобутан) має О-тип у діапазоні температур цього ОЦР, вихідна РР турбін знаходиться в перегрітому стані. Перегріті пари протікають через трубку рекуператорів, передаючи частину теплової енергії рідкій РР (відбувається регенерація). Потім кожен потік пари надходить до системи конденсації з повітряним охолодженням (СКПО). Цей тип конденсаційної системи використовується в посушливих районах, де немає доступного джерела води. Однак він пропонує менший коефіцієнт корисної дії порівняно з конденсаційними системами на водній основі, і на його роботу суттєво впливають коливання температури навколишнього середовища[23].

Система СКПО складається з двох баків з 21 відділом та трьома вентиляторами в кожному відділі. Кожен бак обслуговує одну турбіну. У кожному відділі останній вентилятор оснащений приводом постійної частоти, а два перших - це ПЗЧ. Іншими словами, кожен бак включає два ряди вентиляторів ПЗЧ і один ряд вентиляторів з постійною частотою.

Як йшлося раніше, два насоси оснащені приводом постійної частоти (1785

об / хв), і одним з них є ПЗЧ. Залежність підвищення тиску насоса від масової витрати задається робочою кривою. Для насосів в поточному ОЦР ці криві показані на рис.2.4. Як показано, різниця тисків насосів є монотонно зменшуваними функціями масових витрат[24]. Насос постійної частоти має один ступінь свободи ( $\Delta P$  або  $\dot{m}^{PP}$ ). Насос ПЗЧ має два ступені свободи ( $\Delta P$  і  $\dot{m}^{PP}$ ). Однак, як тільки насоси підключаються до системи, вони втрачають один ступінь свободи, оскільки вони також повинні дотримуватися кривої продуктивності системи. Таким чином, у цій системі насосів єдиним ступенем свободи є частота ПЗЧ насоса. Щоб отримати інший ступінь свободи, перед кожним насосом встановлюють клапан регулювання витрати для управління масовим потоком. Не враховується будь-яких перепадів тиску в регулювальних клапанах, оскільки вони будуть незначними. Система ПЗЧ використовує приблизно на 5% більше електроенергії, ніж системи постійних частот. Хоча на ізотропну ефективність кожного насоса впливає масова витрата та частота приводу насоса, враховуючи низьку паразитарну роботу насосів у цій системі, цей ефект можна ігнорувати. Значення  $\dot{W}_p$  для насоса ПЗЧ має залежність як від  $\dot{m}^{PP}$ , так і від  $f_p$ , але для приводних насосів з постійною частотою робота залежить лише від  $\dot{m}^{PP}$ .

Для кожного теплообмінника (ТОБ) використовується модель HeatX (Aspen Plus) щоб провести аналіз збереження маси та енергії. Інтервальний аналіз використовується для розрахунків СРТ (середня різниця температур). Площа кожного ТОБ дається як вхідні данні для моделі[25].

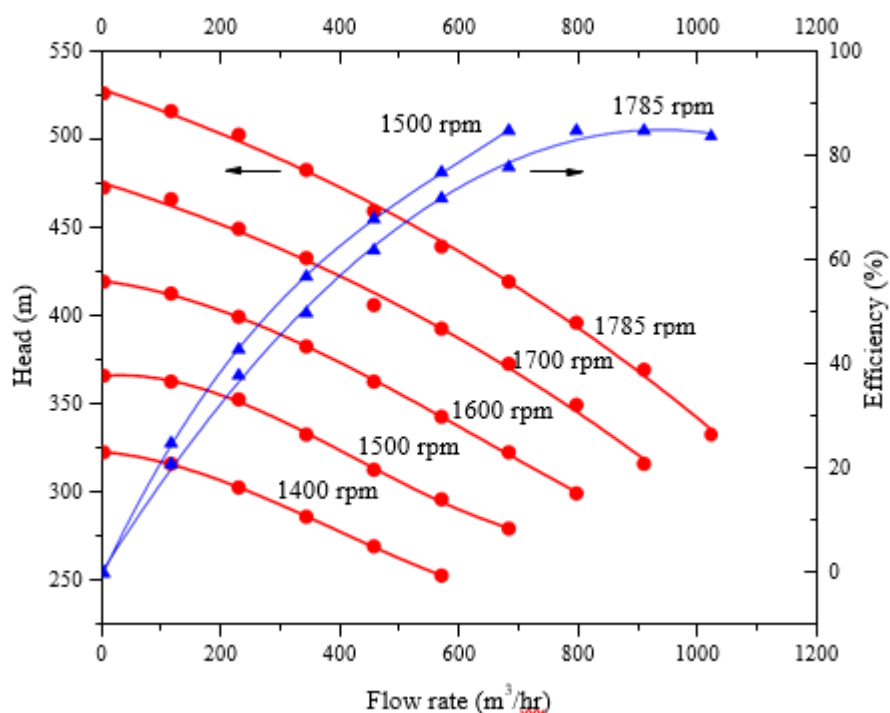


Рисунок 2.4 - Криві продуктивності насосів, розглянутих у цьому дослідженні

## 2.2 Модель бінарної геотермальної електростанції з застосуванням ОЦР

Для моделювання теплообмінників розглядаються два підходи. У першому підході наявні в літературі кореляційні коефіцієнти тепловіддачі реалізовані безпосередньо в програмі. Ці співвідношення наведені в Додатку А. У другому підході для розробки моделей EDR використовується теплообмінник і програмне забезпечення Aspen. Геометрія теплообмінників та властивості рідини є вхідними даними цього програмного забезпечення. Технічні характеристики теплообмінників наведені в таблиці 1 у Додатку А. Результатом роботи теплообмінника та програмного забезпечення Aspen є файл EDR, який подається як вхідні данні для симулятора Aspen Plus. Цей підхід є довшим, оскільки на кожній ітерації тренажер зчитує файл EDR і перераховує коефіцієнти тепловіддачі. Існує достатня збіжність між результатами двох підходів. Таким чином, для полегшення моделювання та оптимізації ОЦР, перший підхід обраний для решти досліджень[26].

Для турбіни з заданим діаметром кроку каскаду і швидкістю обертання турбіни, ізоентропійний ККД є функцією об'ємної витрати РР і падіння ентальпії через турбіну. Ізентропна ефективність турбін отримана за даними виробника. Для цих турбін максимальне значення  $\eta_s$  становить 86%. Проте, як йдеться далі, відхилення робочого стану від цього максимуму негативно впливає на продуктивність турбіни і, отже на значення  $\eta_s$ . Це відхилення може бути виражене як функція відношення падіння ентальпії ( $r_T$ ) і відношення об'ємної витрати ( $r_{VT}$ ). У розглянутій турбіні в цьому дослідженні залежність  $\eta_s$  від цих параметрів записується як:

$$\begin{aligned} r_T &= \sqrt{(h_4 - h_5) / (h_4 - h_5)^{\max}} \\ r_h &= [(1,398 \cdot r_T - 5,425) \times r_T + 6,274] \times r_T - 1,866 \times r_T + 0,619 \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $h_I$ , ( $I=1..6$ ) стан ентальпії, показаної на рис.2.2 та:

$$\begin{aligned} r_{VT} &= \frac{(\dot{V})}{(\dot{V})^{\max}} \\ r_v &= [(-0,21 \cdot r_{VT} + 1,117) \times r_{VT} - 2,533] \times r_{VT} + 2,588 \times r_{VT} + 0,038 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Тоді ізонтропічну ефективність турбіни можна виразити як:

$$\eta_s = 0,86 \times rh \times rv \quad (2.4)$$

Також  $\eta_s$  можна виразити як:

$$\eta_s = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_5^s} \quad (2.5)$$

Якщо для турбіни вхідний і вихідний стани фіксовані під час роботи, припущення про  $\eta_s$  виконується. Однак для більшості діючих турбін в ОЦР конденсаційні системи мають повітряне охолодження, і, отже, на тиск

конденсатора суттєво впливає температура повітря, а отже, продуктивність турбіни значно змінюється. Отже, припущення про постійне  $\eta_s$  не є реальною характеристикою турбіни. Наприклад, ієнтропічна ефективність турбіни, розглянута в цьому дослідженні з фіксованим вхідним режимом, побудована як функція тиску на виході (рис.2.5). Залежність потужності турбіни від тиску на виході також включена на рис.2.5. Існує оптимальний тиск для максимальної вихідної потужності турбіни. Відхилення від цього тиску негативно впливає на потужність турбіни. Цей ефект є більш помітним при низькому тиску на виході з турбіни. На відміну від цього, якщо ізоцентрова ефективність є постійною, отримується монотонне збільшення вихідної потужності при зменшенні тиску на виході. Таким чином, постійна ізонтропічна ефективність є не тільки кількісно неправильною, але і дає якісно різні результати; для імітації фактичної продуктивності турбіни в моделі слід застосувати кореляцію ізоцентрової ефективності[27].

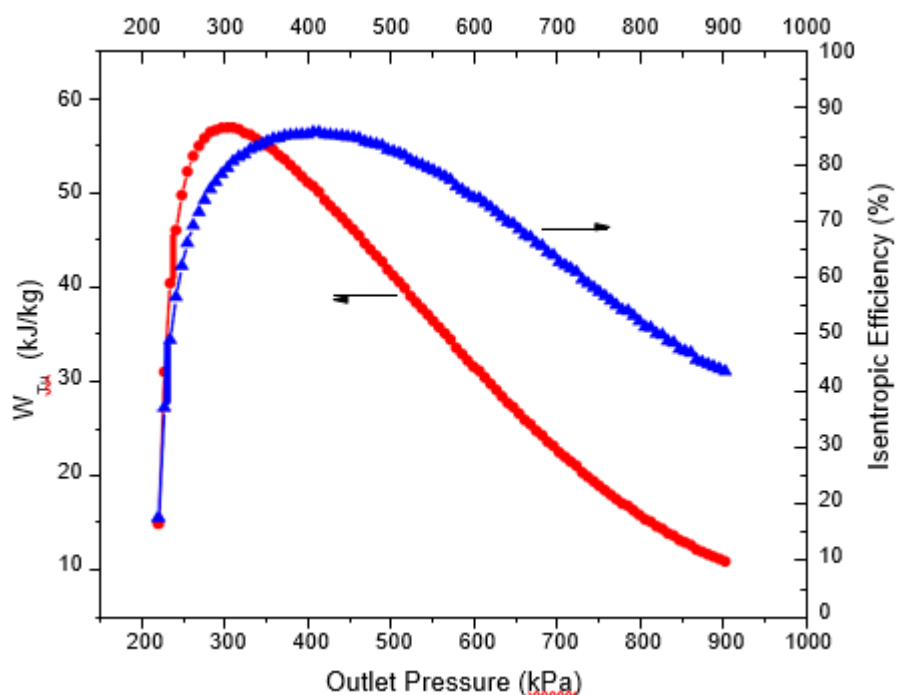


Рисунок 2.5 - Крива ізотропної ефективності турбіни

Ця турбіна розроблена для ОЦР з Ізобутаном в якості РР. Ця крива розраховується для фіксованого стану на вході:  $\dot{m}^{PP} = 201,60$  кг / с,  $T_4 = 101,11$  °С і  $P_4 = 1654,74$  кПа. Крім того, відповідна потужність турбіни показана на

лівій боковій осі. Максимум ізотропної ефективності та вихідної потужності отримується при різних тисках на виході.

Як зазначалося раніше, система КПО складається з двох паралельних баків. Витяжна труба від кожного рекуператора розділена між відсіками і проходить через три вентилятори послідовно. На виході з системи КПО ГР повинен знаходитися в рідкому стані. Для задоволення цієї вимоги вказано значення  $0,625\text{ }^{\circ}\text{C}$  переохолодження. Система КПО змодельована двома комплектами з трьох конденсаторів, кожен з яких представляє ряд з 21 вентилятором. У поточній моделі площі поверхні КПО фіксовані[28].

Для даної конструкції характеристики компонентів системи отримані та реалізовані в моделі. Ці характеристики разом із стратегіями експлуатації визначають  $\dot{m}^{PP}$ ,  $T_5$  і  $P_5$ . Було розглянуто дві стратегії експлуатації: базовий випадок (тобто поточна операція) та оптимальна робота.

В ОЦР  $\dot{m}^{PP}$  такий, що значення перегріву дорівнює заздалегідь заданому значенню,  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  у базовому випадку. Значення  $T_5$  визначається після включення кореляції для  $\eta_s$  в модель. Ця кореляція свідчить про те, що для даних  $(T_4, P_2)$ , після отримання  $P_5$ ,  $\eta_s$  фіксується, і він визначає значення  $T_5$  за допомогою ітераційної процедури. Схема ітерацій, що використовується, є методом бісекції. Ітерацію повторюють до тих пір, поки  $\eta_s$  не обчислюється в рівнянні 3 та не збігається з рів.5. Для визначення  $P_5$  вводяться два набори специфікацій. Потужність охолодження системи СКПО є функцією  $T_{\text{amb}}$  та частоти роботи вентиляторів ( $f_f$ ). Спочатку визначено, що для даної охолоджуючої здатності СКПО  $P_5$  є таким, що РР після СКПО має  $0,625\text{ }^{\circ}\text{C}$  переохолодження. Потужність охолодження конденсаційної системи з повітряним охолодженням обмежена, і вона не може забезпечити будь-яке бажане значення  $P_5$ . Як зазначалося на рис.2.5, вихідна потужність турбіни має оптимум при певному значенні  $P_5$ . Таким чином, якщо це можливо, слід керувати системою в цій оптимальній точці. Однак такого типу операції можна досягти лише за умови, що  $T_{\text{amb}}$  та  $f_f$  забезпечують можливість мати достатню охолоджувальну здатність без пропорційного високого навантаження. Щоб представити другий набір специфікацій у моделі, потрібно розділити роботу системи на дві області



на основі визначеного значення  $P_5$ . Для  $T_{amb}$ , якщо  $P_5 \leq P_{opt}$  при максимальному навантаженні вентиляторів (максимум  $f_f$ ), охолоджуюча здатність знижується, щоб зберегти  $P_5 = P_{opt}$ . В іншому випадку система СКПО працює при максимальному навантаженні. Налаштування охолоджувальної потужності системи СКПО досягається завдяки вбудовуванню в цю модель вентиляторів ПЗЧ. Швидкість потоку повітря через вентилятори можна визначити, коли будуть доступні криві продуктивності вентиляторів. Ці кореляційні характеристики включені в модель через специфікації проекту в AspenPlus. Використовуючи ці співвідношення для конкретного  $f_f$  та заданих щільностей повітря на вході та виході СКПО, можна визначити масову швидкість потоку повітря[29].

