МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Моделювання теплових процесів у ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів»

Виконав: студент 2 курсу магістратури,
групи НФ-63
Дар'я ТОПОНЕН
Спеціальність:
«Прикладна фізика енергетичних систем»
Керівник: доцент, Денис ПРОТЕКТОР

Рецензент:

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
підпис
"____"_____2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Топонен Дар'ї Олександрівни
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Моделювання теплових процесів у ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів»

керівник роботи Протектор Денис Олегович, доцент.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "21" вересня 2023 року № 4201-5/2491

2. Строк подання студентом роботи: 07 грудня 2023 року

3. Перелік питань, які потрібно розробити

1. Провести аналітичний огляд літератури, присвяченій геотермальним тепловим насосам;
2. Ознайомитись з існуючими методами та підходами до розв'язання задач теплопровідності;
3. Провести аналіз програмного забезпечення для моделювання теплових процесів;

4. Спираючись на проведений аналіз обрати програмне забезпечення для моделювання теплових процесів;
5. Провести моделювання теплових процесів в ґрунті, які виникають при використанні геотермальних теплових насосів різних видів в різні пори року;

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1.	Вибір теми
2.	Затвердження теми на кафедрі
3.	Робота над літературою та іншими джерелами
4.	Написання вступу до роботи та першого розділу
5.	Написання другого розділу
6.	Написання третього розділу
7.	Завершення написання кваліфікаційної роботи (висновки та література)
8.	Подача науковому керівнику
9.	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10.	Попередній захист
11.	Захист

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ Дар’я ТОПОНЕН

підпис

Керівник роботи _____ Денис ПРОТЕКТОР

підпис

Перелік скорочень та абревіатур

ГТН – геотермальний тепловий насос

ТН-тепловий насос

СОР- коефіцієнт продуктивності система теплового насосу

ККД – коефіцієнт корисної дії

РЕФЕРАТ

Топонен Дар’я Олександрівна «Моделювання теплових процесів у ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів». Кваліфікаційна робота магістра з прикладна фізика енергетичних систем.- Х.: Харківській національний університет імені В. Н. Каразіна, 2023.

Кваліфікаційна робота представлена на 45 сторінках; складається з вступу, 3 розділів та висновків; містить 25 рисунка, список використаної літератури з 29 найменувань.

Метою даної роботи є моделювання теплових процесів , що протікають в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів різних типів, за допомогою програмного забезпечення для моделювання фізичних процесів.

Об’єктом дослідження є теплові процеси, які протікають в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів.

Предмет дослідження – моделювання теплових процесів в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше було проведено моделювання теплових процесів, що протікають в ґрунті під час використання геотермальних теплових насосів «ґрунт-вода» з різними схемами укладання ґрунтового колектору.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГЕОТЕРМАЛЬНИЙ ТЕПЛОВИЙ НАСОС, ҐРУНТ, ТЕПЛОВИЙ НАСОС, ДОВЖИНА ТРУБКИ, ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, ЩІЛЬНІСТЬ, ТЕПЛОВИЙ НАСОС NIBE F1145 З ТЕПЛОВОЮ ПОТУЖНІСТЮ КОМПРЕСОРА (B0 / W35).

ABSTRACT

Toponen Daria "Modeling of thermal processes in the soil using geothermal heat pumps". Master's thesis in Applied Physics of Energy Systems - Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2023.

The qualification work is presented on 45 pages; consists of an introduction, 3 chapters and conclusions; contains 25 figures, a list of references of 29 titles.

The purpose of this work is to model the thermal processes occurring in the ground when using geothermal heat pumps of various types using software for modeling physical processes.

The object of study is the thermal processes occurring in the soil when using geothermal heat pumps.

The subject of the study is modeling of thermal processes in the soil when using geothermal heat pumps.

The scientific novelty is that for the first time the modeling of thermal processes occurring in the soil during the use of geothermal heat pumps "groundwater" with different schemes of laying the soil collector was carried out.

KEYWORDS: GEOTHERMAL HEAT PUMP, SOIL, HEAT PUMP, TUBE LENGTH, SPECIFIC HEAT CAPACITY, THERMAL CONDUCTIVITY, DENSITY, NIBE F1145 HEAT PUMP WITH COMPRESSOR HEAT OUTPUT (B0/W35).

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ДОМАШНЬОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ 10

1.1 Загальна інформація 10

1.2 Геотермальний тепловий насос 11

1.3 Принцип дії та складова геотермального теплового насосу 12

1.4 Переваги та недоліки геотермальних теплових насосів 15

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ 17

2.1 Постановка задачі теплопровідності 17

2.2 Аналітичні методи розв'язання задач теплопровідності 19

2.3 Числові методи розв'язання задач теплопровідності 20

2.4 Огляд програмного забезпечення для моделювання теплових процесів 25

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ҐРУНТІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ РІЗНИХ ТИПІВ 32

3.1 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу горизонтального типу (зима) 32

3.2 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу горизонтального типу (літо) 35

3.3 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу вертикального типу (зима) 37

3.4 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу вертикального типу (літо) 40

ВИСНОВОК 42

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 43

ВСТУП

Актуальність теми.

Дана робота присвячена моделюванню теплових процесів у ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів (ГТН), та дослідженню теплофізичних явищ, які в ньому відбуваються. Перевагою використання геотермальних теплових насосів є його ефективність. Тепловий насос є екологічно чистим та економічно вигідним, що дозволяє знизити витрати на опалення в довгостроковій перспективі.

Тепловий насос також можна встановити в будь-якому будинку, що робить його універсальним. Тепловий насос можна застосовувати як для охолодження, так і для опалення будинка, що надає більшої гнучкості у використанні.

ГТН набирає все більше свою популярність в Україні, вони є актуальним і ефективним рішенням у сфері забезпечення теплопостачання та кондиціонування приміщень.

Ось декілька основних причин, через які придбання теплових насосів може бути актуальним:

1. Геотермальні системи , як правило, мають тривалий термін служби і низьку ймовірність виходу з ладу, що робить їх надійним рішенням для теплопостачання

2. На ефективність геотермальних теплових насосів не впливають коливання цін на паливо або електроенергію.

Оскільки геотермальні теплові насоси використовують теплову енергію землі, то актуальним є моделювання теплових процесів, які протікають в ґрунті при їх використанні. Перепади температурного поля ґрунту навколо геотермального колектору можуть впливати на ефективність роботи геотермального теплового насосу.

Таким чином існує ще багато причин актуальності встановлення ГТН, вони є підходящим та ефективним рішенням для забезпечення тепла та кондиціонування повітря.

Мета.

Метою даної роботи є моделювання теплових процесів , що протікають в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів різних типів, за допомогою програмного забезпечення для моделювання фізичних процесів. Для досягнення цієї мети необхідно розв’язати наступні завдання:

1. Провести аналітичний огляд літератури, присвяченій геотермальним тепловим насосам;
2. Ознайомитись з існуючими методами та підходами до розв’язання задач теплопровідності;
3. Провести аналіз програмного забезпечення для моделювання теплових процесів;
4. Спираючись на проведений аналіз обрати програмне забезпечення для моделювання теплових процесів;
5. Провести моделювання теплових процесів в ґрунті, які виникають при використанні геотермальних теплових насосів з різними схемами укладання ґрунтового колектору в різні пори року.

Об’єкт дослідження. Об’єктом дослідження є теплові процеси, які протікають в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів.

Предмет дослідження. Предмет дослідження – моделювання теплових процесів в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше було проведено моделювання теплових процесів, що протікають в ґрунті під час використання геотермальних теплових насосів «ґрунт-вода» з різними схемами укладання ґрунтового колектору.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ДОМАШНЬОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

1.1 Загальна інформація

Тепловий насос(ТН) – це пристрій, для передачі теплової енергії від джерела до споживача. Він є частиною системи опалення та охолодження будинку і встановлюється зовні будинку.

Тепловий насос можна порівняти з кондиціонером, має такі ж властивості як охолодити приміщення або забезпечити теплом. У різну пори року теплові насоси можуть працювати у різному напрямку, влітку – охолоджують приміщення, а взимку – нагрівають.

Найпоширеніша складова теплового насоса складається з випарника, компресора, конденсатора і теплового розширювального клапана. Холодоагент – це теплоносій, який циркулює всередині цих компонентів.

Більшість квартир, продовольчих складів і великих громадських будівель в розвинених країнах обладнані кондиціонерами та холодильним обладнанням. Принципова відмінність теплового насоса від холодильника полягає в тій ролі, яку він відіграє у споживача. Холодильники та повітряні кондиціонери призначені для охолодження, тоді як тепловий насос - для нагрівання і охолодження. Принцип роботи теплового насосу витікає з роботи Карно. [1]

Опалення будівель за допомогою геотермальних теплових насосів також поширене. Геотермальний тепловий насос схожий за роботою до звичайного кондиціонера, але має набагато більше переваг. На відміну від кондиціонерів, геотермальний тепловий насос пристосований для роботи за будь-яких погодних умов і при температурі нижче нуля.

Середній термін придатності теплового насоса становить 25 років. Для довгої і надійної роботи ТН необхідно забезпечити стабільну роботу напруги. Установка теплового насоса-це важкий і відповідальний процес, від якого залежить подальша робота та термін придатності насоса.

1.2 Геотермальний тепловий насос

Геотермальний (ґрунтовий) тепловий насос (ГТН) – це пристрій, який застосовує ґрунтову енергіє, як спосіб опалення або охолодження будинку. В геотермальних системах земля виконує роль радіатора влітку або взимку джерелом тепла.

Ґрунт -це один з надійніших видів джерел тепла. Він тримає стабільну температур продовж усього року накопичив собі сонячну енергію, це дозволяє насосу отримувати з землі потрібну кількість тепла, яка необхідна для покриття опалювальної потужності.

Одним з найефективніших є геотермальне опалення, через те що насоси мають високий рівень ККД, який не залежить від навколишніх природних явищ або пори року. Ефективність вироблення електроенергії на 1 кВт становить 3,5-5 кВт теплової енергії.



Рис.1.1 Геотермальний тепловий насос

1.3 Принцип дії та складова геотермального теплового насосу

Як джерело енергії для геотермального теплового насосу використовують ґрунт або підземні води. За весь рік температура навколишнього середовища змінюється у сьому світі. Але не зважаючи на кліматичні зміни та пору року температура під землею залишається стабільною у весь період року.

Важко уявити собі більш економічно вигідну установку, ніж геотермальний тепловий насос, оскільки на опалення не витрачаються кошти, так як тепло видобувається безпосередньо з землі.

Від розміру будинку та потужності теплового насосу буде залежать розмір контуру, який буде розташований неподалік з будинком. Через теплообмінник пропускають розсіл (суміш антифризу з водою), який забирає тепло і віддає тепловому насосу. Слідом тепло переходить в систему нагріву будинку. У різну пори року теплові насоси можуть працювати у різному напрямку, влітку – охолоджують приміщення, а взимку – нагрівають.