Після введення цих конструктивних характеристик та стратегій експлуатації в Aspen Plus вводяться два набори блоків обчислювачів. Перший набір визначає проміжні змінні, необхідні для подачі на симулятор. Сюди входять витрати повітря через вентилятори, коефіцієнти тепловіддачі та перепади тиску. Загальну швидкість потоку повітря можна отримати з поданих співвідношень вентиляторів. Введені кореляційні коефіцієнти тепловіддачі та перепаду тиску введені як калькуляторні блоки для кожного компонента. Другий набір блоків калькулятора використовується для подальшої обробки результатів, тобто для визначення масової витрати через кожен насос, паразитної роботи ( $\dot{W}_{pa}$ ) та ефективності ОЦР[29].

Оскільки для моделювання системи використовується послідовний модульний підхід, петлі в ОЦР (рис.2.3) замінюються потоками розриву. Ця умова для кожного потоку включена в технічні умови проектування. Визначено три блоки збіжності: у першому блоці включені всі конструктивні характеристики, що стосуються системи КПО та тиску на виході з турбіни ( $P_5$ ); у другому вказано, що два паралельних вхідних потоки (потоки рідини) до рекуператорів сходяться разом; і в останньому блоці зазначено, що два потоки, що виходять з рекуператорів (потоки рідини), сходяться разом[30].

### 2.3 Оптимізація роботи ОЦР

Після перевірки модель досліджується для отримання оптимальних робочих параметрів та стратегії. Якщо ігнорувати виснаження геотермального джерела, його можна розглядати як безперервний потік теплової енергії. Таким чином, доки задовольняються мінімальна температура на виході та тиск розсолу, максимальна вихідна потужність системи при мінімальній витраті розсолу є сприятливою. У поточному дослідженні масова витрата ГР вважається постійною[30].

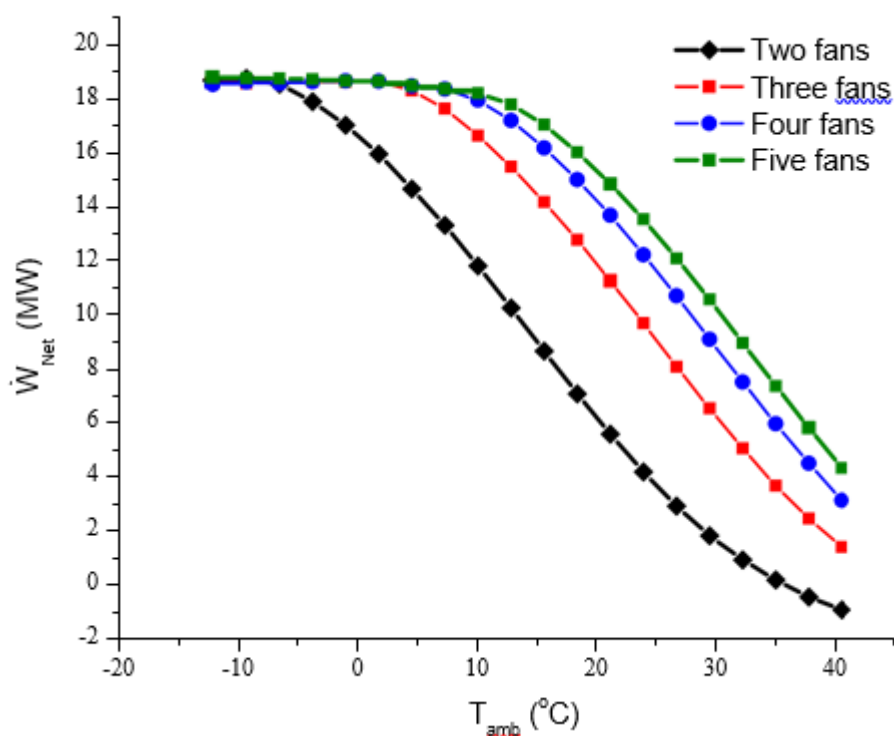


Рисунок 2.6 - Порівняння ефективності ОЦР у різних конфігураціях системи СКПО: два, три, чотири та п'ять вентиляторів у кожній бухті

Результати порівняння свідчать про те, що збільшення охолоджувальної здатності системи може суттєво вплинути на продуктивність системи при високій температурі  $T_{amb}$ .

Таким чином, в якості цільової функції вибирається максимальна вихідна потужність системи. Чиста потужність ОЦР - це потужність, що виробляється

турбінами, мінус паразитарна роботи системи. Та робота системи, яка включає роботу насосів та вентиляторів КПО, може бути записана як:

$$\dot{W}_{\text{мережі}} = \dot{W}_{tu}(\dot{m}^{WF}, T_4, P_4, T_5, P_5) - \dot{W}_{pa}(\dot{m}_{pa}^{WF}, V_{air}, f_f \dot{m}^{ttB})$$

При температурі навколишнього середовища  $-1,11^{\circ}\text{C}$ , проблема оптимізації вирішується першим підходом, а результати наведені на рис.2.7. Цей показник свідчить про те, що максимальне значення  $\dot{W}_{\text{мережі}}$  досягається, якщо вхід турбіни відповідає насиченій парі при максимально можливому тиску. Цей результат демонструє, що поточна операція не є оптимальною[31].

Чиста потужність, вироблена в оптимальній точці, на 3,8% перевищує поточний робочий стан. Крім того, значення ККД як функції незалежних змінних показано на рис.2.8. Результати свідчать про те, що  $\eta_s$  майже не залежить від стану перегріву та функції зростаючого тиску. Як вже обговорювалось, для даної  $T_{amb}$ ,  $\eta_{II,g}$  залежить лише від  $\dot{W}_{\text{мережі}}$  і є максимальним, коли вихідна потужність максимальна. На відміну від цього,  $\eta_I$  показує максимум при максимально можливих  $\Delta T_{tu}$  та  $P_2$ , тобто його максимум не збігається з максимумом  $\dot{W}_{\text{мережі}}$ .

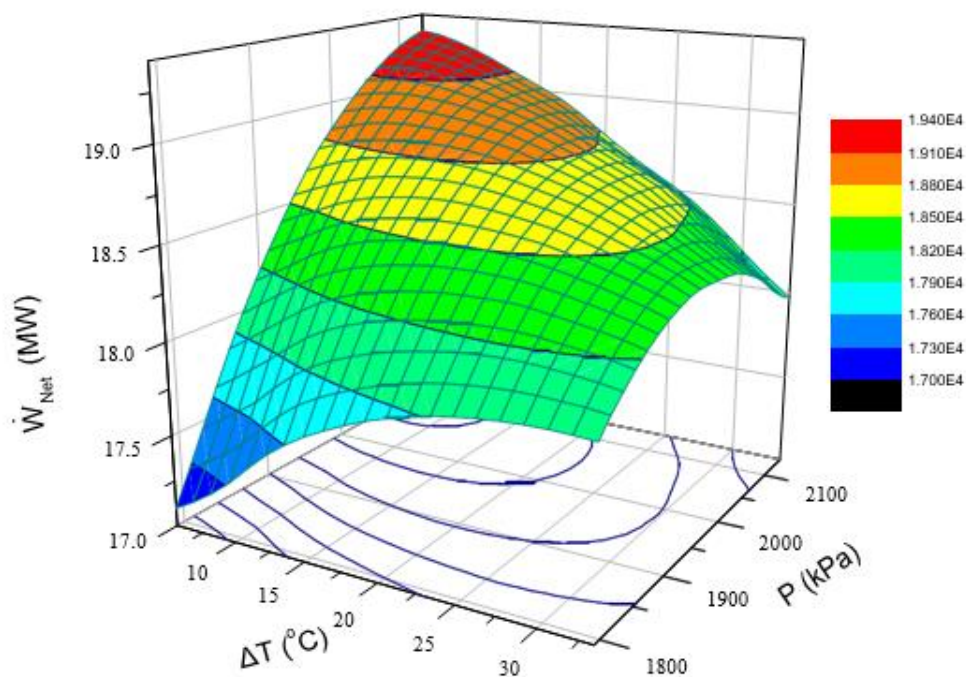


Рисунок 2.7 - Значення роботи мережі як функції двох незалежних змінних,  $\Delta T_{tu}$  та  $P_2$  для температури навколишнього середовища  $-1,11\text{ }^{\circ}\text{C}$

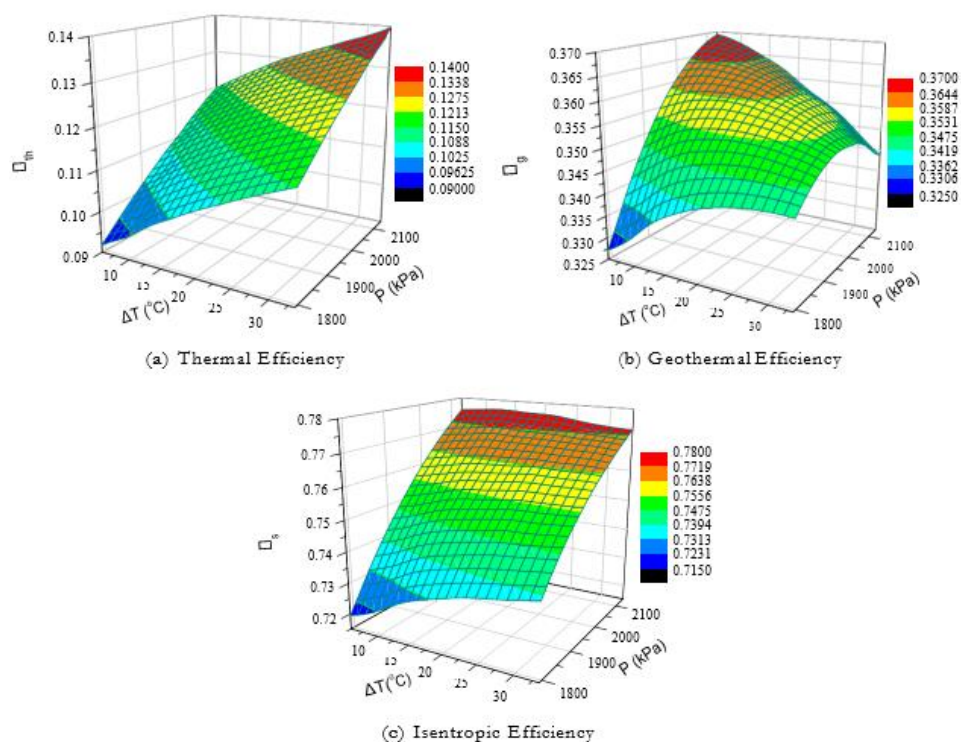


Рисунок 2.8 - Значення  $\eta_I$ ,  $\eta_{II,g}$  та  $\eta_s$  турбіни показані як функції двох незалежних змінних при  $T_{amb} = -1,11\text{ }^{\circ}\text{C}$

Задача оптимізації також вирішена для температури навколишнього

середовища  $26,7^{\circ}\text{C}$ , а результати наведені на рис.2.9. Для цієї високої температури навколишнього середовища максимум чистої роботи досягається, коли встановлено максимально можливий тиск і близький до максимального перегрів[32]. Максимальна чиста робота ОЦР отримується за відсутності перегріву на вході в турбіну. Значення цільової функції в цьому випадку може бути збільшено на 30,6% за умови правильної експлуатації.

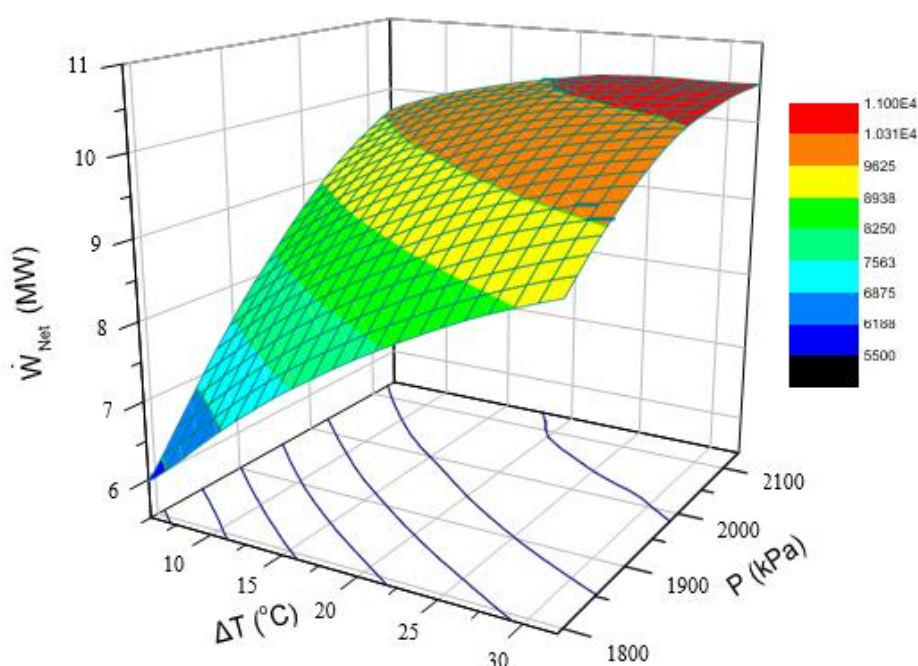


Рисунок 2.9 - Значення чистої роботи побудовано як функцію двох незалежних змінних для  $T_{amb} = 26,7^{\circ}\text{C}$

Порівняння оптимальних умов для двох температур є важливим. Хоча максимум цільової функції виникає при максимальному значенні можливого тиску в обох випадках, показники оптимального перегріву в цих випадках різняться. Ці результати пропонують різні оптимальні стратегії роботи на основі  $T_{amb}$ . Представлені результати дозволяють припустити, що залежно від  $T_{amb}$  ОЦР повинен діяти за різними правилами[32]. Цей висновок досліджується далі шляхом визначення цільової функції при максимально можливому  $P_2$  для діапазону  $\Delta T_{tu}$  як функція  $T_{amb}$ . Результати показані на рис.2.11(а). Значення  $\Delta T_{tu}$  включені для деяких оптимальних умов. Для  $T_{amb} \leq$

$10^{\circ}\text{C}$  оптимальним  $\Delta T_{tu}$  є нуль; для  $T_{amb.} > 10^{\circ}\text{C}$ , оптимальний  $\Delta T_{tu}$  безперервно зростає з  $T_{amb.}$  і, нарешті, досягає плато, заданого як температура на вході розсолу.

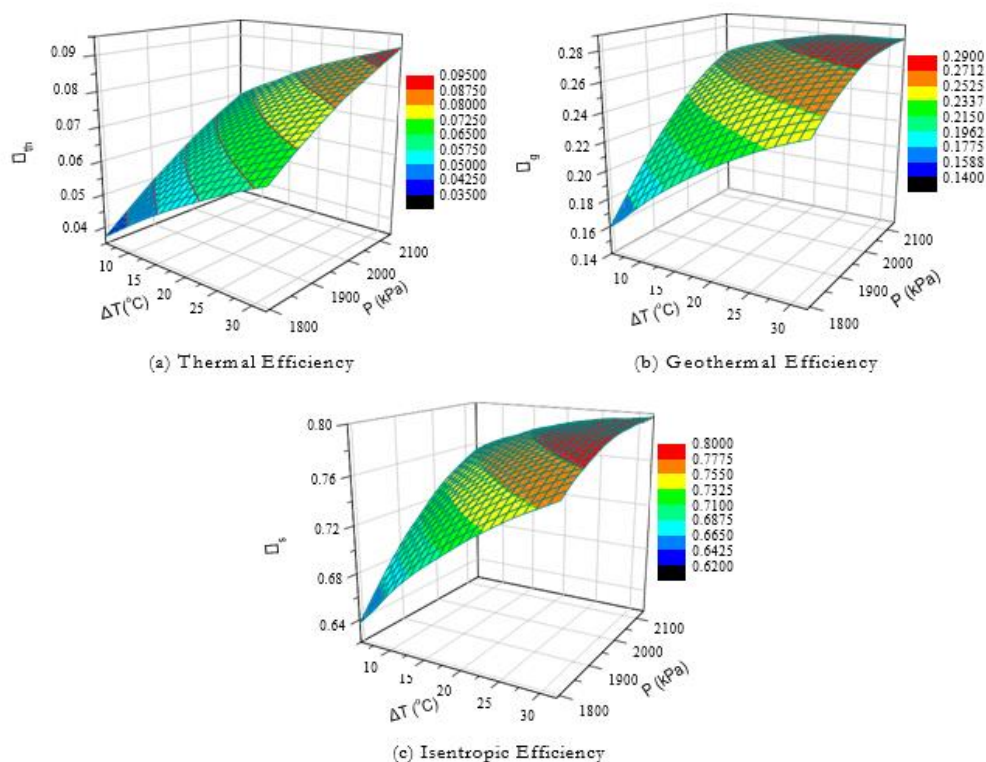


Рисунок 2.10 - Значення  $\eta_I$ ,  $\eta_{II,g}$  та  $\eta_s$  турбіни показані як функції двох незалежних змінних для  $T_{amb} = 26,7^{\circ}\text{C}$

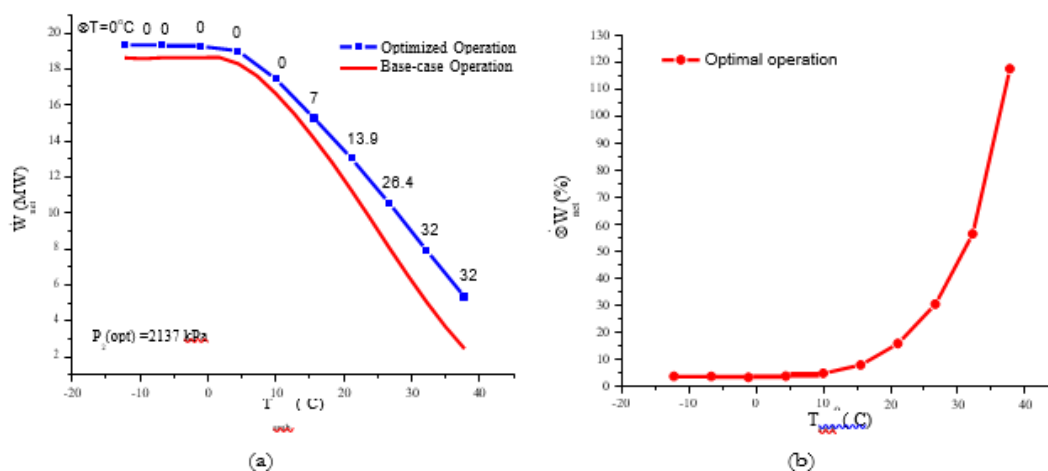


Рисунок 2.11 - (а) Оптимальні значення цільової функції порівнюються з базовими операціями як функція  $T_{amb.}$  (б) Відсоток збільшення чистої вихідної потужності системи порівняно з базовим режимом роботи

Відсоток збільшення вихідної потужності ОЦР визначається як:

$$\Delta \dot{W}_{net} = \frac{\dot{W}_{net}^{Opt} - \dot{W}_{net}}{\dot{W}_{net}} \times 100 \quad (2.6)$$

Значення  $\Delta W_{\text{мережі}}$  як функції  $T_{\text{amb}}$  показано на рис.2.11(b). Потрібно зауважити, що при високих температурах навколишнього середовища оптимальна робота забезпечує до 19% більше  $\Delta W_{\text{мережі}}$  в порівнянні з випадком чотирьох вентиляторів. Іншими словами, проста зміна в роботі може дати вищі переваги, ніж додавання потужності охолодження, що передбачає значні капітальні витрати[33].

Коли  $\eta_s$  постійний, максимальна генерація електроенергії досягається за рахунок підтримання вхідного стану турбіни на лінії насичення парами. Однак, коли  $\eta_s$  не є постійним (на це впливає охолоджуюча здатність СКПО), оптимальна робота системи досягається, коли  $\eta_s$  є максимальним. Властивості потоків для оптимального стану при  $T_{amb} = 26,7$  °C представлені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 - Властивості потоків при оптимальній роботі для  $\Delta T_{tu} = 32$  °C та  $P = 2137$  кПа при  $T_{amb} = 26,7$  °C

Потік	Рідина	T °C	P кПа	$\dot{m}$ кг/с	$V_{Frac}$	h кДж/кг
IBL-1	Isobutane	39.5	532.6	1426	0	-2632
IBL-3	Isobutane	39.5	532.6	475	0	-2632
IBH-1	Isobutane	40.7	2137	475	0	-2628
IBH-4	Isobutane	40.7	2137	713	0	-2628
IBH-6	Isobutane	69.3	2126	713	0	-2553
IBH-8	Isobutane	69.3	2127	1426	0	-2553
IBH-9	Isobutane	102.0	2061	1426	0.084	-2437
IBH-10	Isobutane	132.2	1994	1426	1	-2164
IBL-6	Isobutane	93.5	541	713	1	-2213
IBL-8	Isobutane	56.2	540	713	1	-2288
IBL-10	Isobutane	40.4	537	713	0.68	-2418
IBL-11	Isobutane	40.3	535	713	0.31	-2534
Air1	Air	26.7	87.9	6478	1	1.7
Air2	Air	41.0	87.9	6478	1	16.0
Air3	Air	26.7	87.9	6512	1	1.7
Air4	Air	39.2	87.9	6512	1	14.3
Air5	Air	26.7	87.9	5566	1	1.7
Air6	Air	39.3	87.9	5566	1	14.3



Щоб дослідити вплив оптимальної роботи на загальне виробництво електроенергії на станції, потрібно підібрати дані про температуру навколишнього середовища та виробництво електроенергії за один рік (листопад 2019- листопад 2020). Розподіл частоти температури навколишнього середовища протягом одного року показано на рис.2.12(a). Для цього періоду часу виробництво електроенергії в базовому випадку та при оптимальній роботі порівнюються та показані на рис. 2.12(b). Ці результати дозволяють припустити, що загальне виробництво електроенергії на данній станції може бути збільшено на 9% за умови оптимальної роботи без будь-яких змін конструкції. На основі даних про ціну на електроенергію (Фіксована ціна протягом року), наданих ENEL, виявлено, що оптимальна робота може збільшити дохід на 10,2%. Більша частина приросту припадає на високу температуру навколишнього середовища, яка, як правило, корелюється з високою ціною електроенергії, і, отже, економічна вигода ще вища[35].

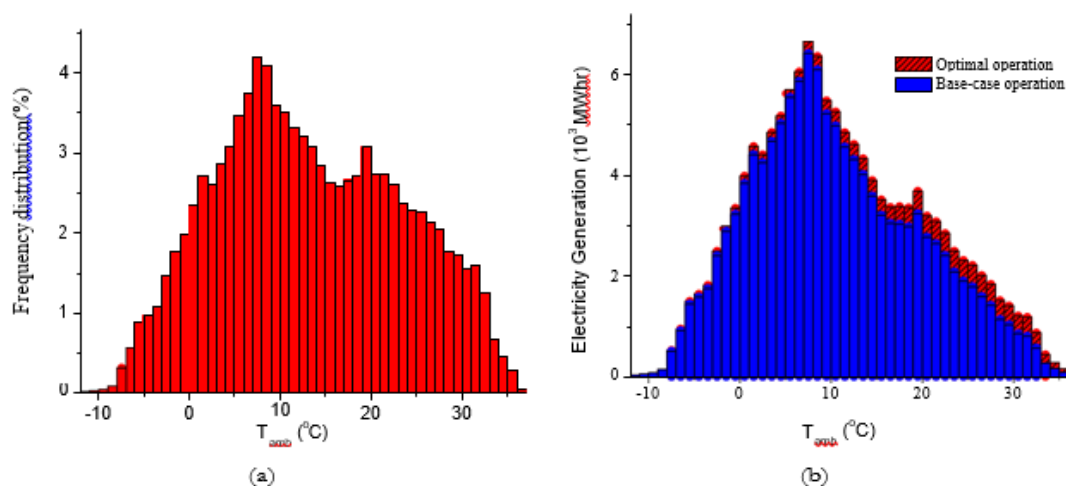


Рисунок 2.12 - (a) Температура навколишнього середовища протягом одного року. (b) Порівняння загального виробництва електроенергії в базовому режимі



## Висновки до розділу 2

Для існуючого ОЦР, оснащеного системою СКПО і використовуючи низькотемпературне геотермальне джерело, в Aspen Plus була розроблена модель. Вона включає фактичні характеристики всіх компонентів існуючого циклу. Симулятор перевіряється набором приблизно 5000 вимірних даних. Модель припускає, що при високих температурах навколишнього середовища чиста вихідна потужність ОЦР обмежується потужністю системи СКПО. Це обмеження можна пом'якшити шляхом включення більшої кількості вентиляторів в систему СКПО або кращою стратегією роботи. Було виявлено, що оптимальні стратегії роботи забезпечують таке ж збільшення чистої потужності (до 117%), як включення більшої кількості вентиляторів у систему СКПО. Перший є очевидно сприятливим, оскільки не вимагає додаткових капітальних витрат. Загальний приріст виробництва електроенергії (МВт-год) протягом року становить  $\approx 9\%$ , причому більша частина зростає при високій температурі навколишнього середовища, тобто в періоди, коли електроенергія є більш цінною.

## З ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ЗАКАРПАТСЬКІЙ ОБЛАСТІ

У межах Західної України в Закарпатті, Івано-Франківській, Львівській та Чернівецькій областях, а також Кримському півострові добре відомих своїм геотермальним потенціалом. На Закарпатті наявність геотермальної аномалії з температурою близько  $60^{\circ}\text{C}$  на глибині 1200 м представляє значний енергетичний ресурс. Згідно з дослідженням, проведеним наприкінці 1990-х років, на основі оцінки 20 розвідувальних свердловин було виявлено 7 геотермальних полів із загальною продуктивністю  $100 \text{ км}^3/\text{добу}$  та енергетичним потенціалом  $182,7 \text{ МВт}$ , що зберігається у водоносних шарах в межах 400-2300 м і температурою до  $90^{\circ}\text{C}$ . Високі оцінки геотермальних ресурсів проводили Гордієнко та ін. для глибин 3, 4, 5 і 6 км. Природний тепловий потік тут коливається від  $35\text{-}40 \text{ мВт}\cdot\text{м}^{-2}$  у південно-західній частині Східно-Європейського Кратону та Прикарпатській глибині,  $50\text{-}60 \text{ мВт}\cdot\text{м}^{-2}$  у зовнішніх Карпатах до  $80\text{-}120 \text{ мВт}\cdot\text{м}^{-2}$  у Паннонському басейні. Карти температур на -1000, -2000 та -3000 м демонструють значні коливання температур та наявність локальних геотермальних аномалій, особливо у Закарпатті та Львівській області (рис.3.1).