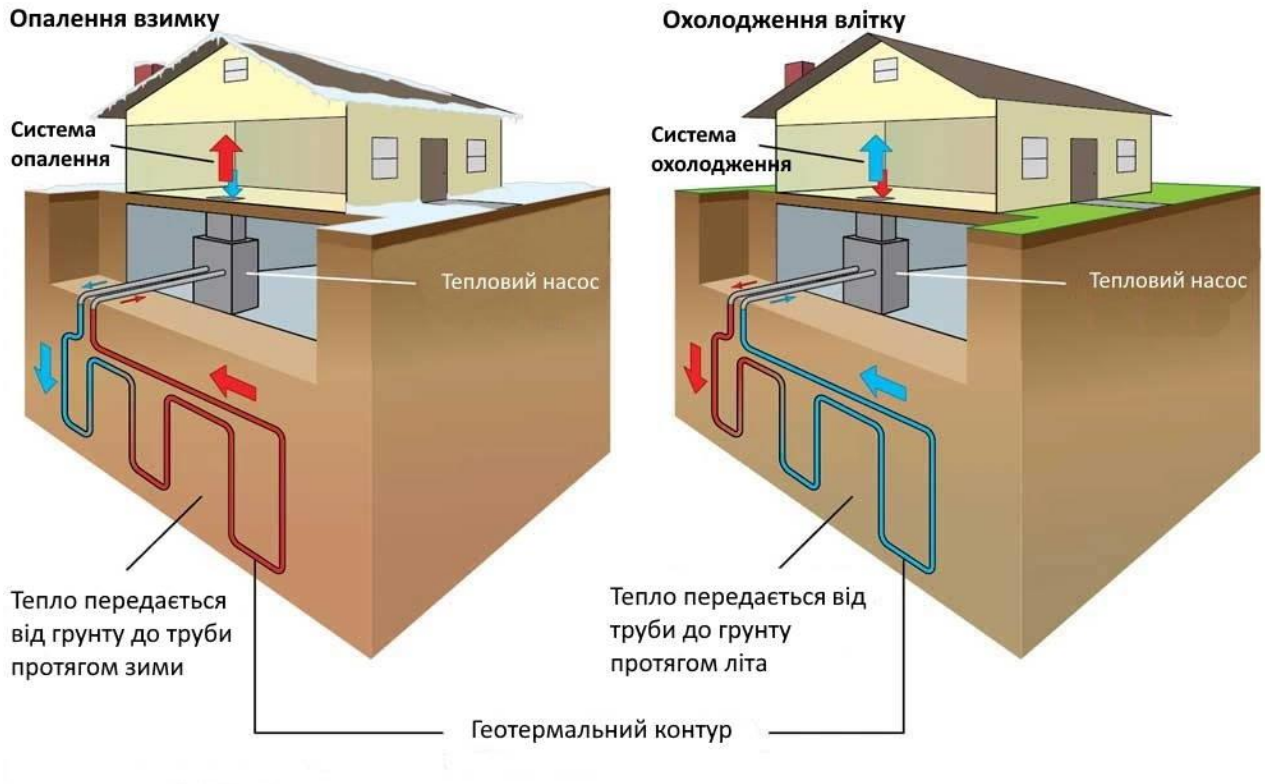


Рис.1.2 Робота геотермального теплового насосу

Робота геотермального теплового насосу полягає в тому, що насос отримує тепло з землі за допомогою замкнутого контуру спеціального пластикового трубопроводу. З тепловим насосом з’єднана труба в якої під тиском циркулює розсіл і утворює замкнутий контур.

ГТН відносяться до замкнутої класифікації і поділяються на горизонтальні та вертикальні типи.

а) ґрунтовий тепловий насос горизонтального типу

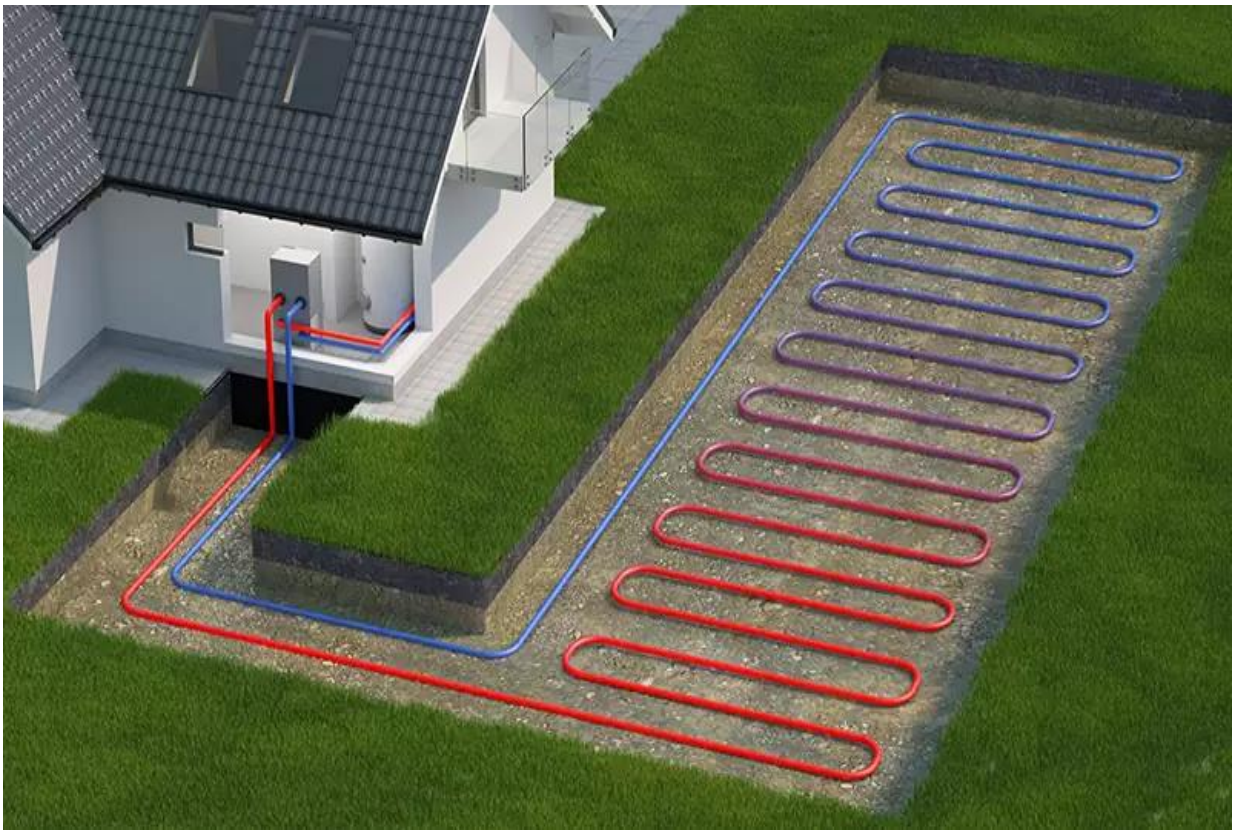


Рис.1.3 ґрунтовий тепловий насос горизонтального типу

Колектор горизонтального типу зазвичай розміщується у вигляді горизонтальних траншеях або кільцями на глибині від 1 і більше метрів (нижче глибини промерзання ґрунту). Такий тип використовують у сільській місцевості, де мається достатня кількість місця біля будинку. Зазвичай 40 - 60 метрів труби необхідно на 1 кВт потужності теплового. [2]

б) ґрунтовий тепловий насос вертикального типу

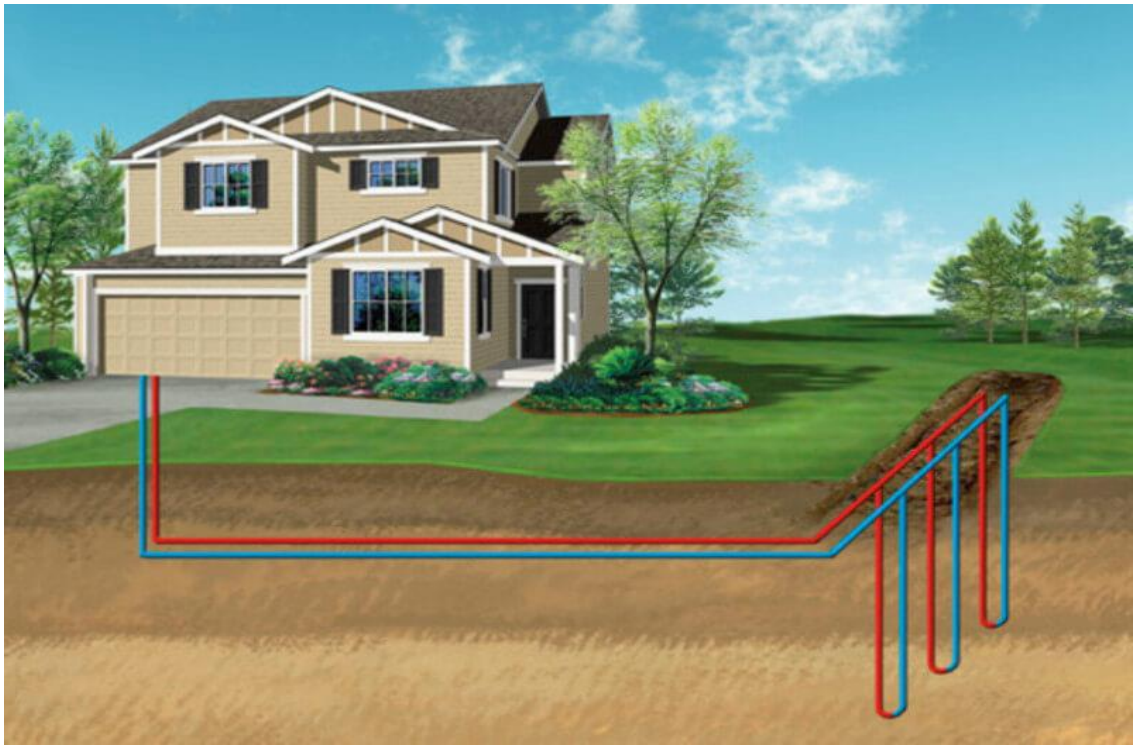


Рис.1.3 ґрунтовий тепловий насос вертикального типу

Колектор вертикального типу зазвичай розміщується у вигляді вертикальних траншей на глибині до 150 метрів з діаметром отвору 150 мм, залежно від розміру.

Такий тип використовують у заміських будинках, або де не мається достатньої кількість місця для розташування. Зазвичай 20 - 25 метрів труби розташовані U-подібною формою потрібні на 1кВт потужності [3].

Відстань для викладки двох або більше видів повинна бути не менше ніж 5-6 метрів один від одної.

в) ґрунтовий тепловий насос спірального типу

Колектор спірального типу є комбінацією між горизонтальним і вертикальним колектором. Через потребу виготовлення спіралей він виходить дорожчим за попередні варіанти. Розміщують зазвичай там, де геологічні буріння дороге.

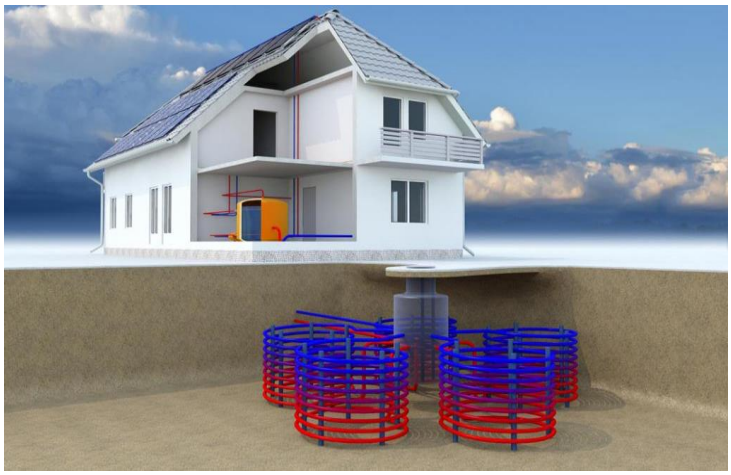


Рис.1.4 ґрунтовий тепловий насос спірального типу

1.4 Переваги та недоліки геотермальних теплових насосів

Геотермальні теплові установки мають великий попит серед різних регіонів України. Данні установки чудово обігрівають приміщення, площа якого понад 230 м^2.

Високий рівень ККД є однією з найважливіших причин для придбання даної установки. Насоси для ґрунтових вод популярні завдяки своїй високій ефективності та економічності, оскільки вони використовують ресурси, що самовідновлюються. Користувачеві не потрібно купувати дрова, будувати резервуари щоб зберігання палива.[4]

Установка не змінює своїх характеристик від погоди або атмосферних явищ. Також він не завдає шкоди навколишньому середовищу і практично не впливає на існуючий ландшафт. Для розміщення теплового насоса достатньо невеликого простору в паливному приміщенні. Геотермальний тепловий насос дуже простий у використанні і не має масивних зовнішніх блоків. Пристрій використовується для опалення та охолодження. Він може успішно служити довгі роки. Зручне управління, відсутність шуму, максимальний комфорт для промислових приміщень.[4]

Крім того, агрегати займають мало місця, таким чином звільняючи багато квадратних метрів для інших потреб і цілей, що є ще однією значною перевагою

при розміщенні. Компоненти теплового насоса не видно з вулиці. Вони дуже екологічні, і не викидають в повітря ніяких забруднюючих речовин, через це не має значення, для чого використовується насос - для охолодження або обігріву приміщення.