### 3.1 Геотермальний потенціал існуючих родовищ

Значення геотермального потенціалу в західній частині України пов'язане з наявністю нафтогазових родовищ. Наприклад, у Бориславі (Львівська область) видобуток нафти розпочався у 1865 році, тоді як на Прикарпатті активна розвідка нафти та газу розпочалася в середині 1950-х років і призвела до відкриття понад 100 родовищ нафти, газу та газоконденсату з кількома пластами[36].

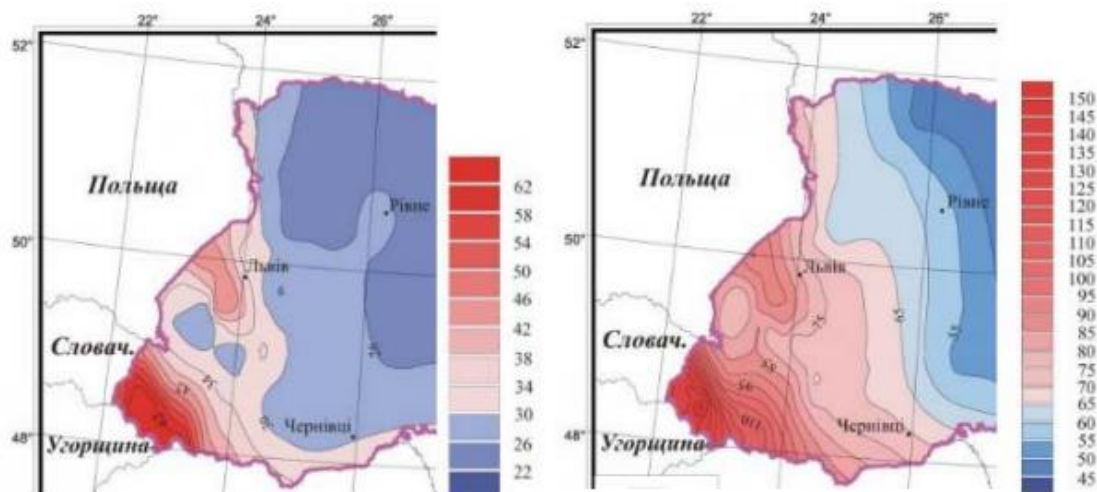


Рисунок 3.1 - Карта температури на глибині 1000 м (ліворуч) та 3000 м (праворуч)

Вуглеводні накопичуються в інтервалах глибин від 500 до 4800 м і пов'язані з кластичними породами, переважно пісковиком. Водойми виробляють в умовах природного виснаження, природного водного притоку або розливу, перебуваючи на різних стадіях розвитку. Деякі з них перебувають на першій стадії, а деякі вже на заключній, що характеризується низькими показниками нафти та великими водотоками. Вода для підтримки тиску і витіснення масла або береться з поверхневих джерел, або повторно закачується після виробництва. Для виробництва геотермальної енергії пізніші є потенційними кандидатами, оскільки вони усувають необхідність буріння дублетів свердловин і готові до негайного виробництва енергії з мінімальними додатковими вкладеннями. У цьому дослідженні для оцінки потенціалу та стійкості видобутку гарячої води була використана синтетична чисельна імітаційна модель кварцових плям для типових параметрів та параметрів нафтового родовища. Проведено аналіз чутливості щодо мінливості властивостей пласта та експлуатаційних обмежень свердловини для виявлення оптимальних налаштувань та обмежень[37].

### 3.2 Чисельна імітаційна модель

Було створено низку різних синтетичних моделей із чотирма-п'ятьма точковими свердловинами (один інжектор та чотири виробники, розміщені в кутах). Нашим завданням було виконати чутливість типового пласта та умови експлуатації на прорив води та можливу швидкість вироблення енергії для

- різний інтервал колодязів;
- товщина товщини пласта;
- проникність;
- пористість;
- температура пласта;
- норми виробництва та закачування;
- повторно вводиться температура води.

Створено моделі для різного глибини свердловин (150, 250, 350 та 450 м) та різної ефективної товщини пласта (20, 50 та 100 м). Розміри клітин у всіх випадках підтримували незмінними при  $10 \times 10$  м поперек і 2 м товщини клітини. Приклад моделі для глибини 150 м та товщиною 20 м наведено на рис.3.2..

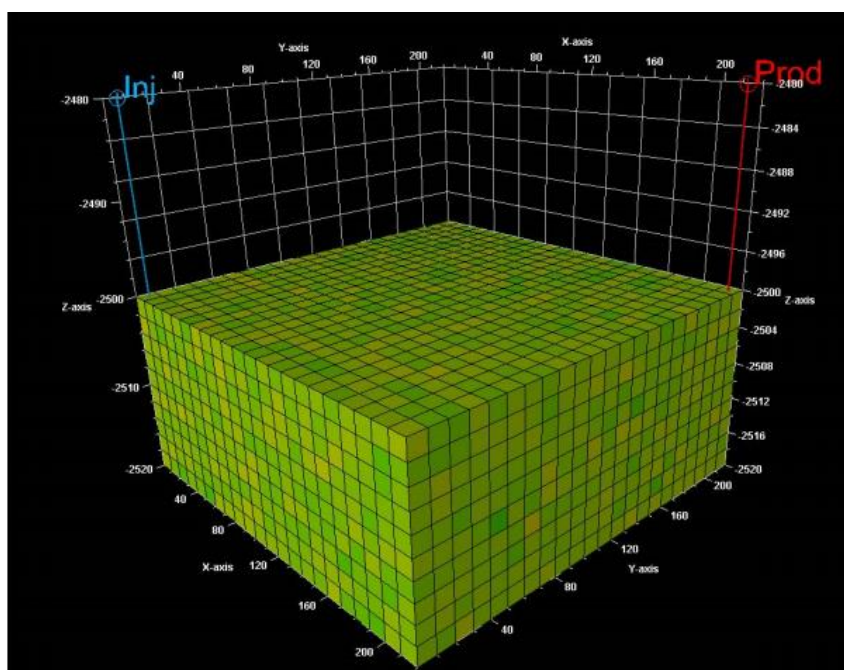


Рисунок 3.2 - Приклад сітки числового моделювання

Сітка була заповнена пористістю та проникністю, припускаючи їх стаціонарність для загальноприйнятих значень у зоні дослідження. Для пористості 4 випадки оцінювались із середнім значенням 6, 8, 10 та 12%, після нормального розподілу, усіченого на рівні 4% та 20% та стандартного відхилення 0,05. Гістограма з розподілом показана на рис. 3. Горизонтальна проникність також була заповнена для 4 різних середніх випадків 5, 10, 20 і 50 mD на основі усіченого логарифмічного нормального розподілу при 1 і 100 mD та стандартного відхилення 2 (рис. 4). Вертикальна проникність зменшується в 10 разів по відношенню до горизонтальної. Відносні проникності були створені на основі функції Кори для вологих пісковиків з показником води Кори 5 та коефіцієнтом нафти Води Кори 2,5. Початкове насичення водою коливалось від 0,16 до 0,22. В'язкість нафти та інші властивості тиск-об'єм-температура формуються за допомогою кореляцій для щільності олії 750, 800 та 850 кг / м<sup>3</sup>.

Стійкість виробництва енергії оцінювали для різних початкових температур пласта, швидкості закачування та температури повторно закачуваної води, показані в таблицю 3.1.

Аналіз результатів проводився в кілька етапів. По-перше, ми зосередилися на реакції температури видобутку та часу прориву води від закачування до видобувної свердловини. Найгірші сценарії прориву закачаної води представляють мінімальну товщину пласта 20 м і мінімальний відстань свердловини 150 м (рис. 3.5) [38].

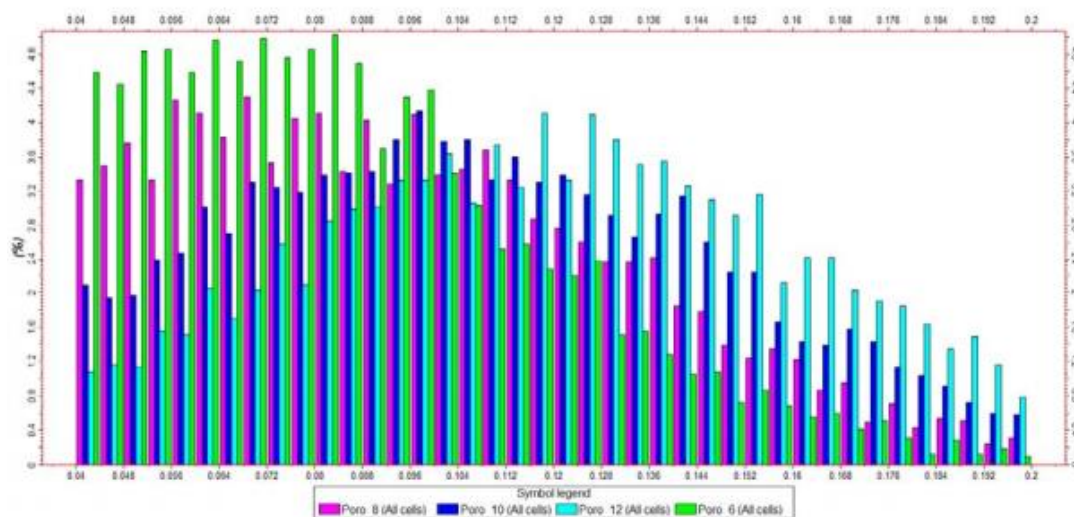


Рисунок 3.3 - Розподіл пористості для середніх значень 6, 8, 10 та 12%, що використовуються у пробігах чутливості

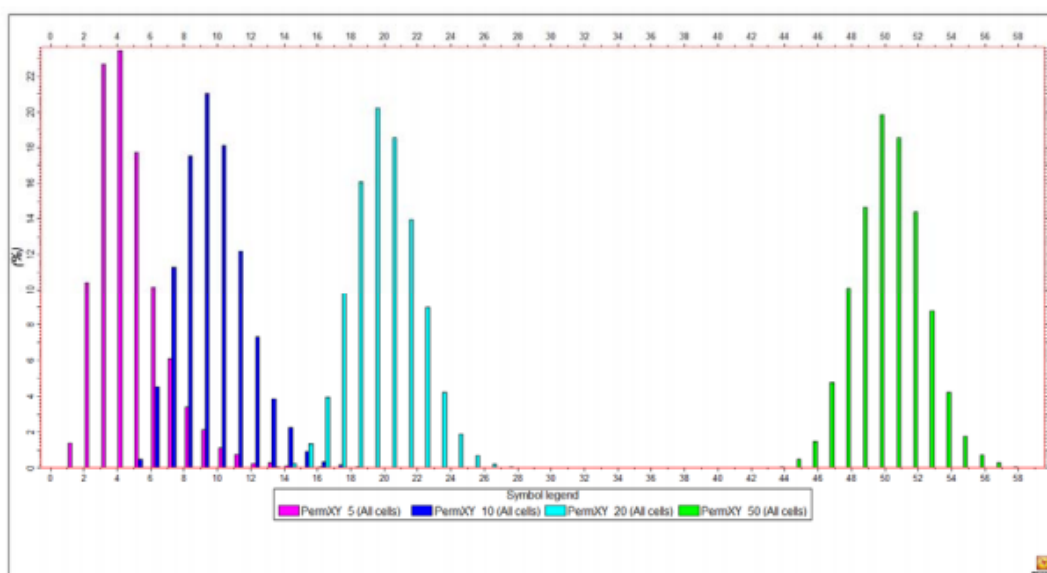


Рисунок 3.4 - Розподіл проникності для середніх значень 5, 10, 20 і 50 mD, що використовуються в пробігах чутливості

Таблиця 3.1 - Невизначені параметри, що контролюють стійкість виробництва енергії

Параметри	Значення параметрів			
Температура пласта ( $^{\circ}\text{C}$ )	50	60	70	80
Виробництво ( $\text{м}^3/\text{день}$ )	5	25	50	75
Температура води, що вводиться повторно ( $^{\circ}\text{C}$ )	10	20	30	40
Середній поририст (%)	6	8	10	12
Середня горизонтальна проникність (mD)	5	10	20	50
Початкове насичення водою (фрак.)	0.16	0.18	0.2	0.22

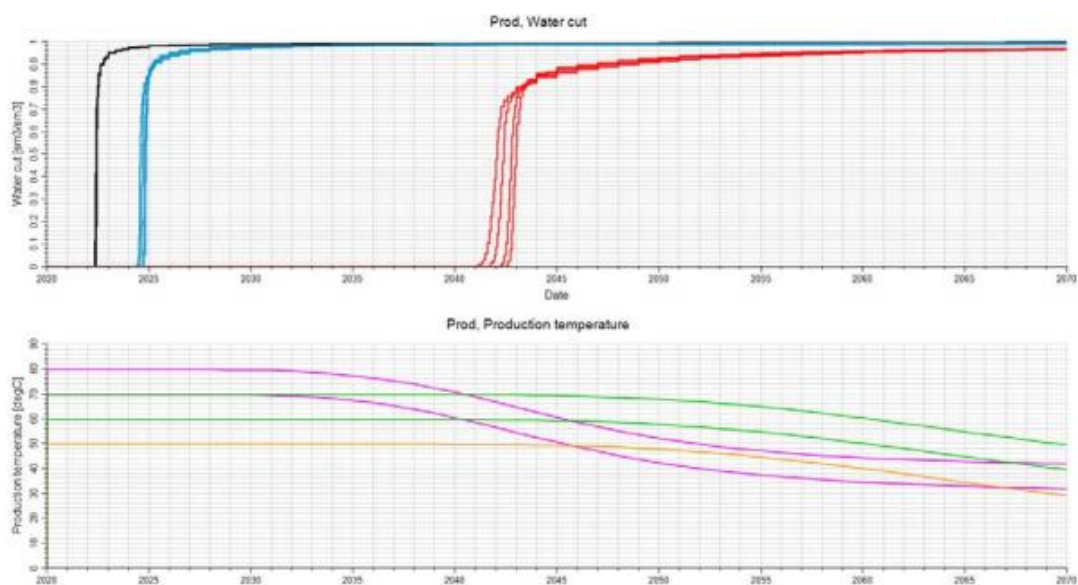


Рисунок 3.5 - Результати чутливості часу прориву закачаної холодної води при різній інжекційній здатності та проникності пласта

Високі показники закачування 50 і  $75 \text{ м}^3 / \text{добу}$  призводять до швидкого прориву води приблизно через 2 роки для всіх діапазонів проникності (чорні лінії), вприскування при  $25 \text{ м}^3 / \text{добу}$  затримує її до 4 років і низький рівень нагнітання при  $5 \text{ м}^3 / \text{день}$  в залежності від проникності відбувається через 21 або 23 роки. У той же час прорив прохолодного фронту, і як результат,

зниження температури, що виробляється, спостерігається лише через 10 років для випадку максимальної ін'єкційності (фіолетові лінії на нижній ділянці). Для випадків середньої ін'єкційності  $25 \text{ м}^3 / \text{день}$  виробництво при постійній температурі підтримується протягом 20-25 років (зелені лінії), а також при низькій ін'єкції (оранжева лінія). Наступний етап був зосереджений на оцінці впливу швидкості закачування та глибини свердловин у разі максимальної проникності (50 mD) та мінімальної товщини пласта (20 м) на температуру рідини та час прориву води. З графіку на рис. 6 чітко видно, що на температуру води впливає лише найменший інтервал, тоді як швидкість закачування та малий інтервал також мають найбільший вплив на час прориву води[39]. Для максимальної глибини свердловин та швидкості закачування прорив води відбувається через 20 років експлуатації.

Також оцінювали вплив товщини пласта на температуру виробництва, і чим менша товщина, тим швидший прорив при тій же граничній швидкості закачування  $50 \text{ м}^3 / \text{добу}$ . Вплив температури повторно вприскуваної води на вироблену воду для випадку з мінімальною товщиною пласта (20 м), відстанню свердловини 150 м, максимальною проникністю 50 мД і високою швидкістю нагнітання  $50 \text{ м}^3 / \text{добу}$  показано на рис. 7. Через 50 років резервуар охолоджується майже до температури води, що повторно вводиться (10, 20, 30 і  $40^\circ \text{C}$  відповідно). На рис. 8 ми бачимо приклад охолодження фронту який прогресує в часі, коли температура повторно вприскуваної води дорівнює  $20^\circ \text{C}$ . У таблиці 3.2 узагальнено параметри чутливості, які дали найбільшу сукупність вироблення енергії при 100% видобутку для 10 найкращих випадків, згрупованих на основі товщини пласта. Максимальна кумулятивна енергія  $261,18 \times 10^6 \text{ ГДж}$  генерується для товщини 100 м з мінімальним інтервалом 150 м, а решта параметрів при їх максимальних значеннях. Для пласта товщиною 50 м оптимальним є відстань 250 м з рештою параметрів при їх максимальних значеннях. Для випадків мінімальної товщини (20 м) максимальна енергія також генерується, коли відстань між свердловинами



дорівнює 250 м, але решта параметрів не мають максимальних значень. Слід зазначити, що загальна генерована енергія на 100 м і 50 м дуже порівнянна, що призводить до різниці близько  $15 \times 10^6$  ГДж, тоді як за мінімальної товщини ми можемо отримати в 1,7 рази менше[40].

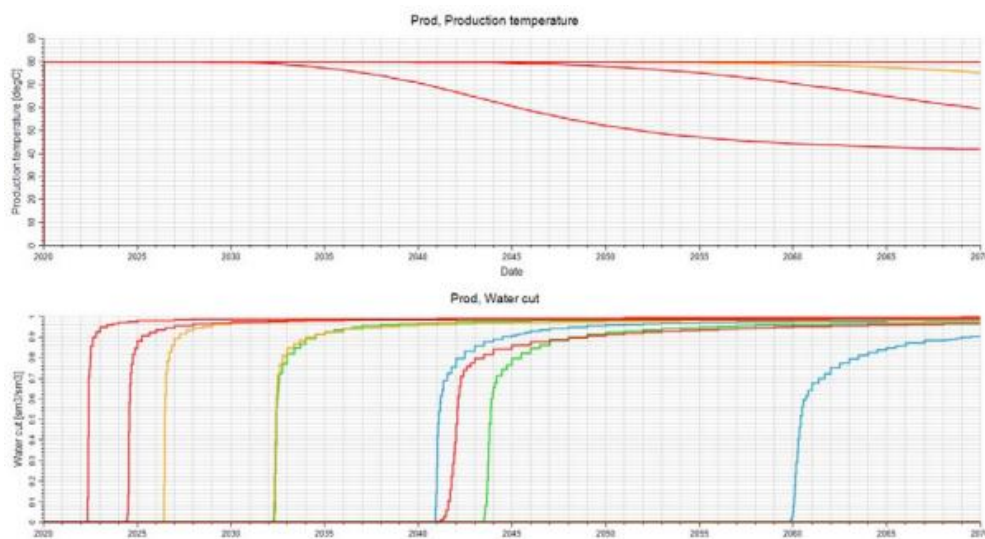


Рисунок 3.6 - Результати чутливості часу пробивання води та холодного фронту при різних показниках інжекції та відстані між свердловинами (червоний - 150 м, помаранчевий - 250 м, зелений - 350 м, синій - 450 м)

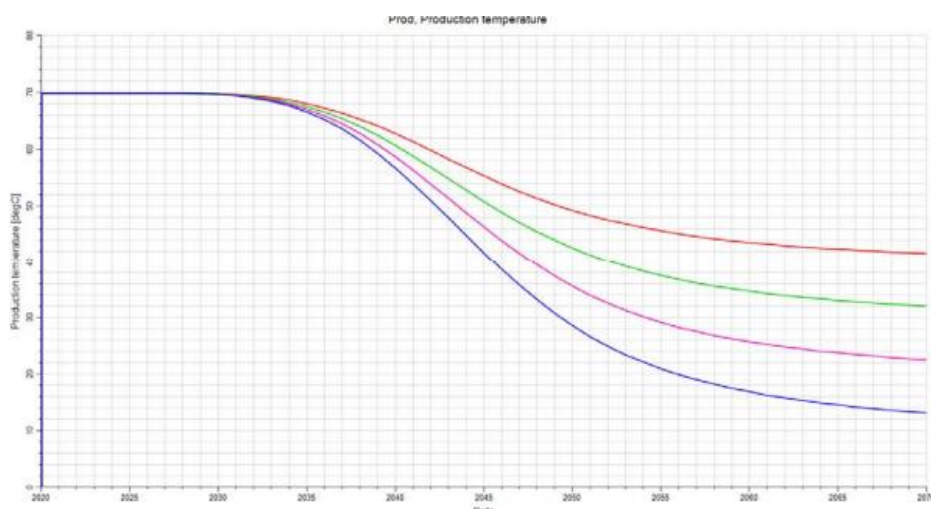


Рисунок 3.7 - Зміна температури виробленої води як функція температури, що вводиться повторно (синя - 10 ° С, рожева - 20 ° С, зелена - 30 ° С, червона - 40 ° С)

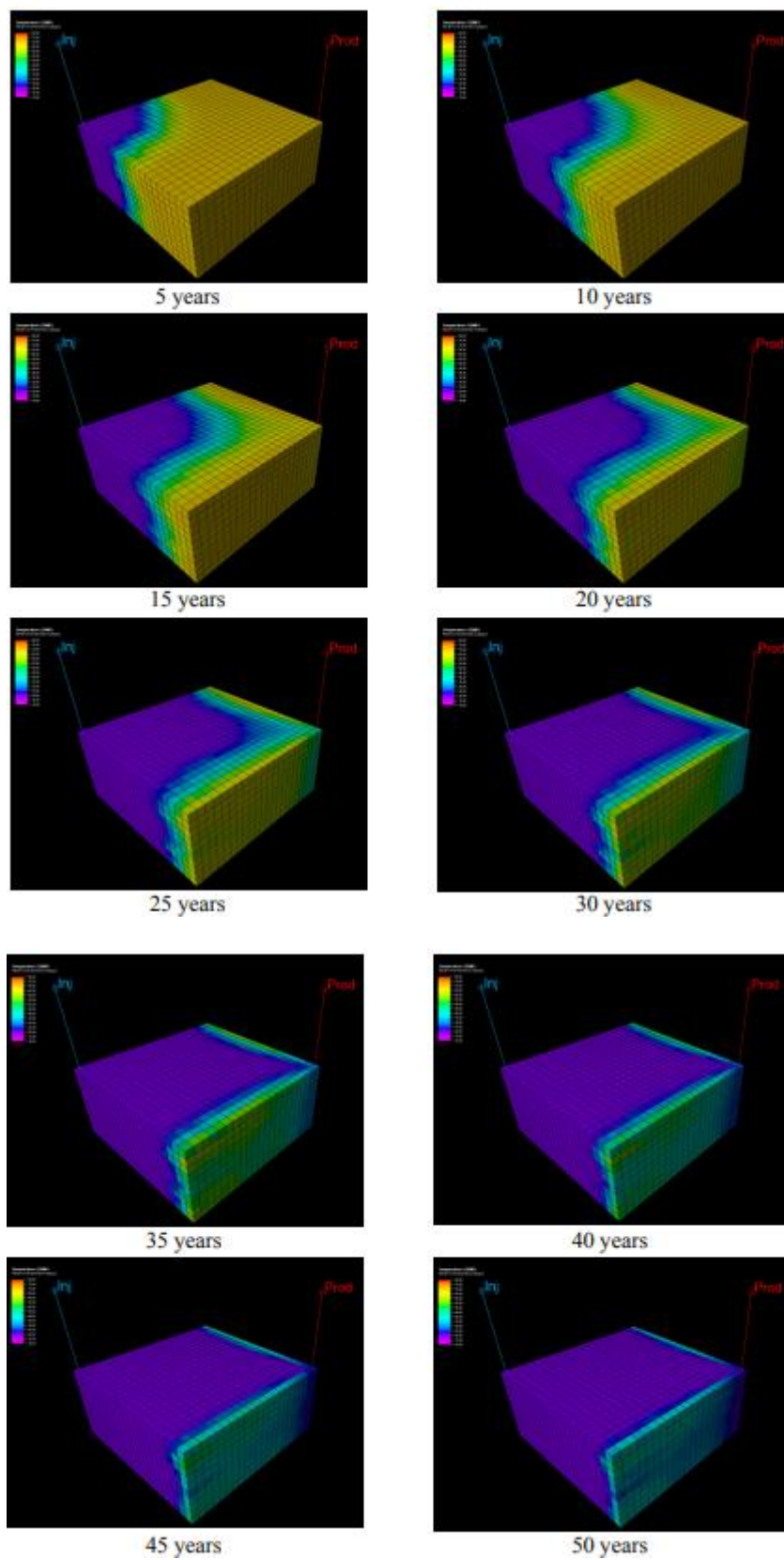


Рисунок 3.8 - Приклад прогресування фронту охолодження в часі

### 3.3 Еколого-економічне обґрунтування застосування геотермальної енергетики в Закарпатській області

Економічний аналіз включає розрахунок витрат на компоненти та придбаного обладнання, витрат на обслуговування, продуктивність та спожиту енергію. Термoeкономічний аналіз - це дослідження економічних принципів з метою ексергійного аналізу досліджуваної системи. Термoeкономічний аналіз застосовується за допомогою рівняння рівноваги вартості компонентів у системі. Це рівняння виглядає так:

$$\sum_{out} \dot{C} + \dot{C}_w = \sum_{in} \dot{C} + \dot{C}_Q + \dot{Z}$$

де  $\dot{C}$  - загальні витрати дол. США;

$\dot{C}_w$  та  $\dot{C}_Q$  - загальні витрати та величина ексергійного потоку, дол. США;

$\dot{Z}$  - загальні річні інвестиційні витрати системи, дол. США.

Загальні витрати та величина ексергійного потоку, вироблені специфічною складовою частиною потужності та тепла системи, мають такі рівняння:

$$\dot{C}_{out} = c_{out} + Ex_{out}$$

$$\dot{C}_{in} = c_{in} \times \dot{Ex}_{in}$$

$$\dot{C}_w = c_w \times \dot{W}$$

$$\dot{C}_Q = c_Q \times \dot{Ex}_Q$$

де  $C$  - середні витрати кожної одиниці ексергії, дол. США;

$C_{in}$  і  $C_{out}$  - загальні витрати та вираження вхідного та вихідного ексергійного потоку конкретного компонента системи, дол. США;

$C_w$  і  $C_Q$  - загальні витрати та величина ексергійного потоку, що

виробляються за рахунок специфічної потужності та тепла системи, дол. США;

$c_w$  та  $c_Q$  - середні витрати кожної одиниці ексергії, що виробляється за рахунок певної складової потужності та тепла системи, дол. США;

$Ex_Q$  - відходи ексергії від нагрівання певного компонента системи, кВт;

$W$  - потужність конкретного компонента системи, кВт; а вхідні та вихідні індекси означають вхід і вихід.

Значення величини ексергії в цьому рівнянні базується на аналізі ексергії в системі[37].

Під час роботи було проведено розрахунок необхідних інвестицій в геотермальну електростанцію (Таб.3.3).