Споживання електроенергії в установці мінімальне, через це витрати експлуатації дуже низька порівняно з іншими типами опалювальних систем. Дана система автономна , незалежна і не потрібує споживачу подавати рідке паливо або газ до установки, необхідно тільки електроенергія. Немає необхідності облаштовувати технічне приміщення для зберігання палива, димохід або котельню.[5]

Ґрунтовий тепловий насос має багато переваг для придбання, але також як і у сьому є і свої недоліки. Даний пристрій потребує великі інвестиції у придбання та встановлення теплового насосу.

Якщо глибина і кількість свердловин розрахувати невірно, це тягне за собою наслідки, таки як зменшення з кожним роком джерела тепла (для відновлення роботи, необхідно провести роботу повернення тепла влітку застосувавши його у режимі кондиціонування).[6]

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

2.1 Постановка задач теплопровідності

Явище теплопровідності в багатьох відношеннях аналогічне іншому найважливішому кінетичному явищу - електропровідності. Однак слід зазначити, що картина перенесення енергії в твердих тілах значно складніша за явище перенесення заряду [7]. Теплопровідність описує здатність тіла передавати теплову енергію з однієї точки в іншу, якщо між ними є різниця температур [8].

Для опису фізичних процесі у математичному вигляді необхідно зробити правильну постановку задачі. Необхідно сформувати умови для визначення процесу [9].

Рівняння теплопровідності використовуються за наступними умовами:

1. Початкові умови;
2. Граничні або поверхневі умови;
3. Умови спряження.

Задачі теплопровідності часто виникають в різних фізичних застосуваннях. Наприклад можуть слугувати різні технологічні процеси, пристрої які працюють, і в процесі їх експлуатації ці пристрої можуть піддаватися різному тепловому впливу і зокрема можуть виникати різні теплові процеси.

Теплові процеси описуються рівняннями теплопровідності, що представляє собою диференціальне рівняння в часних похідних, яке записується в такому вигляді:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - a^2 \Delta u = f(r,t) \qquad (1.1)$$

де a- позитивна константа, Δ - оператор Лапласа, $f(r,t)$- функція теплових джерел.

Початкові умови в загальному вигляді для теплопровідності можна задати за допомогою рівняння:

$$\text{t=0: } T(x,y,z,t) = T_0(x,y,z) \tag{1.2}$$

Граничні умови можуть задаватися за допомогою комбінацій наступних видів рівнянь:

1. Рівняння граничних умов Діріхле

$$x,y,z\epsilon\Gamma: \quad T(x,y,z,t) = T_\Gamma(x,y,z,t) \tag{1.3}$$

2. Рівняння граничних умов Неймана

$$x,y,z\epsilon\Gamma: \quad \lambda\frac{\partial T}{\partial n} = q(x,y,z,t) \tag{1.4}$$

де n- зовнішня нормаль до межі.

3. Рівняння третього роду

$$x,y,z\epsilon\Gamma: \quad \lambda\frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha\, T - T_C \tag{1.5}$$

Важливо зазначити, що при умові де $T_\Gamma \neq T_C$, коефіцієнт тепловіддачі α містить всю інформацію в собі про складні процеси теплового контакту між тілом і навколишнім середовищем у примежовому шарі. Рівність $T_\Gamma = T_C$ зазвичай застосовується на поверхні контакту тіла з навколишнім середовищем, але при умові у формулі(1.5) температура знаходиться за межею пограничного шару.

Існують різні методи розв'язання задач теплопровідності твердих тіл, зокрема аналітичні методи, які дають змогу одержати точний розв'язок, як-от метод Фур'є, також має назву метод відокремленних змінних, та існує ряд чисельних методів крайових задач (метод скінченних елементів, метод граничних елементів, метод скінченних об’ємів), зокрема рівняння теплопровідності.

Розглянемо більш детально у наступних пунктах існуючі методи розв'язання задач теплопровідності.

2.2Аналітичні методи розв’язання задач теплопровідності

В інженерії аналітичні методи можна застосовувати лише до класичних задач теплопередачі з регулярними геометричними межами. При розв'язуванні математичних і фізичних рівнянь в не ортогональних межах нерегулярних областей застосування аналітичних методів ускладняється [10].

Аналітичні методи забезпечують більш ілюстративне рішення, що полегшує аналіз впливу всіх факторів на результат рішень. Важливим критерієм для аналітичних методів є можливість розв'язання нелінійних крайових задач. Якщо метод розроблено для розв'язання нелінійних задач, то його можна застосувати і для розв'язання лінійних задач, зворотне ж часто неможливе [11].

Метод Фур'є (метод відокремлених змінних) відноситься до аналітичного методу та дозволяє одержати точний розв'язок задач. Типовими задачами, що розв'язуються методом роздільних змінних є змішані задачі для параболічних рівнянь і гіперболічних рівнянь.

У даному розділі запропоновано розв'язання рівняння теплопровідності в однорідних ізотропних тілах простої форми, що піддаються процесам охолодження або нагріву без зміни фази, з внутрішнім джерелом тепла [12].

Класичним методом розв'язання одновимірного рівняння теплової дифузії є метод розділення змінних. У цьому методі початкова умова апроксимується нескінченною кількістю синусоїдальних членів, точніше, рядом Фур'є. Розв'язання рівняння теплопровідності Розв'язок рівняння теплопровідності матиме стільки членів, скільки членів було використано для апроксимації початкової умови [13], тому даний метод також має назву метод Фур'є.

Застосування аналітичного методу розв’язання задач теплопровідності обмежується досить простим класом задач, зазвичай такі методи застосовують для ділянок дуже простої форми, як правило, це паралелепіпеди, квадрати тощо. Якщо геометрична форма об'єкта складніша, то найчастіше застосовують числові методи.

2.3 Числові методи розв'язання задач теплопровідності

Так само існує ряд чисельних методів рішення крайових задач. Метод скінчених елементів, метод граничних елементів і метод скінченних об’ємів.

2.3.1 Метод скінченних елементів

Розглянемо більш детально існуючі методи рішення задач теплопровідності.

За останні час дослідники запропонували багато методів для розв'язання задач теплопередачі. Метод скінченних елементів (МСЕ) є добре відомими методом, який часто використовуються для розв'язання таких задач.

Однак вони вимагають дискретизації всієї області, що призводить до проблем, які можуть бути виснажливими і дорогими в обчислювальному плані, особливо у випадку необмежених або високорозмірних нерегулярних областей [14]. Існують різні види скінченних елементів, деякі з них розглянемо більш детально.

а) Одновимірні елементи

Найпростішими з скінченних елементів є одновимірні елементи. Зазвичай зображується у вигляді відрізків рис. 2.1

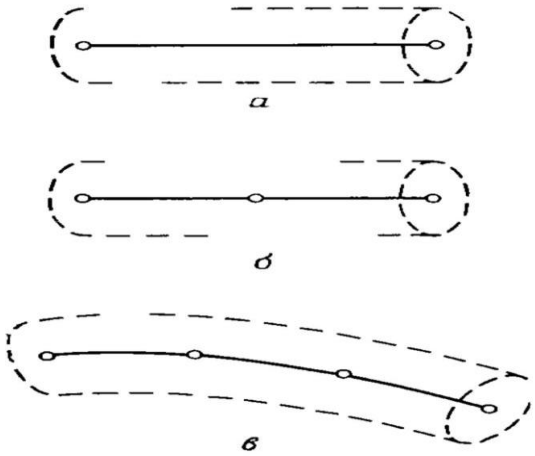


Рис.2.1 Одновимірні скінченні елементи

Найпростіший одновимірний елемент має два вузли, по одному на кожному кінці. Елементи більш високого і чотиривузлові, зображені на фіг. 2.1, б і в. Одновимірний елемент може бути криволінійним (рис. 2.1 в) за умови, що довжина дуги входить до рівнянь, що визначають елементи. [15]

a) Двовимірні елементи

Для побудови моделі двовимірної області застосовують два основних сімейства елементів: прямокутники, трикутники і чотирикутники. Сторони лінійних елементів кожного сімейства є прямими лініями (рис. 2.2, а). Квадратні та кубічні елементи можуть мати прямі та криві сторони або обидві сторони (рис. 2.2 б). [15]

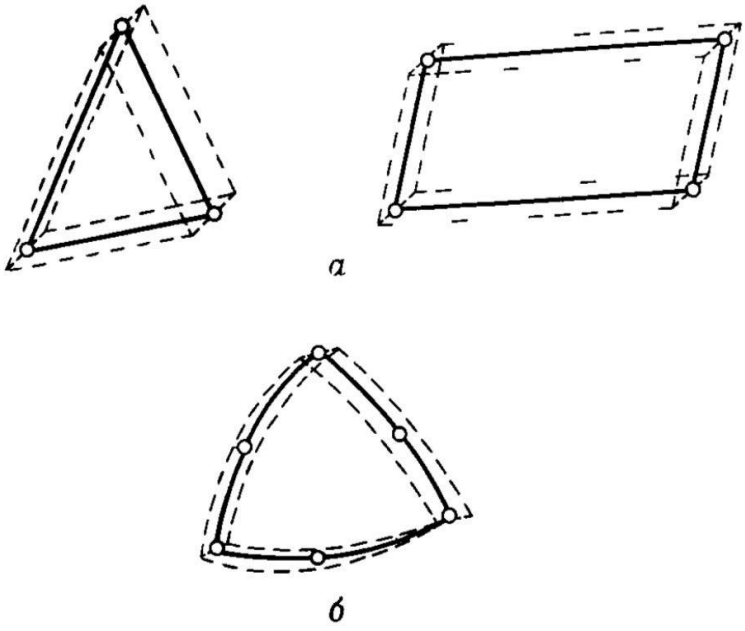


Рис.2.2 Двовимірні скінченні елементи

b) Тривимірні елементи

Найпопулярнішими тривимірними скінченні елементами є паралелепіпед та тетраедр (рис 2.3 а,б) На рис 2.3,в зображено інший види елементів, які застосовуються при розгляді тіл циліндричної форми. Ці елементи подібні до двовимірного трикутника і дають змогу ще врахувати зміну невідомої величини вздовж зміну невідомої величини вздовж третьої координати. [15]

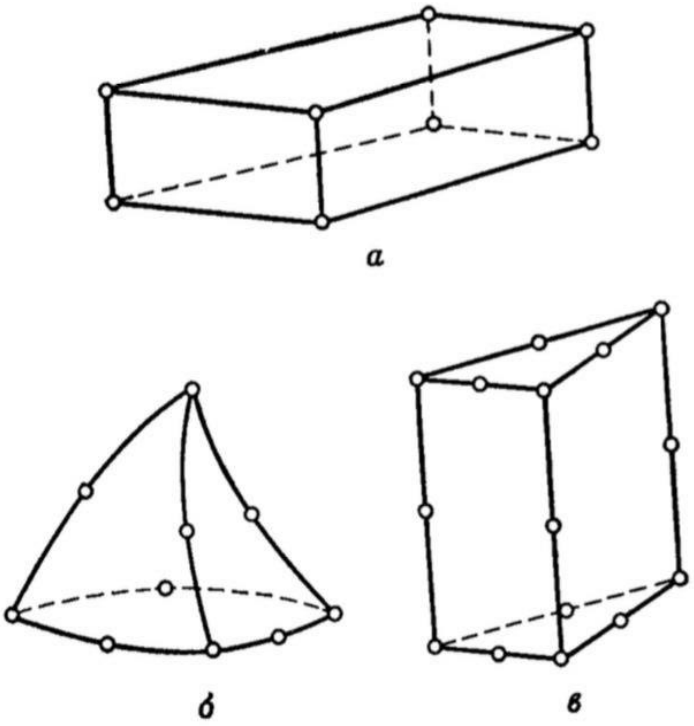


Рис.2.3 Тривимірні скінченні елементи

2.3.2 Метод граничних елементів

Метод граничних елементів - одним з найпопулярніших методів чисельного моделювання крайових задач.