Таблиця 3.3 - Загальна вартість інвестицій у геотермальну електростанцію

Вартість попередньої розвідки електростанції	[m\$]	0.01	1.0
Вартість попередніх техніко-економічних обґрунтувань для заводу	[m\$]	0.58	1.9
Вартість попередніх техніко-економічних обґрунтувань для заводу	[m\$]	0.12	1.3
Вартість обладнання та одиниць енергопередачі	[m\$]	3.60	37.4
Вартість розвідки	[m\$]	0.06	0.7
Вартість бурових робіт електростанції	[m\$]	1.04	10.8
Вартість передачі підземної рідини з електростанції	[m\$]	1.05	10.9
Вартість монтажу обладнання та будівництва електростанції	[m\$]	0.08	0.9
Вартість будівництва свердловини геотермальна	[m\$]	0.05	0.5
Пряма вартість електростанції	[m\$]	0.05	0.5
Непряма вартість електростанції	[m\$]	0.67	6.9
Можлива вартість електростанції	[m\$]	0.15	1.6
Загальна вартість електростанції	[m\$]	0.09	0.9
Вартість експлуатації електростанції	[m\$]	0.34	3.5
Вартість експлуатації та будівництва	[m\$]	1.53	15.9
Вартість передачі електроенергії до електростанції Дамаванд	[m\$]	0.44	4.6
Вартість передачі гарячої води в систему центрального опалення	[m\$]	0.06	0.6
Вартість придбання поштових розподільчих пристроїв	[m\$]	0.03	0.3
Загальна інвестиційна вартість електростанції	[m\$]	9.64	100
Вартість попередньої розвідки електростанції	[m\$]	0.01	1.0
Вартість попередніх техніко-економічних обґрунтувань для заводу	[m\$]	0.58	1.9
Вартість попередніх техніко-економічних обґрунтувань для заводу	[m\$]	0.12	1.3
Вартість обладнання та одиниць енергопередачі	[m\$]	3.60	37.4
Вартість розвідки	[m\$]	0.06	0.7
Вартість бурових робіт електростанції	[m\$]	1.04	10.8

## Продовження таблиці 3.3

Вартість передачі підземної рідини з електростанції	[m\$]	1.05	10.9
Вартість монтажу обладнання та будівництва електростанції	[m\$]	0.08	0.9
Вартість будівництва свердловини геотермальна	[m\$]	0.05	0.5
Пряма вартість електростанції	[m\$]	0.05	0.5
Непряма вартість електростанції	[m\$]	0.67	6.9
Можлива вартість електростанції	[m\$]	0.15	1.6
Загальна вартість електростанції	[m\$]	0.09	0.9
Вартість експлуатації електростанції	[m\$]	0.34	3.5
Вартість експлуатації та будівництва	[m\$]	1.53	15.9
Вартість передачі електроенергії до електростанції Дамаванд	[m\$]	0.44	4.6
Вартість передачі гарячої води в систему центрального опалення	[m\$]	0.06	0.6
Вартість придбання поштових розподільчих пристроїв	[m\$]	0.03	0.3
Загальна інвестиційна вартість електростанції	[m\$]	9.64	100

Період повернення капіталу для геотермальної електростанції був розрахований як 15 років.

Геотермальна енергія є важливою альтернативою для заміщення вичерпаних запасів нафти та газу. Геотермальна енергія не тільки відновлювана, але і є одним із найбільш екологічно чистих рішень для виробництва електроенергії та опалення приміщень. Забруднення атмосфери, якого слід уникнути, є значним[38].

Вуглекислий газ - основний викид парникових газів від геотермальних електростанцій. Ці кількості є невеликими порівняно з викидами електростанції на викопному паливі. Деякі геотермальні водойми містять різну кількість CO<sub>2</sub>. Геотермальна пара зазвичай конденсується після проходження через парову турбіну, але CO<sub>2</sub> не конденсується. Він витягується до вихлопної системи, де через градирні викидається у повітря. Обсяг CO<sub>2</sub>, що викидається в повітря, змінюється залежно від конструкції установки (рис.3.9). Бінарні електростанції не виділяють CO<sub>2</sub>, оскільки геотермальні рідини в цій системі ніколи не потрапляють в атмосферу. Наприклад, геотермальна електростанція яка буде видобувати гарячу воду з глибин 1800 до 2300 метрів, а також усі гази, повністю розчинені в ній, головним чином метан. Він використовуватиметься в якості енергії тепло води та енергію геотермальних газів для виробництва енергії. Будь-який діоксид вуглецю, який утворюється в процесі виробництва або частково розчиняється в геотермальній воді, буде спрямований назад через

свердловини в той самий геотермальний резервуар, і викиди  $\text{CO}_2$  будуть дорівнювати нулю. Еквівалентна вугільна електростанція, 10 МВт чистої потужності, буде викидати від 96000 т / рік до 150000 т / рік  $\text{CO}_2$  залежно від виду вугілля та ефективності роботи станції[39].

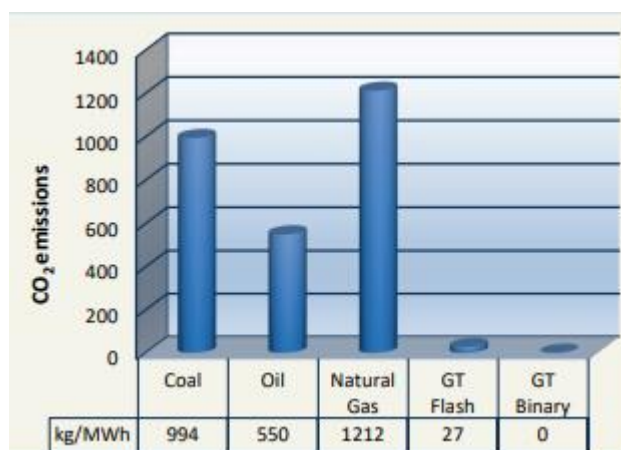


Рисунок 3.9 -  $\text{CO}_2$ , що викидається в атмосферу електростанцією

Викиди вуглекислого газу з геотермального поля можна зменшити за рахунок каскадної експлуатації геотермальної енергії. Якщо одним із споживачів каскаду є теплиця,  $\text{CO}_2$  можна використовувати для рослин.

Викиди  $\text{H}_2\text{S}$  можуть суттєво змінюватися залежно від окремих полів, залежно від кількості  $\text{H}_2\text{S}$  у геотермальній рідині та типу застосовуваної установки. Сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), як зазвичай, зменшується на геотермальних електростанціях. Результатом є перетворення понад 99,9%  $\text{H}_2\text{S}$  з геотермальних газів в елементарну сірку, яку можна використовувати як добавку до ґрунту або добрив. В останні десятиліття було розроблено багато процесів для видалення  $\text{H}_2\text{S}$ . Вибір підходящого методу зменшення потребує, серед іншого, аналізу кількох змінних, таких як склад геотермальної рідини, ефективність процесу, економічна ефективність та конструкція геотермальної електростанції. Бінарний та спалахо-двійковий комбінований цикл взагалі не виділяють  $\text{H}_2\text{S}$ . З 1976 року викиди  $\text{H}_2\text{S}$  зменшились з 862 кг / год до 91 кг / год або менше, хоча виробництво електроенергії з геотермальної енергії в січні 2019 року зросло з 500 МВт до понад 14 ГВт[39].



Оскільки геотермальні установки не спалюють викопне паливо, виділення оксидів азоту знаходиться на дуже низькому рівні. Власне, в більшості випадків вони взагалі не виділяють оксидів азоту. Ці невеликі кількості NO<sub>x</sub> можуть бути результатом спалювання H<sub>2</sub>S із системи зниження H<sub>2</sub>S. Кількість NO<sub>x</sub>, що викидається в атмосферу від різних електростанцій, показано на рис.№. Геотермальні гази можуть містити аміак (NH<sub>3</sub>), ртуть (Hg) у невеликій кількостях, пари бору (B) та вуглеводні, такі як метан (CH<sub>4</sub>). Аміак викликає подразнення очей та дихальних шляхів у концентраціях від 5 до 32 проміле. Вдихання ртуті може спричинити неврологічні розлади. Бор подразнює шкіру та слизові оболонки і є фітотоксичним при відносно низьких концентраціях. Токсичність бору негативно позначається на метаболічній функції рослини. Відбувається зниження врожайності внаслідок відмирання тканин рослини, активної площі листя та зменшення активності фотосинтезу. Однак бор виділяється в дуже низьких кількостях, і тому не представляє небезпеки для здоров'я людини[40]. У геотермальних парових системах бор присутній як високорозчинна борна кислота. У поєднанні з аміачним бором утворюються відкладення білої кристалічної солі на поверхнях обладнання, що завдає впливу геотермальної рідини. Через високу розчинність майже весь бор, що надходить у геотермальну установку, розчиняється в конденсаті пари і виходить з установки через градирню.



Рисунок 3.10 - NO<sub>x</sub>, що викидається в атмосферу електростанцією

Викиди бору, як правило, не регулюються законодавством, тому сполуки бору можуть викидатися в занос градирні, оскільки вони не впливають на навколишнє середовище. Бінарні електростанції використовують низькокиплячу рідину, як правило, ізопентан, яка може витікати з рослини протягом певного періоду часу. Хоча геотермальні електростанції не виділяють  $\text{SO}_2$  безпосередньо в атмосферу, як тільки  $\text{H}_2\text{S}$  скидається у вигляді газу, він поширюється в атмосферу і, як правило, хімічно реагує на  $\text{SO}_2$  і сірчану кислоту. Отже, кожна емісія  $\text{SO}_2$ , пов'язана з геотермальною енергією, походить від емісії  $\text{H}_2\text{S}$ .

Як і інші електростанції, геотермальна електростанція займає певну територію суші. Це заняття може бути тимчасовим (під час будівництва, рекультивації) або постійним (під час роботи електростанції). Геотермальні електростанції зазвичай будуються на місці геотермальних полів, оскільки довгі трубопроводи дорогі, а перепад тиску та температури може бути значним. Визначена площа суші необхідна для скважин, будівель електростанцій, трубопроводів, градирень та електричного розподільчого щита. Загальна площа поверхні, яку охоплює будівництво електростанції, значно більша, ніж площа, необхідна для згаданих компонентів електростанції[43]. Наприклад, на полі Cerro Prieto (Мексика) площа поверхні, покритої колодязями (12 га), становить лише 2% від загальної площі поверхні (540 га), що покриває свердловини та електростанція (180 МВт). Земля між свердловинами та трубопроводами у багатьох випадках може продовжувати використовуватися для інших цілей, хоча в деяких місцях це недоцільно[42]. Величина поверхні, необхідна для геотермальної електростанції, варіюється залежно від властивостей геотермального джерела, типу застосовуваної схеми перетворення енергії, величини потужності, типу системи охолодження, розташування свердловин, трубопроводів, підстанції та допоміжну будівлю ( рис. 3.12).





Рисунок 3.11 - Необхідна територія для електростанцій різного типу

Оцінка середньої величини "руйнування землі" під час будівництва електростанції потужністю 50 МВт становить приблизно 0,85 км<sup>2</sup>. Це включає шість свердловинних майданчиків (з одинарними та багаторазовими свердловинами, наприклад, із застосуванням передової технології спрямованого або косоного буріння), приблизно 0,4 км дороги на свердловину та трубопроводу довжиною від 8 до 80 км (коридори близько 15 м, свердловин, щоб уникнути перешкод, як правило, становить від 200 м до 300 м) [41]. Однак електростанція потужністю 50 МВт може мати до 25 виробничих та 10 реінжекційних свердловин. Станції бінарного типу - це набагато менші рстанції, які зазвичай становлять від 0,5 МВт до 10 МВт. Крім того, використання геотермальних ресурсів не вимагає транспортування палива на великі відстані трубопровідним, залізничним, шосейним або океанським танкерами.

### Висновки до розділу 3

Геотермальні електростанції екологічно чисті, оскільки використовують відновлювану енергію, яка, на відміну від енергії вітру та сонця, доступна цілодобово. Геотермальна електростанція має дуже низький рівень викидів, особливо у порівнянні зі звичайними електростанціями, що використовують викопне паливо. Геотермальні бінарні електростанції, які нещодавно найчастіше будують, мають мінімальний викид частинок і майже

нульовий викид парникових газів. Якщо проаналізувати викиди життєвого циклу, можна зробити висновок, що геотермальні електростанції бінарного типу виробляють енергію з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Не тільки викиди мінімальні, але й незначний слід на суші та використання прісної води. Геотермальні рослини займають дуже мало суші порівняно з іншими джерелами енергії, особливо порівняно з іншими відновлюваними джерелами енергії. Хоча в даний час використовується лише частка свого потенціалу, завдяки раніше поясненим геотермальна енергія може суттєво брати участь у задоволенні енергетичних потреб 21 століття.

Період повернення капіталу для геотермальної електростанції був розрахований як 15 років.

Вартість виробництва електроенергії для геотермальної електростанції становить 17 центів за кожен кВт-год.

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

Основною ідеєю стартап-проекту є установка бінарних теплових насосів з функцією очистки повітря для використання в побутових цілях та в промисловості. У подальшому зупинимося на обґрунтуванні наступних етапів реалізації стартап-проекту:

- актуальності та новизни інноваційної ідеї;
- аналізу конкурентного середовища;
- ресурсного забезпечення проекту;
- фінансового забезпечення реалізації проекту;
- інвестиційного етапу реалізації проекту;
- маркетингового етапу реалізації проекту.

### 4.1 Обґрунтування актуальності та новизна інноваційної ідеї стартап-проекту

Актуальність та новизна інноваційної ідеї стартап-проекту полягає у впровадженні бінарних теплових насосів, які можуть слугувати як для обігріву приміщення так і для конденсації, а також для очищення повітря в приміщенні. Багатофункціональність продукту є запитом населення та підприємців, що займаються харчовою або сільськогосподарською промисловістю. В табл. 4.1 охарактеризовано основні переваги пропонованого виробу та вигоди від їх використання споживачами[45].

Таблиця 4.1 – Актуальність та новизна ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Переваги та вигоди споживача
Установка теплових насосів, які за допомогою теплообміну з верхнім шаром землі, може забезпечувати обігрів або конденсацію приміщень.	Насос для обігріву та конденсації жилого приміщення	Багатофункціональність виробу, можливість зменшити викиди в навколишнє середовище, зменшення комунальних платежів
	Насос для промислового застосування	Можливість використання для обігріву теплиць, побудови сушок для зерна та ін., енергетична незалежність, відсутність викидів, не змінює іонізацію повітря.

## 4.2 Аналіз конкурентного середовища

У результаті аналізу конкурентного середовища виявлено, що на ринку наявні конкуренти, що надають схожий товар, найвідоміші з них «Heat-Haus», «Alterair», «Termos UA» тощо. Крім того, встановлено, що систему теплового насоса можемо характеризувати наступними техніко-економічними показниками: потужністю котла та його ефективністю, багатофункціональністю та гарантійним терміном використання.

У табл. 4.2 визначено коло конкурентів, що вже існують на ринку та окреслено техніко-економічні переваги пропонованої ідеї.

Таблиця 4.2 – Переваги ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Стартап проект	«Heat-Haus»	«Alterair»
1	2	3	4	5
1	Тип та екологічна установки	Бінарність системи дозволяє уникнути будь яких викидів від використання геотермальної енергії	Установка, умовно екологічно прийнятна	Установка, умовно екологічно прийнятна

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5
2	Додаткова функція в вигляді очищення повітря та його зволоження	Так	НІ, дана функція відсутня	НІ, дана функція відсутня
3	Гарантійний строк служби	15 років	10 років	12 років

У табл. 4.3 узагальнено результати SWOT-аналізу потенційних загроз та можливостей реалізації стартап-проекту.

Таблиця 4.3 – Матриця SWOT-аналізу

<b>Сильні сторони</b>	<b>Слабкі сторони</b>
1. Відповідність продукту міжнародним та державним стандартам типу ДСТУ Б В 2.5-44; 2. Вирішення проблеми енергетичної залежності; 3. Можливість смарт управління; 4. Багатофункціональність системи.	1. Відносна дороговизна в порівнянні з іншими системами опалення; 2. Відсутність патенту на виріб; 3. Відсутність власних виробничих потужностей, створення яких потребує капіталовкладення; 4. Залежність від компанії постачальників комплектуючих.
<b>Можливості</b>	<b>Загрози</b>
1. Вихід на міжнародний ринок; 2. Доступність інвестицій та кредитів; 3. Можливість адаптації фізико-механічних властивостей для використання в будь яких сферах життя та бізнесу.	1. Негативні зміни з боку національного законодавства; 2. Мала обізнаність населення; 3. Зменшення ціни на комунальні послуги для населення та бізнесу;

### 4.3 Ключові види діяльності та ключові партнери

У табл. 4.4 надано короткий опис видів діяльності та заходів, направлених на реалізацію завдань проекту, а в табл. 4.6 визначено ключових партнерів як постачальників необхідних матеріальних, капітальних, трудових, енергетичних ресурсів тощо.

Таблиця 4.4 – Ключові види діяльності

Назва діяльності	Опис діяльності	Результат діяльності
Закупівля обладнання	Придбання гідравлічного буру WPK-10, що використовується для буріння сверловин.	Наявність готового до роботи обладнання у місці виробництва дощечок
Закупівля комплектуючих	Налагодження зв'язків з дистриб'юторами теплових насосів, труб та ін.	Наявність готових до обробки та використання предметів праці
Виробництво додатку для смарт управління	Програмування готового продукту для управління тепловою системою за допомогою смартфона на операційних системах IOS та Android, за допомогою залучення фрілансерів	Створення додатку, готового до використання
Збут готових систем	Операції з моменту замовлення до моменту установки та обслуговування.	Конвертація товару в фінансові активи
Управління виробництвом	Оплата праці персоналу, моніторинг діяльності цеху, контроль відповідності діяльності чинному законодавству тощо	Безперебійна ефективна діяльність цеху, налагодженість всіх процесів від виробництва до реалізації товару

Таблиця 4.5 – Ключові партнери

Інформація	Партнер 1	Партнер 2	Партнер 3
Назва організації-партнера	ДП «Вайллант Група Україна»	ТОВ «ГІДРОМАРКЕТ»	РА «Грейп Україна»
Місце розташування	01015 м. Київ, вул. Лаврська 16	м.Вишневе, вул.Черновола 2А	м. Київ, вул. Верхній Вал, 2А
Юридичний статус	Юридична особа	Юридична особа	Юридична особа
Офіційна адреса	01015 м. Київ, вул. Лаврська 16	м.Вишневе, вул.Черновола 2А	м. Київ, вул. Верхній Вал, 2А
Контактна особа	Ігнатенко Олександр Вікторович	Меньшов Ігор Ігорович	Сокур Ксенія Анатоліївна
Телефон	+38044-339-98-40	+380969345539	+380443838433
Адреса електронної пошти	<a href="mailto:admin@vaillant.ua">admin@vaillant.ua</a>	<a href="mailto:igormenshoff@gmail.com">igormenshoff@gmail.com</a>	<a href="mailto:nb@grape.ua">nb@grape.ua</a>
Роль та залученість до підготовки цього проекту	Ключова	Постачання та послуги з обслуговування/ремонту виробничого обладнання	Надання рекламних послуг
Завдання, які покладаються на організацію партнера в реалізації проекту	Постачання насосів, постачання комплектуючих до насосів, організація.	Постачання та налагодження гідравлічного буру WPK-10 та послуги з обслуговування/ремонту виробничого обладнання	Розробка та реалізація рекламної компанії для просування бренду

#### 4.4 Фінансове обґрунтування стартап-проекту

Обґрунтуємо необхідні витрати, формування на їх основі собівартості реалізації бізнес-ідеї стартап-проекту та формування її ціни. Витратне обґрунтування ціни передбачає обґрунтування собівартості виробництва товару. Собівартість узагальнює витрати підприємства на виробництво і реалізацію системи. Положення (Стандарт) бухгалтерського обліку – 16 «Витрати», найбільш узагальнений підхід до класифікації витрат, передбачає п'ять економічних елементів:

- прямі матеріальні затрати;
- прямі затрати на оплату праці;
- соціальні відрахування до Пенсійного фонду;
- амортизація основних фондів та нематеріальних активів для власного виробничого призначення;

- інші прямі витрати;
- загальні витрати.

Означені витрати узагальнено в табл.4.6

Таблиця 4.6 – Прямі матеріальні витрати

№ п/п	Назва ресурсу	Одиниця вимір.	Ціна	Кількість ресурсу	Потреба на місяць	Потреба на рік
1	Тепловий насос Vaillant	грн./од	124 540	24	249 080	2 988 960
2	Труби для свердловин	грн./м	470,3	480	18 812	225 744
3	Електросхеми для забезпечення смарт доступу	грн./од	512,6	24	510,05	12 302,4
4	Комунальні послуги	грн./м <sup>2</sup>	57,69	50	2 884,5	34 614,0
Всього:					271 801,7	3 261 620,4

Даний крок роботи проводить аналіз структури персоналу підприємства, розмежування працівників, оплата праці яких формується на основі посадових окладів та працівників, оплата праці яких – відрядна з урахуванням розряду працівника.

Для адміністративно-технічного персоналу погодинно-преміальна оплата праці обчислюється за формулою:

$$ЗП_{\text{погод-прем}} = TC + t + П = 50 \times 176 + 10\% = 9680, 0 \text{ грн},$$

де  $TC$  – тарифна ставка оплати праці, грн/год;

$t$  – кількість відпрацьованих працівником годин, год;

$П$  – преміальні виплати за якісну напружену працю, грн.

Для виробничого персоналу відрядно-прогресивна система оплати праці обчислюється за формулою:

$$\begin{aligned} ЗП_{\text{підряд}}^{\text{прогр}} &= P_{\text{баз}} \times Q_{\text{баз}} + (Q_{\text{факт}} - 1.1Q_{\text{баз}}) \times P_{\text{відв}} = \\ &= 2,5 \times 2112 + (2500 - 1,1 \times 2112) \times 3 = 6560, 4 \text{ грн}, \end{aligned}$$



де  $P_{баз}$  – базова розцінка за виготовлення одиниці продукції, грн/од;

$P_{підв}$  – підвищена розцінка за виготовлення понаднормової кількості продукції, грн/од;

$Q_{баз}$  – планований (базовий) випуск продукції, од/міс.;

$Q_{факт}$  – фактичний випуск продукції, од/міс.;

$I, I$  – коефіцієнт підвищеної розцінки при перевиконанні норми не менш, аніж на 10%.

Дані структури персоналу та фонду оплати праці узагальнюємо в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Структура персоналу та фонд оплати праці

№ п/п	Посада	Форма оплати	Кількість працівників	Заробітна плата (грн.)		
				за місяць	за квартал	за рік
Адміністративно-технічний персонал						
1	Майстер інженер	Погодинно-преміальна	1	9 680,0	29 040,0	116 160,0
Всього				9 680,0	29 040,0	116 160,0
Соціальні відрахування до Пенсійного фонду (22 %)				2 129,6	6 388,8	25 555,2
Фонд оплати праці				11 809,6	35 428,8	141 715,2
Виробничий персонал						
2	Оператор гідравлічного буру	Відрядно-прогресивна	1	6 540,4	19 621,2	78 484,8
Всього				6 540,4	19 621,2	78 484,8
Соціальні відрахування до Пенсійного фонду (22 %)				1 443,29	4 329,86	17 319,45
Фонд оплати праці				7 973,69	23 951,06	95 804,25

Згідно з П(С)БО 7 «Основні засоби» до основних фондів підприємства відносимо будівлю (офіс; склад) та обладнання (гідравлічний бур WPK-10).

Для розрахунку амортизації об'єктів основних засобів обрано прямолінійний метод, що передбачає рівномірний розподіл амортизаційних відрахувань протягом корисного терміну експлуатації об'єкта основних засобів до досягнення ним ліквідаційної вартості[45].

Узагальнимо вартість основних фондів та амортизаційних відрахувань у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Обґрунтування вартості амортизаційних відрахувань основних фондів підприємства на 2020 р.

Назва об'єкта основних фондів	Кількість, шт.	Вартість на початок року, грн	Річна норма амортизації, %	Амортизаційні відрахування в поточному році, грн				
				I квартал	II квартал	III квартал	IV квартал	За рік
Будівля (склад)	1	500 000	4	20 000	20 000	20 000	20 000	80 000
Гідравлічний бур WKP-10	1	202 633	4	8 105,32	8 105,32	8 105,32	8 105,32	32 421,28
Всього	2	702 633	4	28 105,3	28 105,3	28 105,3	28 105,3	28 105,3

До інших прямих витрат належать витрати на дослідження та розробку, послуги сторонніх організацій, комунальні послуги, втрати від браку з технологічних причин тощо. Узагальнимо інші прямі витрати в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Обґрунтування прямих інших витрат

Види послуг	Джерело даних	Вартість послуг, грн	
		На місяць	На рік
Охорона приміщення	Угода	7 000	84 000
Інтернет-реклама	Google Ads	6 000	72 000
Комунальні послуги	Угода	2 884,5	34 614
Транспортні витрати	Розрахунок	6 753,84	81 046,08
Всього:		22 638,34	271 660,08

Узагальнимо загальновиробничі витрати в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Загальновиробничі витрати

Види послуг	Джерело даних	Вартість послуг, грн	
		На місяць	На рік
Ремонт виробничого обладнання	Угода	4 200	50 400
Всього:		4 200	50 400

До умовно-змінних витрат відносимо витрати на виробництво тришарової екологічно прийнятної плити. Величина їх змінюється залежно від зміни обсягу

випуску продукції. Умовно-змінні витрати підприємства узагальнено в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Умовно-змінні витрати підприємства

Статті витрат	Джерела даних	Витрати, грн			
		На 1 од.	На місяць	На квартал	На рік
Прямі матеріальні витрати	Табл. 4.7	135 900,85	271 801,7	815 405,1	3 261 620,4
ФОП виробничого персоналу	Табл. 4.8	5 904,8	11 809,6	35 428,8	141 715,2
Транспортні витрати	Табл. 4.10	3 376,92	6 753,84	20 261,52	81 046,08
Ремонт виробничого обладнання	Табл. 4.11	2 100	4 200	12 600	50 400
Всього:		146 682,57	293 365,1	880 095,42	3520381,68

До умовно-постійних виробничих витрат відносять витрати на обслуговування і управління виробництва, які залишаються незмінними або майже незмінними при зміні обсягів діяльності. До них відносять: амортизаційні відрахування, фонд оплати праці адміністративно-технічного персоналу з нарахуваннями, орендну плату підприємства, комунальний податок, збір за забруднення навколишнього природного середовища тощо[46]. Розрахунок умовно- постійних витрат підприємства приведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Умовно-постійні витрати підприємства

Статті витрат	Джерела даних	Витрати, грн			
		На 1 од.	На місяць	На квартал	На рік
ФОП адміністративно-технічного персоналу	Табл. 4.8	3 986,85	7 973,69	23 921,07	95 684,28
Амортизаційні відрахування	Табл. 4.9	4 684,2	9 368,4	28 105,3	112 421,2
Охорона	Табл. 4.10	3 500	7 000	21 000	84 000
Реклама	Табл. 4.10	3 000	6 000	18 000	72 000
Комунальні послуги	Табл. 4.10	1 442,25	2 884,5	8 653,5	34 614
Всього:		16 613,3	33 226,6	99 679,8	398 719,2

Умовно-постійні витрати є накладними, тобто розподіляються між усіма видами продукції підприємства, якщо такі підприємство випускає.

Дані розрахунку накладних витрат записуємо у табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – Розрахунок накладних витрат підприємства

Показники	Джерела даних	На одиницю	На місяць	На квартал	На рік
Умовно-постійні витрати, грн	Табл. 4.13	16 613,3	33 226,6	99 679,8	398 719,2
Частка випуску продукції у загальному обсягу виробництва, %	Офіційна веб сторінка ПрАТ «Київський КПК»	<1	<1	<1	<1
Накладні витрати, грн		166,1	332,2	996,7	3987,2

Собівартість інноваційної ідеї складається з умовно-змінних та умовно-постійних (накладних) витрат. Розрахунок собівартості узагальнимо в табл.4.14.