Різні чисельні методи, такі як метод граничних елементів (МГЕ), були розроблений для полегшення цих обчислювальних труднощів. Однак, МСЕ вимагає попереднього знання фундаментальних розв'язків, і це призводить до інтегрування вздовж граничних елементів [14].

Граничні елементи виявилися потужною альтернативою скінченним елементам, особливо у випадках, коли потрібна краща точність через такі проблеми, як концентрація напруги або коли область розширюється до нескінченності. Найважливішою властивістю граничних елементів є те, що вони вимагають дискретизації лише поверхні, а не об’єму. [16]

За принципом метод граничних елементів застосовується до будь-якої лінійної системи. Для рівнянь еліптичного виду рішення отримується одразу. Для рівнянь параболічного виду повинно зробити дискредитацію по часу. Задачі

лінійного виду , які мають розв’язання методом скінченних елементів, майже всі можливо рішити методом граничних елементів. [17].

Для більшого розуміння порівняємо метод гранічних елементів з його конкурентом - методом скінченних елементів. Його переваги та недоліки можна підсумувати розглянемо дали.

1. 1. Підготовка даних займає менше години. Таким чином, година, яка потрібна аналітику для підготовки (і перевірки) даних для завдання, може значно відрізнятися. Подальші зміни на екранах також будуть спрощені. Ця перевага особливо важлива в задачах, де необхідно неодноразово міняти сітку [18].
2. Висока роздільна здатність напружень. Напруження є точними, оскільки на розв'язок не накладається додаткове наближення у внутрішніх точках, тобто розв'язок є точним всередині області. Це робить метод граничних елементів дуже придатним для моделювання задач зі швидкозмінними напруженнями [18].
3. Менше комп'ютерного часу і пам'яті.
4. Менше небажаної інформації. У більшості інженерних задач "найгірші ситуації" зазвичай виникають на поверхні. У багатьох кодексах проектування та інженерних практиках аналітик зазвичай зацікавлений лише в тому, що відбувається в найгіршій ситуації [18].

2.3.3 Метод скінченних об’ємів

Метод скінченних об’ємів (МСО) відноситься до численних методів розв’язання задач теплопровідності. Скінченний об'єм означає невеликий об'єм навколо кожного вузла мережі.

Метод ґрунтується на розбитті області на контрольні об'єми, що не перетинаються, у вузлових точках яких шукають рішення. Вузлові точки розташовані в центрах контрольних об'ємів, як і в методі скінченних різниць, для кожного елемента формують рівняння, отримують систему лінійних рівнянь, розв'язання якої використовують для знаходження значень шуканих величин у вузлових точках, для окремого елемента рівняння отримують шляхом

інтегрування вихідного диференціального рівняння за елементом, апроксимуючи інтеграли [19].

Метод скінченних об’ємів має два види вирішення задач. На рис.2.4 зображено перший спосіб, де грані скінченного об’єму співпадають із межами елементів.

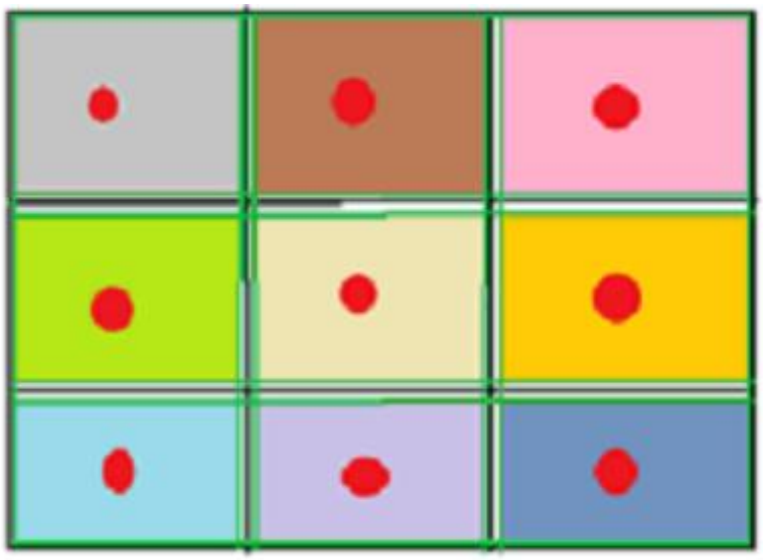


Рис.2.4 Грані скінченного об’єму співпадають із межами елементів.

На рис 2.5 зображено грані скінченного об’єму, які проходять через середину(центр) меж елементів. Змінні пошуку зберігаються у вершинах цих елементів. Навколо кожної вершини створюється контрольний об'єм.

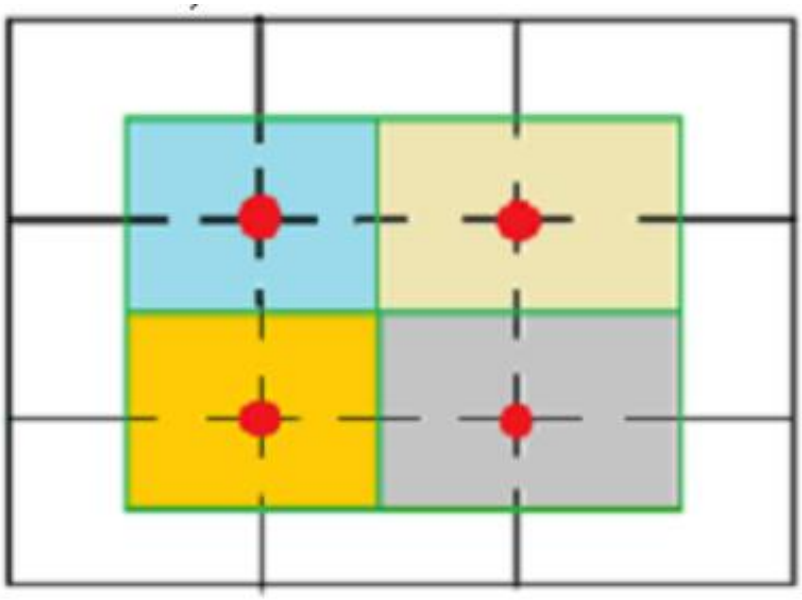


Рис.2.5 Грані скінченного об’єму проходять через центр з межами елементів.

2.4 Програмне забезпечення для моделювання теплових процесів.

Найбільш розповсюдженими програмами для моделювання теплових процесів являються COMSOL Multiphysics, ADINA Thermal, Ansys Fluent Heat Transfer Modeling, SolidWorks, THESEUS-FE і тому подібне. Розглянемо більш детально деякі з наведених програмних забезпечень.

2.4.1 SolidWorks

Розробником продукту SolidWorks є компанія SolidWorks Corporation, яка була відкрита у 1993 році. У 1995 році програма почала продаватися та стала більш популярною і почала конкуренцію з AutoCAD, Компас та інші. Наразі додаток доступний лише для операційних систем Windows.

SolidWorks - це програма, яка створена для 3D моделювання і інженерного проєктування [20]. Застосовується на етапах технологічної підготовки та конструювання.

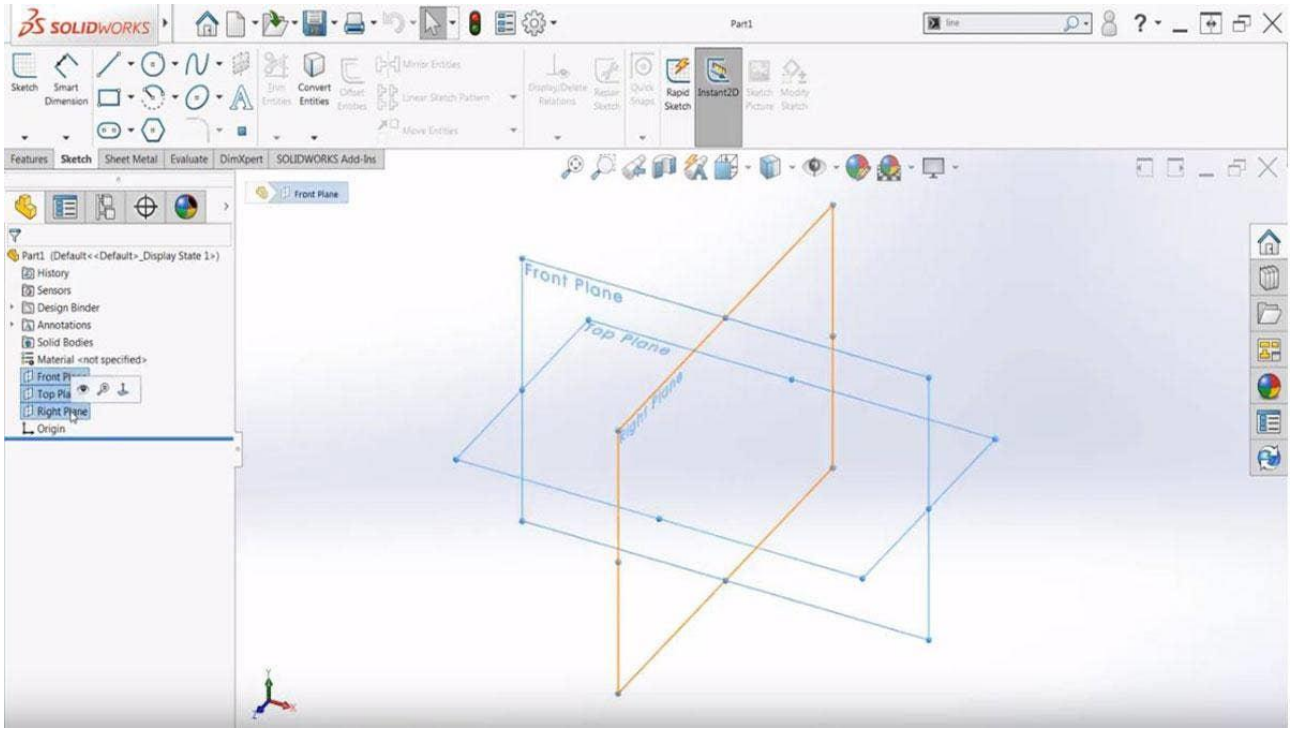


Рис.2.6 Інтерфейс SolidWorks

Програма SolidWorks направлена на створення тривимірних деталей з серії простих 2D-ескізів і також таких функцій як: обертання, вирізання, отвори, видавлювання та інші. Також є можливість створення двомірного креслення з тривимірної деталі та її зборка. [21].

SolidWorks допоможе візуалізувати продукт максимально реалістично, навіть не тримаючи його в руках. Наприклад, можна створити просту коробку за допомогою процесу Extrude (Витиснути), а сферу - за допомогою процесу Revolve (Обернути). Однак циліндр можна створити за допомогою будь-якого з цих процесів, обертаючи прямокутник або видавлюючи коло. Починати потрібно з візуалізації тривимірної форми, а потім застосувати процес до двовимірного ескізу для створення цієї форми. На рис.2.7 показано зображення простих типів елементів із 2D-ескізами, на основі яких вони були створені[22].