Таблиця 4.14 – Обґрунтування собівартості товару

Статті витрат	Джерела даних	Витрати, грн			
		На 1 од.	На місяць	На квартал	На рік
Умовно-змінні витрати	Табл. 4.13	16 613,3	33 226,6	99 679,8	398 719,2
Умовно-постійні (накладні) витрати	Табл. 4.14	146 682,57	293 365,1	880 095,42	3520381,68
Собівартість	Сума рядків	163 295,9	328 591,7	979 775,22	3 919 100,8

#### 4.5 Обґрунтування рівня рентабельності інноваційної ідеї

Дані обґрунтування необхідного рівня прибутку інноваційної ідеї, для якої розраховується ціна узагальнюємо в табл. 4.16. При цьому, враховано наступний розподіл прибутку підприємства за фондами:

- фонд розвитку виробництва – 50%;
- фонд соціального розвитку – 25%;
- преміальний фонд – 10%;
- дивіденди засновникам – 15%.

Таблиця 4.15 – Обґрунтування рівня рентабельності товару

Статті витрат	Джерело даних	Од. вимір.	Значення показників
1. Собівартість одиниці продукції	Табл. 4.14	грн.	163 295,9
1.1. Обсяг виробництва в рік	Прогноз	грн.	3 919 100,8
2. Необхідний прибуток	пп.2,1+2,2+2,3+2,4+2,5+ 2,6+2,7	грн.	1 434 390,9
2.1. Кредитні засоби	Кредитна угода	грн.	0
2.2. Засоби фонду розвитку виробництва	Колективна угода	грн.	717 195,5
2.3. Засоби фонду соціального розвитку	Колективна угода	грн.	358 597,7
2.4. Засоби преміального фонду	Колективна угода	грн.	143 439,1
2.5. Грошові виплати власникам підприємства	Колективна угода	грн.	215 158,6
2.6. Фінансовий резерв	$(2.1+2.2+2.3+2.4+2.5)*0.05/0.95$	грн.	75 494,3
2.7. Податок на прибуток	$(2.1+2.2+2.3+2.4+2.5)*0.18$	грн.	258 190,4
3. Необхідний рівень рентабельності продукції	п.2 / п.1.1*100%	%	<b>36,6</b>

#### 4.6 Цільові групи потенційних споживачів

В обґрунтуванні потенційних споживачів доцільно виявити цільові групи, яким буде пропонуватися багатофункціональна дощечка, а також визначити відповідну стратегію охоплення ринку. В табл. 4.16 представлено цільові групи потенційних споживачів[46].

Таблиця 4.16 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п / п	Опис цільової групи потенційних клієнтів	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Люди які живуть в приватних домах	Високий	Низька	Просто
2	Малоквартирні будівлі	Середній	Низька	Просто
3	Харчова промисловість	Високий	Низька	Просто

Відповідно до табл. 4.16 в якості стратегії охоплення ринку обрано стратегію масового маркетингу, тобто пропонується стандартизована програма впровадження виробу для всіх суб'єктів ринку.

#### 4.7 Оцінка ефективності впровадження стартап-проекту

Оцінку ефективності впровадження стартап-проекту проведемо завдяки розрахунку чистої приведеної вартості (NPV), співвідношення кредиту до вартості проекту та його цінності; простого терміну окупності, коефіцієнту ефективності та чистої дисконтової вартості[46].

Таблиця 4.17 – Дані для розрахунку NPV стартап-проекту

Рік (період)	2020 (0)	2021(1)	2022 (2)	2023 (3)	2024 (4)
Виручка від реалізації, грн	0	1 434 390,9	1 434 390,9	1 434 390,9	1 434 390,9
Витрати, грн	3 919 100,8	127 988,4	127 988,4	127 988,4	127 988,4
Інвестиції, грн	4 000 000	0	0	0	0
Ставка дисконтування [51], %	17	17	17	17	17

Співвідношення кредиту (інвестицій) до вартості проекту Loan To Cost розрахуємо за формулою:

$$LTC = \frac{Loan\_amount}{Cost} = \frac{4000000}{3919100,8} = 1,020$$

де *Mortgage amount* – інвестиції, грн

*APV* – оціночна вартість майна, грн

Враховуючи обсяги інвестицій 4 000 000 грн та щорічний прибуток 726 280,6грн розраховано простий термін окупності:

$$T_{OK} = \frac{4000000}{726280,6} = 5,5$$

За наступною формулою розраховано коефіцієнт ефективності (питомий прибуток на одиницю капіталовкладень):

$$E = \frac{1}{T_{OK}} = 0,182$$

де  $T_{OK}$  – простий термін окупності.

#### Висновки до розділу 4

1. Аналіз ринку підтверджує відсутність абсолютних аналогів бінарних систем геотермальних теплових насосів з очищенням повітря.
2. Враховуючи наявний попит та динаміку на ринку є можливість ринкової комерціалізації запропонованого стартап-проекту.
3. З огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження, стан конкуренції та конкурентоспроможність проекту вважаємо останній доцільним для подальшої імплементації.
4. У таблиці 4.18 підведено підсумки підготовки інноваційного стартапу та узагальнено основні техніко-економічні показники.

Таблиця 4.18 – Узагальнюючі техніко-економічні показники

Показники	Значення
Річний випуск продукції, од.	24
Капіталовкладення, грн.	4 000 000
Собівартість одиниці товару, грн/од.	163 295,9
Ціна продукту, грн/од.	222 082,42
Прибуток, грн/міс	117 573,05
Рентабельність, %	36,6
Коефіцієнт економічної ефективності	0,182
Період повернення капіталовкладень, років	5,5

## ВИСНОВКИ

1. Визначено необхідні умови для видобування геотермальної енергії, доведено необхідність впровадження геотермальних електростанцій та теплових насосів в енергетичний сектор.
2. Обґрунтовано доцільність проведення дослідження можливості застосування геотермальної енергії для зменшення навантаження на екосистему.
3. Визначено основні параметрами, що визначають роботу геотермальної енергетики, а саме геотермальної електростанції, та доведено оптимальність застосування геотермальних електростанцій.
4. У програмному комплексі ASPENplus проведено розрахунок показників роботи бінарної геотермальної електростанції з урахуванням багатьох характеристик.
5. Визначено основні показники продуктивності електростанції у відношенні від температури, вхідної та вихідної потужності, глибини шахти та ін.
6. Проведено моделювання впровадження бінарної геотермальної станції з урахуванням відстані між свердловинами, глибиною свердловини, температурою РР та застосуванням ОРЦ.
7. Розроблений стартап-проект реалізації технології на вітчизняному ринку прогнозує отримання разового прибутку у розмірі близько 1.2 млн. грн протягом 1 року від дати отримання сертифікату відповідності.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Stober, I., & Bucher, K. (2016). *Geothermal Energy From Theoretical Models to Exploration and Development*. Berlin: Springer Berlin.
2. Геотермальна енергетика // Словник-довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. — Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. — С. 48.
3. В. І. Саранчук, М. О. Ільяшов, В. В. Ошовський, В. С. Білецький. Хімія і фізика горючих копалин. — Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. — с. 600. ISBN 978-966-317-024-4.
4. Kiruja, J. (2011). *Direct Utilization of Geothermal Energy. Shot Course on Exploration for Geothermal Resources*. Nairobi: United Nations University.
5. Uihlein, A. JRC Geothermal Power Plant Dataset—Documentation, EUR 29446 EN; JRC Technical Report; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2018.
6. Di Pippo, R. (Ed.) *Geothermal Power Generation*; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2016; ISBN 9780081003442.
7. Anderson, A.; Rezaie, B. Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future. *Appl. Energy* 2019, 248, 18–34. [CrossRef]
8. Bertani, R. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics* 2016, 60, 31–43. [CrossRef]
9. Lund, J.W.; Boyd, T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics* 2016, 60, 66–93. [CrossRef]
10. Trumphy, E.; Bertani, R.; Manzella, A.; Sander, M. The web-oriented framework of the world geothermal production database: A business intelligence platform for wide data distribution and analysis. *Renew. Energy* 2015, 74, 379–389. [CrossRef]
11. Barbier, E. Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2002, 6, 3–65. [CrossRef]
12. Lu, S.M. A global review of enhanced geothermal system (EGS). *Renew.*

Sustain. Energy Rev. 2018,81, 2902–2921. [CrossRef]

13. Laboratory, I.N. The Future of Geothermal Energy The Future of Geothermal Energy; Massachusetts Institute of Technology All: Idaho Falls, ID, USA, 2006; ISBN 0615134386.

14. Shortall, R.; Davidsdottir, B.; Axelsson, G. A sustainability assessment framework for geothermal energy projects: Development in Iceland, New Zealand and Kenya. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 50, 372–407. [CrossRef]

15. Ciriaco, A.E.; Zarrouq, S.J.; Sakeri, G. Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 119, 109515. [CrossRef]

16. Sanner, B. Summary of EGC 2019 country update reports on geothermal energy in europe. In *Proceedings of the European Geothermal Congress 2019, the Hague, the Netherlands, 11–14 June 2019*; p. 18.

17. Baldacci, A.; Mannari, M.; Sansone, F. Greening of geothermal power: An innovative technology for abatement of hydrogen sulphide and mercury emission. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24–29 April 2005*.

18. Manzella, A.; Bonciani, R.; Allansdottir, A.; Botteghi, S.; Donato, A.; Giamberini, S.; Lenzi, A.; Paci, M.; Pellizzone, A.; Scrocca, D. Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics* 2018, 72, 232–248. [CrossRef]

19. Gestore Servizi Energetici Rapporto Statistico 2017; Gestore Servizi Energetici: Rome, Italy, 2018.

20. International Energy Agency. *World Energy Outlook*; International Energy Agency: Paris, France, 2018.

21. Shortall, R.; Uihlein, A. *Geothermal Energy Technology Development Report 2018*, EUR 29917 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019.

22. Shortall, R.; Uihlein, A.; Carrara, S. *Geothermal Energy Technology Market Report 2018*, EUR 29933 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019.

23. International Organization for Standardization. ISO 14040:2006—Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework; ISO: Geneva, Switzerland, 2006.
24. International Organization for Standardization. For ISO 14044:2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines; ISO: Geneva, Switzerland, 2006.
25. Lund H. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy* 2007;32:912–9.
26. Delgado-Torres AM, Garc'ia-Rodr'iguez L. Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC). *Energy Conversion and Management* 2010;51:2846–56.
27. Taljan G, Verbić G, Pantoš M, Sakulin M, Fickert L. Optimal sizing of biomass-fired organic Rankine cycle CHP system with heat storage. *Renewable Energy* 2012;41:29–38.
28. Yamamoto T, Furuhashi T, Arai N, Mori K. Design and testing of the organic Rankine cycle. *Energy* 2001;26:239–51.
29. Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy* 2010;35:112–21.
30. Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, Fischer J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy* 2007;32:1210–21.
31. Li J, Pei G, Li Y, Wang D, Ji J. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures. *Energy* 2012;38:85–95.
32. Roya J, Mishra M, Misra A. Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic rankine cycle. *Energy* 2010;35:5049–62.
33. Sun J, Li W. Operation optimization of an organic Rankine cycle (ORC) heat recovery power plant. *Applied Thermal Engineering* 2011;31:2032–41.
34. Hettiarachchia HM, Golubovica M, Woreka WM, Ikegamib Y. Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy* 2007;32:1698–706.
35. Petryashkevych, M. I., and Lozyniak, P. Y. 1998. “Naftogazonosnist

Zakarpatskogo prohynu ya napryamky poshukovo-rozviduvalnykh robit u svitli suchasnoi informatsii. Geologo-geofizychni doslidzhennia naftogazonosnykh nadr Ukrainy.” Zbirnyk naukovykh prats UkrDGRI 1: 100-10.

36. Radko, Y. N. 1975. Pidzemni vody Zakarpatskogo vnutrishniogo progynu. Kyiv: Naukova dumka. (in Ukrainian)

37. Rudenko, F. A. 1971. “Hidrogeologia SSSR: Ukrainskaya SSR.” UkrNIGRI, t. V.

38. Zapinska-Silwa, A., et al. 2012. Possibilities of Geothermal Energy Utilisation in Ukraine’s Transcarpathia. Krakow: AGH.

39. Zharnikov, A. 2002. Vyvchennia rezhymu pidzemnykh vod, kontrol’ za stanom pidzemnykh vod terytoriyi Zakarpatskoyi oblasti. (in Ukrainian)

40. Fomina, O. 2005. Alternativa iz glubiny neдр. Zhurnal TEK, No. 12. (in Russian)

41. Gordienko, I., Gordienko, V., and Zavgorodnyaya, O. 2005. “Geothermal Resources of Ukraine.” In Proceedings of World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey.

42. World Data Center for Geoinformatics and Sustainable Development. 2008. “Thermal Current of Ukraine.” Accessed February 18, 2019. <http://wdc.org.ua/en/node/147>.

43. Ivanyuta, M. M. ed. 1998. Atlas of Oil and Gas Fields of Ukraine: In 6 Volumes. Lviv: Tsentr Evropy.

44. Про збір та облік єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування : Закон України від 08.07.2010 р. № 2464-VI. Дата оновлення: 09.08.2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2464-17> (дата звернення: 03.12.2019).

45. Податковий кодекс України : Закон України від 02.12.2010 р. № 2755-VI. *Голос України*. 2010. 04 груд. (№ 229-230). С. 17-83.

46. Шевчук Н.А., Зайченко С.В., Кривда О.В. Впровадження та реалізація стартап проекту геомехатронного комплексу. *Сучасні проблеми економіки і підприємництва*. 2018. №21. С. 94-101.