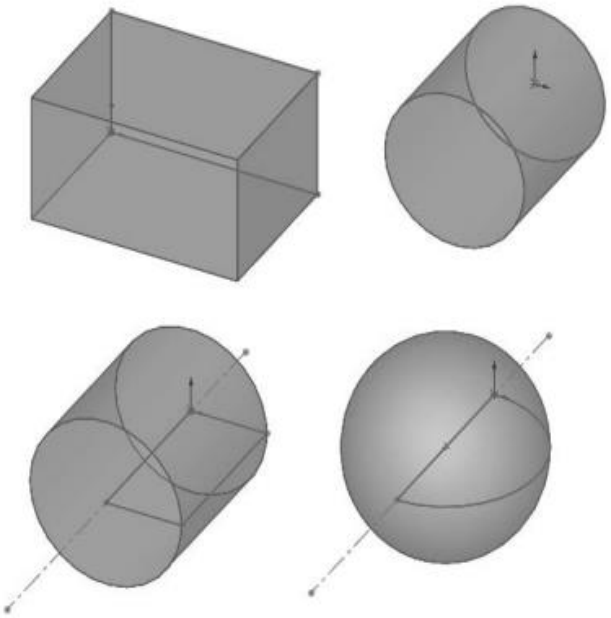


Рис 2.7 Прості елементи

SolidWorks - це не тільки функції, але й історія. Панель в лівій частині вікна SolidWorks, яка називається деревом проектування, використовується для перегляду історії процесу. Дерево містить список елементів у порядку їх додавання. Воно також дозволяє змінювати порядок елементів у дереві. Тому порядок виконання операцій дуже важливий. На рис 2.8 зображено дерево проектування (FeatureManager).

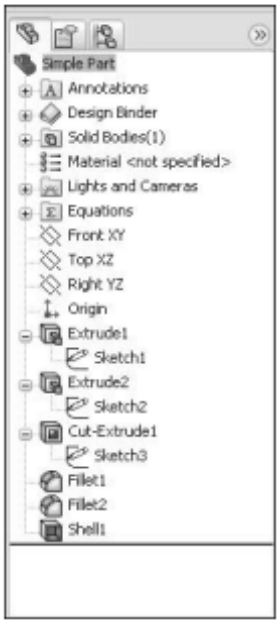


Рис 2.8 Дерево проектування

Solidworks Simulation – це версія, яка призначена для ознайомлення з аналізом методом скінченних елементів. Програму Simulation можна запустити через меню Інструменти.

Першим кроком у виконанні простого аналізу є призначення матеріалу. Також можливе прикладання навантаження до поверхонь у вигляді сили або тиску. На вкладці Умови ви можете встановити температуру розплаву і температуру форми. Аналіз автоматично обробляється. Під час аналізу відтворюється анімація На рис 2.9 зображено приклад роботи Solidworks Simulation при статичному русі [23].

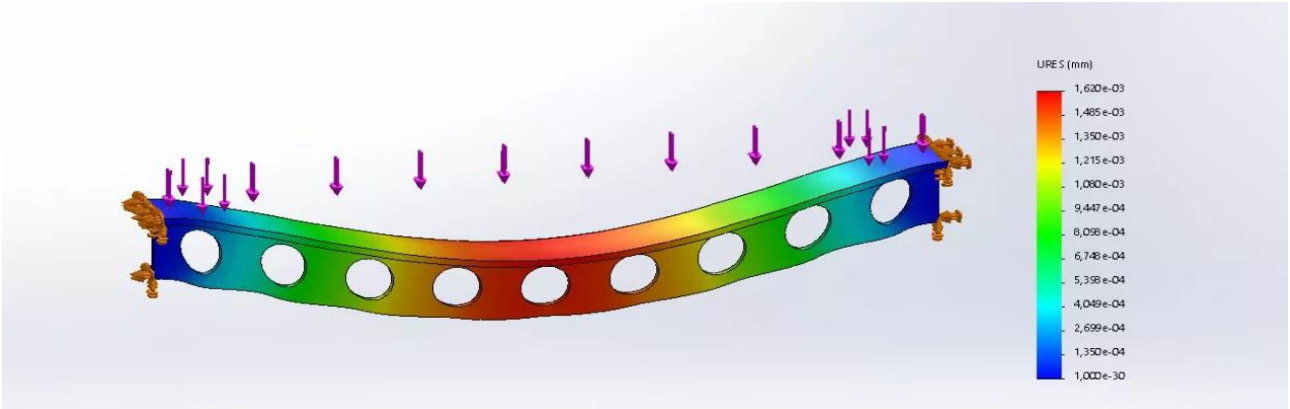


Рис. 2.9 Приклад роботи Solidworks Simulation

2.4.2 Ansys Fluent Heat Transfer Modeling

Програмне забезпечення ANSYS вже понад 50 років набирає свою популярність в сфері інженерних автоматизованих розрахунків. Засновником ANSYS є американська компанія ANSYS Inc у 1970 році. Програма ANSYS це сучасна комп'ютерна програма, яка користується великим попитом серед фахівців у вирішенні різних задач , механіки рідини, твердого тіла , теплообміну, гідродинаміки та іншого.

ANSYS FLUENT - це сучасна комп'ютерна програма для моделювання теплопередачі, течії рідини, хімічних реакцій і інше у складній геометрії. Написана на мові програмування C та застосовує усі переваги потужності та гнучкості запропонованою даною програмою.

ANSYS FLUENT застосовує архітектуру клієнт/ сервіс, що дозволяє запускати його як окремі паралельні процеси на клієнтських настільних робочих станціях і потужних обчислювальних серверах. ANSYS FLUENT забезпечує повну мережеву гнучкість, включаючи можливість вирішувати проблеми потоків за допомогою неструктурованих мереж, які відносно легко генерувати для складної геометрії. Підтримувані типи мереж включають 2D, 3D та змішані (гібридні) мережі. русі [24].

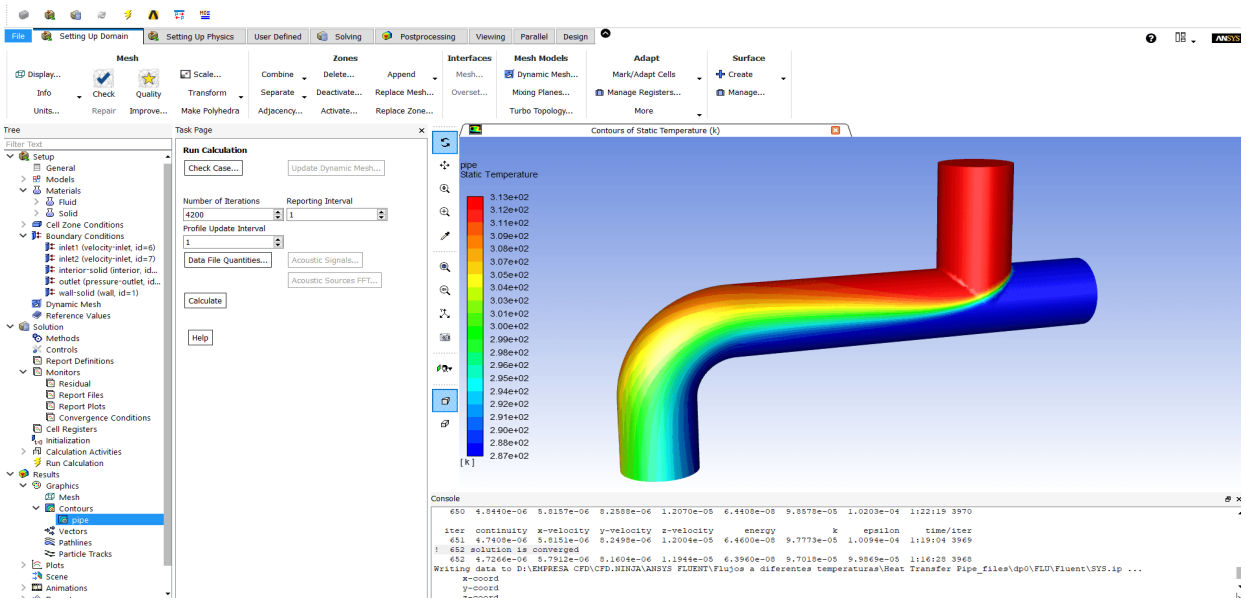


Рис. 2.10 Інтерфейс ANSYS FLUENT

Інтерфейс ANSYS FLUENT дуже легкий та зрозумілий у використанні. З лівої сторони програми розташовано дерево проекту та детальна інформація про об’єкт. У верхній частині розташовано меню та інструменти, по центру графічне вікно на якому можна побачити деталь.

ANSYS FLUENT надає комплексні можливості для моделювання широкого спектру нестисливих і стисливих, ламінарних і турбулентних потоків рідини. Можна виконувати стаціонарний або перехідний аналіз. Можна моделювати різні режими теплообміну, включаючи природну, вимушену та змішану конвекцію з або без спряженого теплообміну, пористі середовища тощо. Особливою силою ANSYS FLUENT є його здатність моделювати явища горіння з використанням різноманітних моделей [25].

2.4.3 ADINA Thermal

Програмне забезпечення ADINA призначена для моделювання теплопередачі через структури та тверді тіла. Вона має потужні можливості, як випромінювання між поверхнями з довільною геометрією, а також опції для дуже нелінійної поведінки матеріалу [26].

Заснована компанією ADINA R & D 3 вересня 1986 року, доктором Клаус-Юрген Бате. Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis (ADINA) має чотири основних продукти: ADINA Structures, ADINA CFD, ADINA Thermal, ADINA EM. Кожен продукт має своє направлення, наприклад, ADINA Thermal для аналізу передачі тепла в твердих тілах, а ADINA EM – для аналізу електромагнітних явищ.

2.4.4 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics – це програмне забезпечення для моделювання теплових процесів. У дипломній роботі будемо використовувати дану програму, тому розглянемо більш детально.

Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics- це потужний інструмент для розв'язання рівнянь у частинних похідних та скінченних елементах. Базове програмне забезпечення COMSOL Multiphysics має вісім додаткових модулів, які

розширюють можливості базового програмного забезпечення Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics також має інше допоміжне програмне забезпечення, таке як CAD Import Модуль імпорту CAD і Бібліотека матеріалів [27].

На рис 2.11 інтерфейс COMSOL Multiphysics . Ця система координат формується на правилі правої руки.

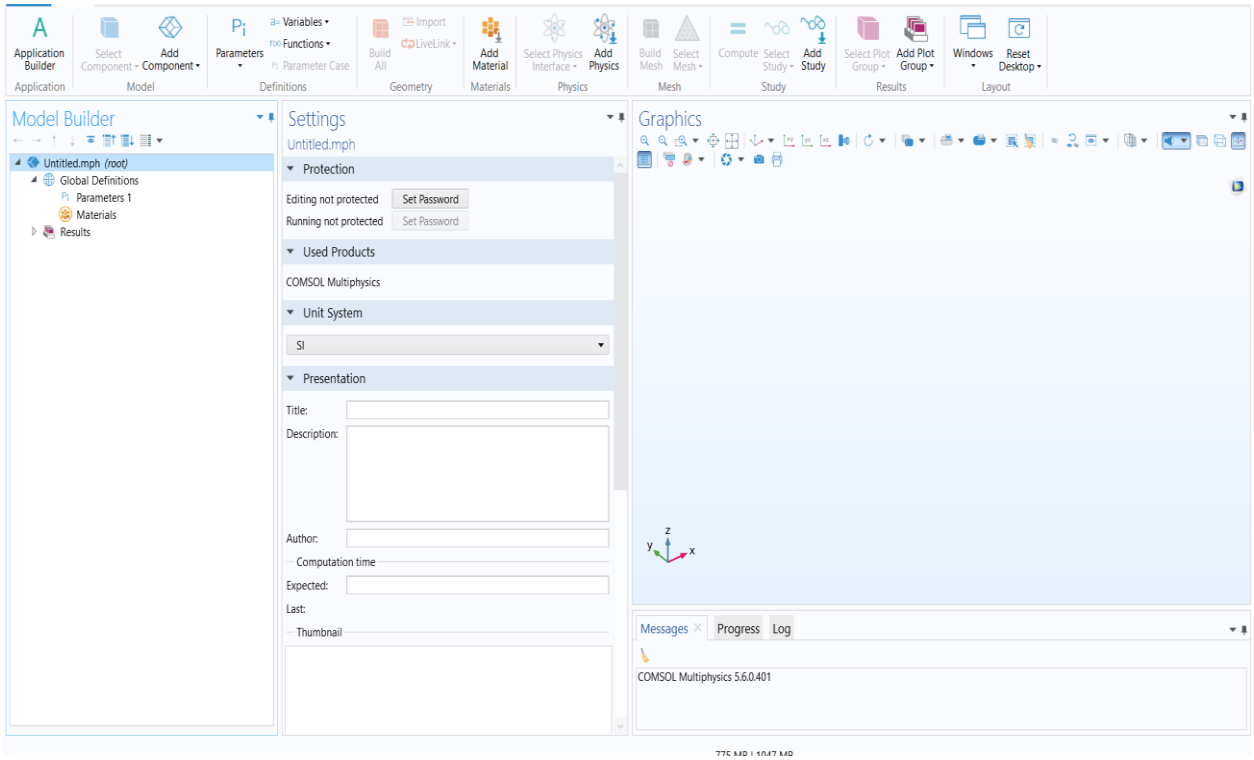


Рис 2.11 Приклад інтерфейсу COMSOL Multiphysics

Поєднання комп’ютерного моделювання і аналізу принципів дає користувачу можливість спробувати різні підходи до вирішення однієї і тієї ж проблеми щоб отримати правильний конструкцію в майстерні чи лабораторії ще до того, як перші компоненти пристрою будуть виготовлені та протестовані. Користувач також може використовувати результати фізичного тестування пристрою, щоб змінити параметри моделі і прийти до покращеного рішення швидше [27].

Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics можна встановити на одному виділеному комп'ютері і різні користувачі можуть по черзі використовувати програмне забезпечення на цьому комп'ютері. Кількість одночасних сеансів, які може виконувати один користувач, не обмежена[28].

Моделювання теплових процесів у ґрунті в даній дипломній роботі відбудеться у програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics.

Для початку роботи ознайомимось більш детально з.

Робота COMSOL Multiphysics. Існує 2 режими в якому ми можемо це зробити моделювання:

1. Model Wizard – майстер побудови моделі;
2. Blank Model – початок з порожньої моделі без попередніх налаштувань.

Параметри і змінні, оператори і функції, вибірки, датчики, операції сполучення, системи координат і багато інших функцій можливо зробити у вузлі дерева моделі (Definitions). За допомогою цього вузла можливо додавати додаткові підвузли для визначення змінних, для налаштування вибірок, для налаштування датчиків тощо.

Базовим інтерфейсом для розрахунку поля температур у COMSOL є інтерфейс Heat Transfer in Solids and Fluids.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ҐРУНТІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ РІЗНИХ ТИПІВ

В дипломній роботі розглядається моделювання теплових процесів в різні пори року за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Моделюємо теплові процеси в горизонтальному та спіральному колекторі. В наступних підрозділах беремо данні ґрунту в Харківській області. Тип ґрунту в Харківській області переважно – чорнозем.

3.1 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу горизонтального типу (зима).

В даному підрозділі моделюємо тепловий процес в грунті при використання геотермального тепловогу насосу горизонтального типу у зимню пору року. Модель розташовується на глибині 2 метри з температурою ґрунту 8 ℃. Далі розрахуємо та побудуємо горизонтальний геотермальний колектор.

Припустимо, що для нашого дома виберемо тепловий насос Nibe F1145 з тепловою потужністю компресора (B0 / W35) рівним 8,3 кВт, COP (кількість кіловат тепла з одного кіловата електроенергії (B0/W35)) – 5,01.

Ефективна потужність контурів ґрунтового колектора розраховується з урахуванням потужності та COP обраного теплового насоса за формулою:

$$Pe = 8{,}3 * \left(1 - \frac{1}{5{,}01}\right) = 6{,}64 \text{ кВт} \quad (3.1)$$

Необхідна довжина, дорівнює співвідношенню необхідної потужності до знімаємої потужності одного метра труби:

$$L = Pe/q \quad (3.2)$$

де, q - середнє значення для горизонтальних колекторів (0,02 м)

$$L = \frac{6{,}64}{0{,}02} = 332\text{м} \quad (3.3)$$

Для теплового насосу Nibe F1145 буде оптимально 3 ґрунтових колектори по 111 м кожний. Оберимо для розглядання детальніше 1 ґрунтовий колектор з довжиною 111 м.

Якщо відсутній теплообмін у системі, який пов'язаний з роботою колектора, розподіл температури в горизонтальній системі буде рівномірним. Це свідчить про те, що часткові похідні від температури дорівнюватимуть нулю. Можна зазначити, що ці умови виконуються приблизно на бічних межах розрахункової області під час експлуатації колектора, якщо ці межі досить віддалені від крайніх сегментів пласта.[29]

Постановка задач:

1. Температура ґрунту - 8 °С;
2. Глибина залягання – 2 м;
3. Довжина горизонтального колектору – 111 м;
4. Діаметр труби -0,05 м;
5. Щільність ґрунту – 1700 кг/м^3;
6. Теплопровідність ґрунту – 1 Вт/ м*К;
7. Питома теплоємність ґрунту – 2010 Дж/кг*К;
8. Температура теплоносія на вході – 1 °С;
9. Температура теплоносія на виході – 6 °С;
10. Час моделювання 24 години.
11. Геометричні розміри області крайової задачі: Ширина 16 м; Глибина 4 м; Висота 16м.

Нижче наведені результати розрахунку температурного стану геотермального теплового насосу горизонтального колектора у зимню пору року. . На рис 3.1 зображено зовнішній вигляд горизонтального колектору за довжиною 111 м на глибині 2 метри.

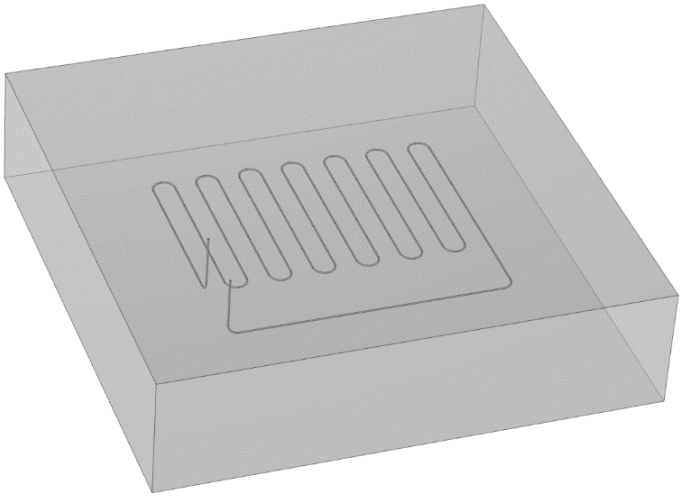
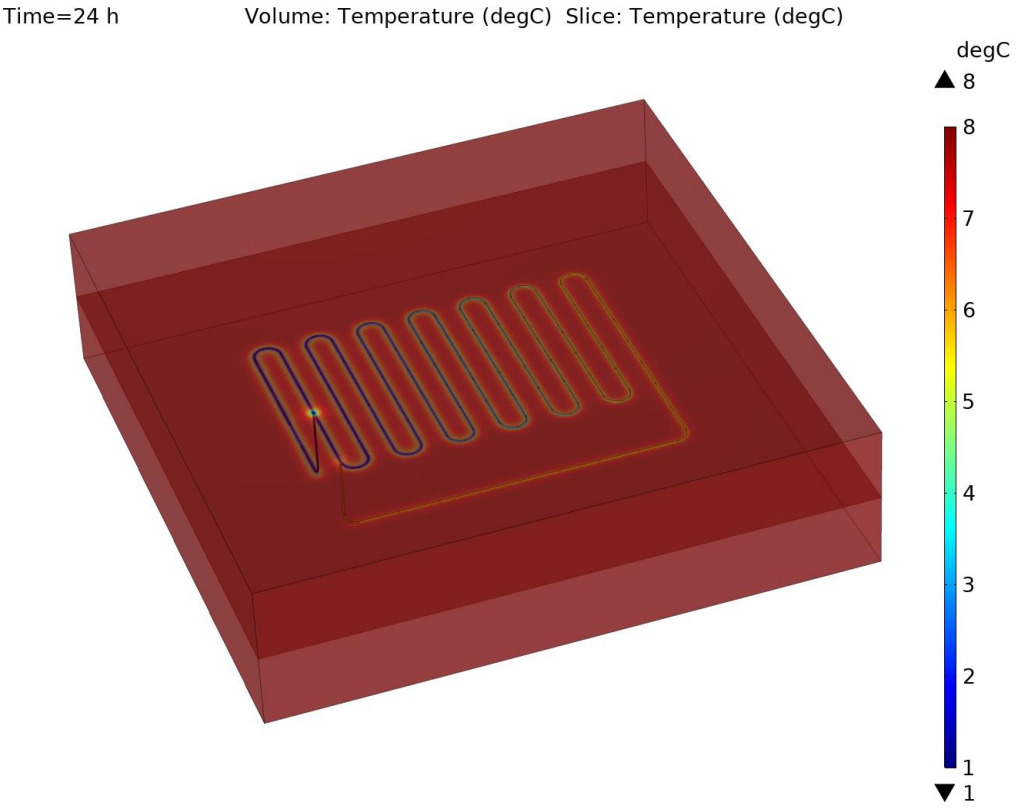
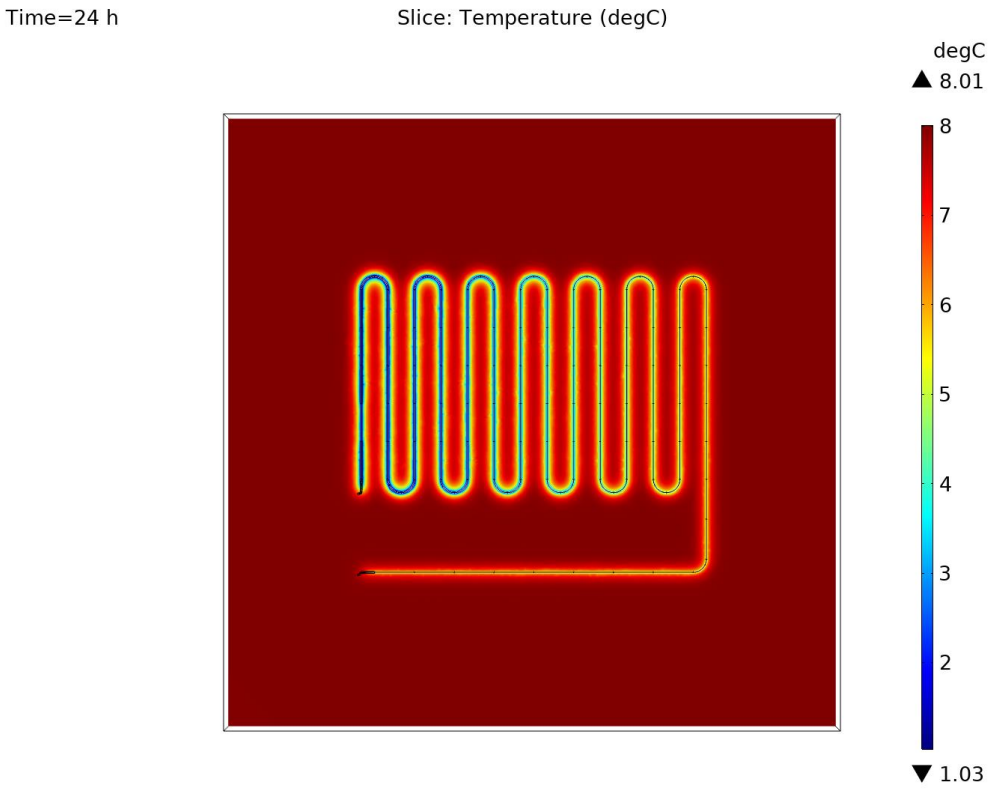


Рис 3.1 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу горизонтального типу .



(3.2 а)



(3.2 б)

Рис 3.2 (а,б) Розподіл температурного поля в ґрунті взимку

t= 24 години

На рис 3.2 (а, б) зображено розподіл температурного поля в ґрунті у зимню пори року з часом моделювання 24 години.

3.2 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу горизонтального типу (літо).

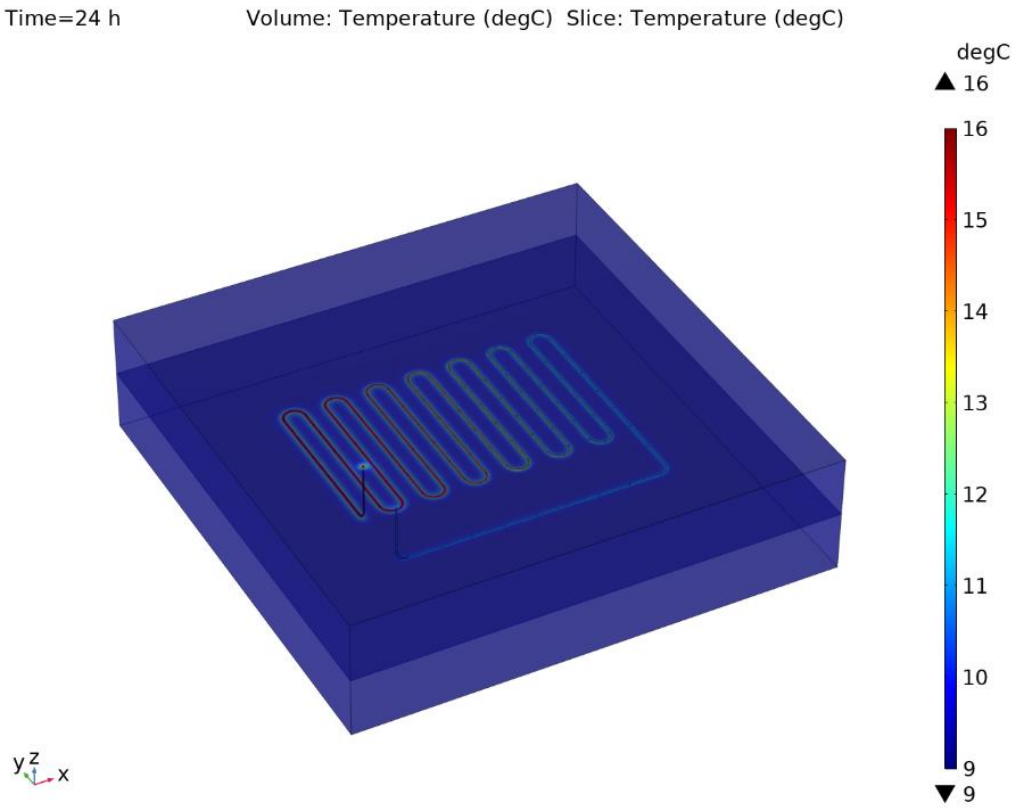
В наступному підрозділі відбувається моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу також горизонтального типу в літню пору року.

Постановка задач:

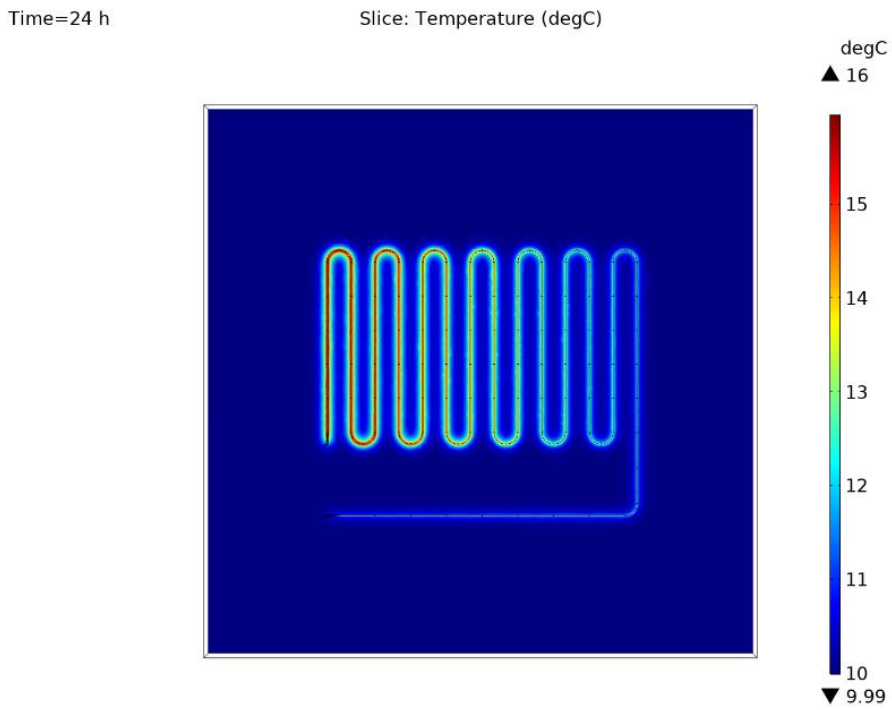
12. Температура ґрунту - 10 ℃;
13. Глибина залягання – 2 м;
14. Довжина горизонтального колектору – 111 м;
15. Діаметр труби -0,05 м;

16. Щільність ґрунту – 1700 кг/м^3;
17. Теплопровідність ґрунту – 1 Вт/ м*К;
18. Питома теплоємність ґрунту – 2010 Дж/кг*К;
19. Температура теплоносія на вході – 16 °С;
20. Температура теплоносія на виході – 11 °С;
21. Час моделювання 24 години.
22. Геометричні розміри області крайової задачі: Ширина 16 м; Глибина 4 м; Висота 16м.

Розподіл температурного поля в ґрунті в літню пору року за 24 години зображено на рис 3.3 (а,б).



(3.3 а)



(3.3 б)

Рис 3.3 (а,б) Розподіл температурного поля в ґрунті влітку

t= 24 години

3.3 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу спірального типу (зима).

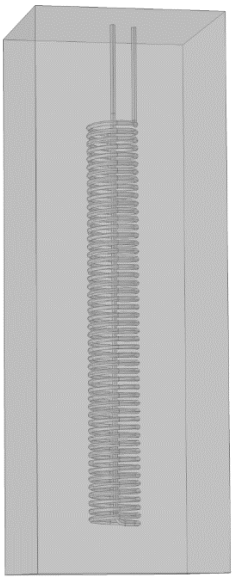
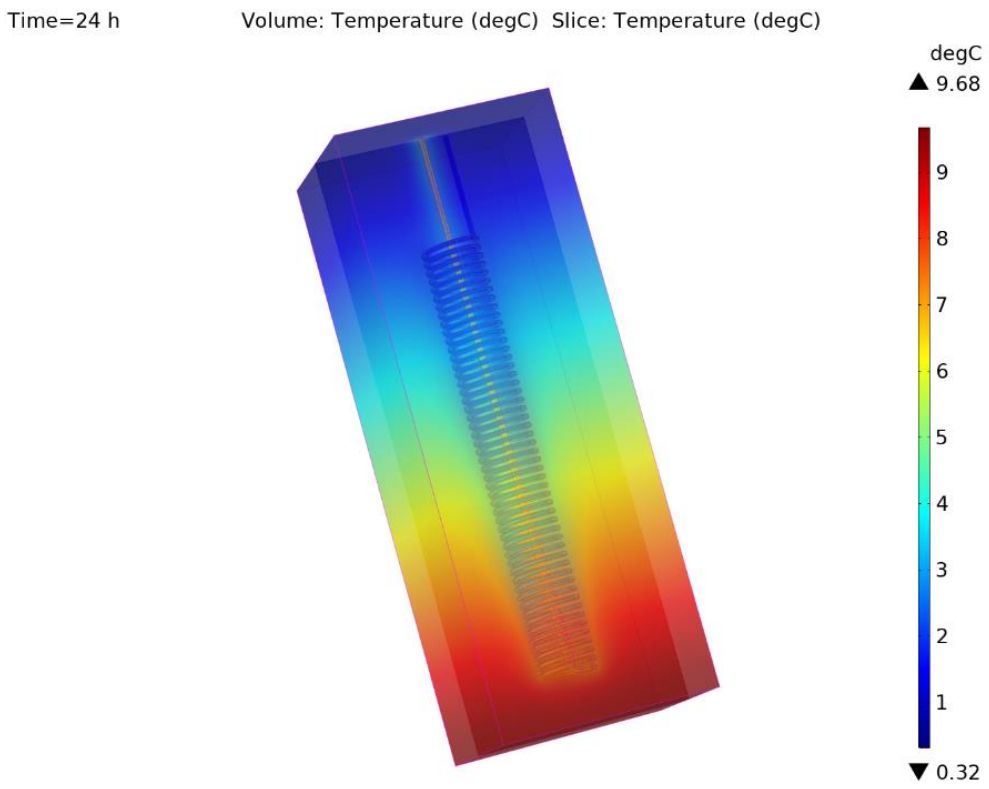


Рис 3.4 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу спірального типу .

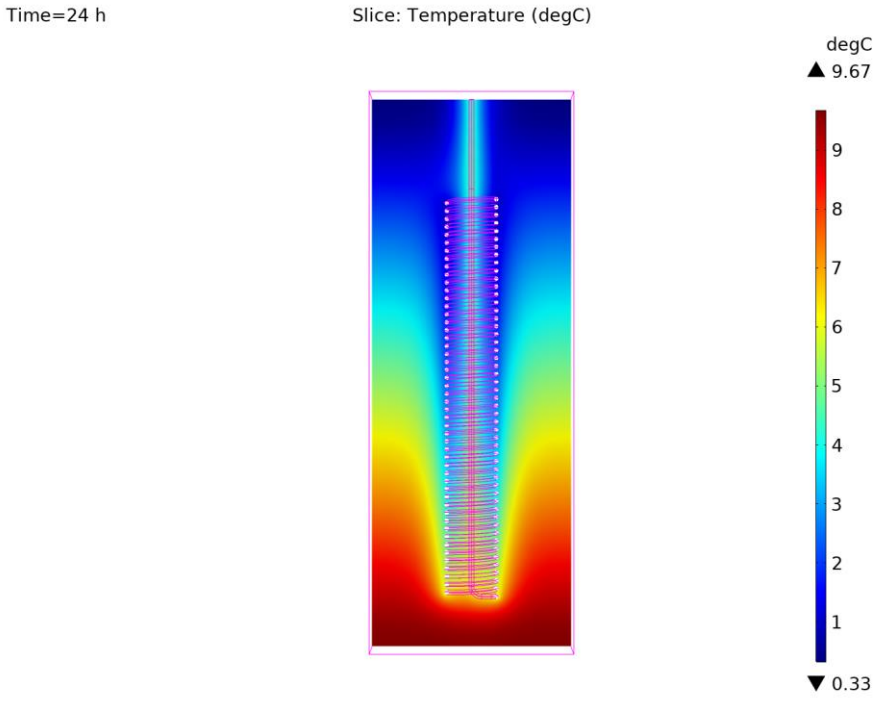
Геотермальний тепловий насос спірального типу – це новий тип колектору, який з’явився декілька років тому. Даний тип колектору дуже компактний, тому він використовується як у новій системі, так і при модернізації колекторів старого зразка для збільшення їх пропускної здатності.

Постановка задачі:

1. Температура на поверхі ґрунту - 0 ℃;
2. Температура на глибині 4 м – 10 ℃
3. Довжина спірального колектору – 111 м;
4. Діаметр труби -0,05 м;
5. Щільність ґрунту – 1700 кг/м^3;
6. Теплопровідність ґрунту – 1 Вт/ м*К;
7. Питома теплоємність ґрунту – 2010 Дж/кг*К;
8. Температура теплоносія на вході – 1 ℃;
9. Температура теплоносія на виході – 6 ℃;
10. Час моделювання 24 години.
11. Геометричні розміри області крайової задачі: Ширина 2 м; Глибина 2 м; Висота 5,5 м.



(3.4 а)



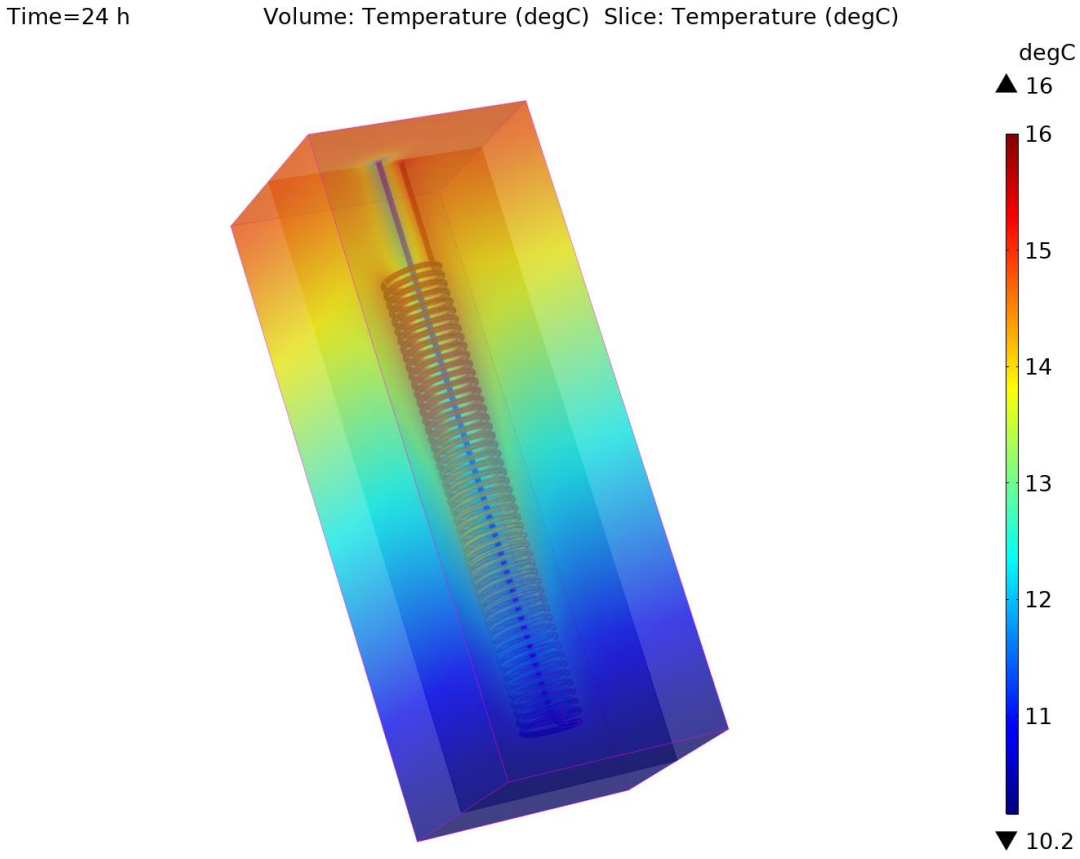
3.4(б)

Рис 3.4 (а,б) Розподіл температурного поля в ґрунті взимку t= 24 години

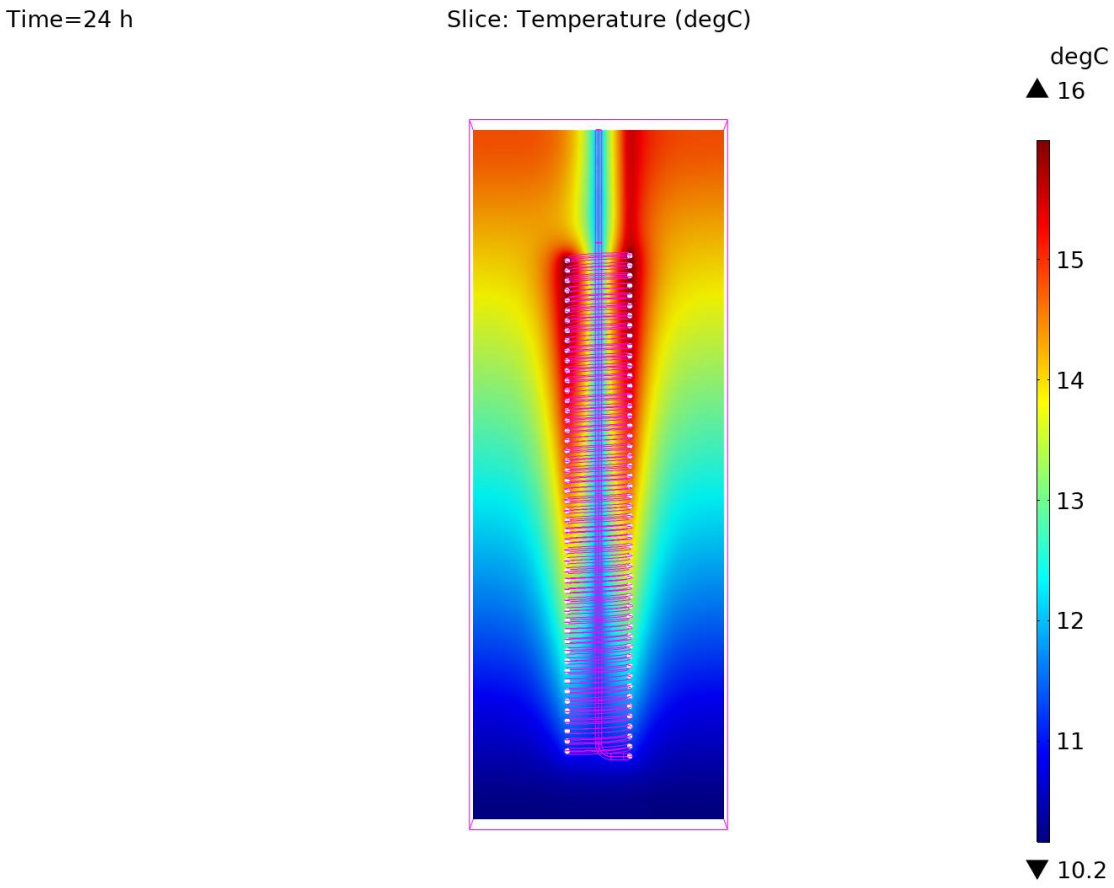
3.4 Моделювання теплового процесу в ґрунті при використанні геотермального теплового насосу спірального типу (літо)

Аналогічно проведено моделювання геотермального теплового насосу спірального типу в літню пору року. Усі данні що приведені в підрозділі вище залишаються незмінними, окрім:

1. Температури на поверхі ґрунту - 15 ℃;
2. Температури теплоносія на вході – 16 ℃;
3. Температури теплоносія на виході – 11 ℃;



3.5(а)



3.5(б)

Рис 3.4 (а,б) Розподіл температурного поля в ґрунті взимку

t= 24 години

ВИСНОВОК

У період дипломної роботу були вирішенні наступні задачі:

1. Було проведено аналітичний огляд літератури, присвячений геотермальним тепловим насосам;
2. Знайомство з існуючими методами та підходами до розв’язання задач теплопровідності;
3. Проведено аналіз програмного забезпечення для моделювання теплових процесів;
4. Спираючись на проведений аналіз було обране програмне забезпечення COMSOL Multiphysics для моделювання теплових процесів;
5. Проведено моделювання теплових процесів в ґрунті, які виникають при використанні геотермальних теплових насосів з різними схемами укладання ґрунтового колектору в різні пори року.

Було проведено, моделювання теплових процесів , що протікають в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів різних типів, за допомогою програмного забезпечення для моделювання фізичних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тепловий насос Рей Д, Макмайкл Д. 1982р
2. Електронний ресурс «Грунтові теплові насоси розсіл - вода» https://alternetica.com.ua/production/heatpumps/gruntovi-teplovi-nasosy
3. Електронний ресурс «Геотермальний тепловий насос» https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81
4. Електронний ресурс «Геотермальний тепловий насос: принцип роботи, всі «за» і «проти»» https://a-air.com.ua/ua-articles/geotermalnyj-teplovoj-nasos-princip-raboty/
5. Електронний ресурс «Що таке тепловий насос? які бувають теплові насоси і принцип їх роботи.» https://modernsys.com.ua/uk/chto-takoe-teplovoy-nasos-kakie-byvayut-teplovye-nasosy-i-princyp-ih-raboty..html
6. Електронний ресурс «Типи теплових насосів і джерела отримання тепла» https://teploradost.com.ua/ua/kakoj-teplovoj-nasos-luchshe
7. Thermal Conduction in Solids, R. Berman
8. Електронний ресурс «Теплопровідність у твердих тілах» https://intmax.com.ua/zastosuvannya/heat_conductivity_hard.html#:~:text=%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C%20%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D1%83%D1%94%20%D0%B7%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C%20%D1%82%D1%96%D0%BB%D0%B0%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B8,%D0%BC%D1%96%D0%B6%20%D0%BD%D0%B8%D0%BC%D0%B8%20%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%94%20%D1%80%D1%96%D

0%B7%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8F%20%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80.

9. Харківський національний педагогічний Університет імені Г.С.Сковороди «НЕОДНОРІДНІ КРАЙОВІ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ» Харків – 2013
10. Електронний ресурс «Analytical Method for Heat Conduction Problem with Internal Heat Source in Irregular Domains» https://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2013/173237
11. Електронний ресурс «Методи розв'язування задач теплопровідності» https://studbooks.net/2008267/matematika_himiya_fizika/metody_resheniya_zadach_teploprovodnosti
12. Франсіско Х. Куеста та Мануель Ламуа ,Інститут холоду (C. S. I. C.),Хосе Антоніо Новаїс, 10 Ciudad Universitaria 28040 Мадрид Іспанія
13. Cruz Rojas, A. Analytical Solutions Formulated in the Time Domain for Three-Dimensional Heat Diffusion Equation
14. A Boundary Meshless Method for Solving Heat Transfer Problems Using the Fourier Transform A. Tadeu , C. S. Chen, J. Antonio and Nuno Simoes
15. Applied Finite Element Analysis Larry J. Segerlind Associate Professor Department of Agricultural Engineering Michigan State University
16. Boundary elements an introductory course by_C.A Brebbia,J Dominguez
17. Електронний ресурс «Метод граничних элементів» https://studfile.net/preview/9445000/page:5/
18. A.A Becker The Boundary Element Method in Engineering A Complete
19. Електронний ресурс " Методи аналізу, моделювання та оптимізації процесів ОМТ " Частина 3 «Теоретичні методи розрахунку процесів ОМТ» https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/26/5-26-kl49.pdf
20. Електронний ресурс «SOLIDWORKS 2016: КОРОТКИЙ ОГЛЯД ПРОГРАМИ » https://3ddevice.com.ua/blog/3d-printer-obzory/obzor-programmy-solidworks/
21. SolidWorks 2010 Bible Publisher: Wiley, Year: 2010

22. SolidWorks 2007 Bible Publisher: Wiley, Year: 2007
23. Електронний ресурс «Solidworks SimulationXpress – що це таке і як встановити безкоштовно» https://autocad-lessons.com/uk/solidworks-simulationxpress-shcho-tse-take-i-iak-vstanovyty-bezkoshtovno/
24. ANSYS FLUENT 14.0 Getting Started Guide, Published in the U.S.A
25. ANSYS FLUENT Theory Guide, Published in the U.S.A.
26. Електронний ресурс «АДІНА ТЕРМАЛЬНИЙ» https://www.adina.com/adina-thermal.shtml
27. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach Jones and Bartlett's books and products Sudbury, MA 01776
28. COMSOL Multiphysics Installation Guide
29. «Нестаціонарний перенос теплоти в горизонтальному ґрунтовому теплообміннику» Басок Б. І., Давиденко Б.В., Божко І.К., Мороз М.В. Інститут технічної теплофізики НАН України,вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна