

### 3.1 Теоретичні відомості

У ядрі нашої планети максимальна температура досягає  $4000^{\circ}\text{C}$ . Вихід тепла через тверді породи суші і океанського дна відбувається головним чином за рахунок теплопровідності (геотермальне тепло) і рідше — у вигляді конвективних потоків розплавленої магми або гарячої води. Середній потік геотермального тепла через земну поверхню складає приблизно  $0,06 \text{ Вт/м}^2$  при температурному градієнті менш  $30^{\circ}\text{C/км}$ . Цей безперервний потік тепла зазвичай порівнюють з аналогічними величинами, пов'язаними з іншими поновлюваними джерелами і в середньому в сумі становлять  $500 \text{ Вт/м}^2$ . Проте є райони з підвищеними градієнтами температури, де потоки складають приблизно  $10\text{—}20 \text{ Вт/м}^2$ , що дозволяє реалізувати геотермальні станції (ГеоТЕС) тепловою потужністю  $100 \text{ МВт/км}^2$  і тривалістю експлуатації не менше 20 років.

Якість геотермальної енергії зазвичай невисока, і краще її використовувати безпосередньо для утеплення будівель і інших споруд або ж для попереднього підігрівання робочих тіл звичайних високотемпературних установок. Подібні опалювальні системи вже експлуатуються в багатьох частинах світу, значне число проєктів знаходиться у стадії опрацювання. Якщо трапляється, що тепло з надр отримують при температурі біля  $150^{\circ}\text{C}$ , то має сенс говорити про перетворення його в електроенергію. Перші потужні ГеоТЕС були запущені в Італії, Новій Зеландії та США.

Найпростіше використовувати тепло порід за допомогою теплових насосів. Хоча, строго кажучи, це також «геотермальне» джерело, але тут воно не розглядається.

Частину джерел геотермальної енергії можна віднести безпосередньо до поновлюваних джерел енергії, оскільки їх тепло так чи інакше розсіюється в докільці подібно до тепла гарячих ключів і гейзерів. У інших же джерелах потоки тепла доводиться збільшувати, штучно пробурюючи свердловини в природні накопичувачі гарячих вод, створюючи розриви і активізуючи охолодження гарячих гірських порід, і тому вони не можуть залишатися поновлюваними протягом довгого часу. Подібні системи обмеженого вживання розглядаються тут лише тому, що їх прийнято згадувати серед інших «альтернативних» джерел енергії. Правильніше вважати, що витягання і використання геотермальної енергії ближче за своєю суттю до спалювання викопного палива, ніж до перетворення розсіяної в докільці дійсно поновлюваної енергії.

### 3.1.1 Виникнення геотермальної теплоти

Температура ядра нашої планети близько  $6000^{\circ}\text{C}$ . Теплопередача від напіврідкої мантиї підтримує температурну різницю між зовнішньою і внутрішньою поверхнями порівняно тонкої кори біля  $1000^{\circ}\text{C}$  при середньому градієнті температур біля  $30^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Тверді породи, що складають кору, мають середню щільність  $2700\text{ кг}/\text{м}^3$ , теплоємність  $1000\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$  і теплопровідність  $2\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ .

Тому середній геотермальний потік і складає приблизно  $0,06\text{ Вт}/\text{м}^2$ , а приблизно  $10^{20}\text{ Дж}/\text{км}^2$  у вигляді тепла закумуляовано в корі. Якщо за 30 років перетворити лише  $0,1\%$  цього тепла, то теплова потужність, яку можна отримати, складе  $100\text{ МВт}/\text{км}^2$ . Ці оцінки дають уявлення про ресурси теплової енергії і показують, що геотермальне джерело володіє величезним потенціалом.

Земна кора отримує тепло в результаті: природного охолодження і тертя ядра; радіоактивного розпаду елементів, подібних до торія і урану; хімічних реакцій. Постійні часу цих процесів настільки великі по відношенню до часу існування Землі, що неможливо навіть оцінити, збільшується температура її або зменшується. Радіоактивні елементи концентруються в корі шляхом фракційної рекристалізації з розплавів, особливо багато їх в граніті. Протягом багатьох мільйонів років радіаційний

розпад і хімічні реакції є єдиним істотним джерелом тепла, а геотермальна енергетика передбачає виведення тепла, запасеного в теплових сховищах в товщі кори. Аномально високі температурні градієнти часто спостерігаються в місцях розташування радіоактивних або екзотермічних хімічних джерел. Земна кора складається з величезних платформ. Зонам кордонів платформ відповідає посилення теплової взаємодії кори з мантією, що супроводжується сейсмічною активністю, наявністю вулканів, гейзерів, фумарол і гарячих ключів. Потенціал геотермальної енергії цих районів дуже великий, їм відповідає збільшення температурних градієнтів до  $100^{\circ}\text{C}/\text{км}$  і активізації вивільнення води у вигляді пари або перегрітої рідини, що часто знаходяться під підвищеним тиском.

Через аномалії в структурі кори райони з помірним збільшенням температурних градієнтів (приблизно до  $50^{\circ}\text{C}$ ) зустрічаються і на достатньому віддаленні від меж платформ. У таких районах тепло може вивільнятися природним чином із-за проникнення води в зону підігрівання, що супроводжується інтенсивним конвективним теплообміном. В результаті виникають гарячі джерела з підвищеною концентрацією розчинених хімічних речовин, часто відомих як цілющі. Глибоко залягаючі зони підігрівання за допомогою буріння можуть стати джерелами тепла з температурою від 50 до  $200^{\circ}\text{C}$ . Якщо подібні аномалії пов'язані з матеріалами, що мають низьку теплопровідність, наприклад сухими скальними породами, то підвищення температурних градієнтів досягається за рахунок відносного збільшення запасеного в породах тепла.

Відомості про геотермальні структури отримують при геологічній зйомці, проходці шахт, нафтових свердловин. Найбільш важливим параметром є температурний градієнт. При глибокому бурінні свердловини зазвичай досягають відмітки 6 км., але технологія буріння залишається такою ж до глибини 15 км. Технологія здійснення таких свердловин сповна відпрацьована, так що стосовно будівництва ГеоТЕС ця проблема може вважатися вирішеною.

Прийнято виділяти три класи геотермальних районів.

*Гіпертермальний.* Температурний градієнт — більш  $80^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Ці райони розташовані в тектонічній зоні поблизу меж континентальних плит. Перший такий район був задіяний для виробництва електроенергії в 1904 р. поблизу Лардерелло (Тоскана, Італія). Майже всі з існуючих ГеоТЕС розміщено саме в таких районах.

*Напівтермальний.* Температурний градієнт — приблизно від 40 до  $80^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Подібні райони пов'язані головним чином з аномаліями, що лежать в стороні від меж платформ. Добування тепла здійснюється з природних водоносних пластів або з роздроблених сухих порід. Добре відомий приклад такого району знаходиться поблизу Парижа і використовується для обігріву будівель.

*Нормальний.* Температурний градієнт — менш  $40^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Такі райони найбільш поширені, саме тут теплові потоки в середньому складають приблизно  $0,06 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Маловірогідно, аби в таких районах навіть в

майбутньому стало економічно вигідно добувати тепло з надр.

У кожному з перерахованих класів в принципі можна отримувати тепло за рахунок: природної гідротермальної циркуляції, при якій вода проникає в глибоко залягаючі породи, де перетворюється на суху пару, пароводяну суміш або просто нагрівається до досить високої температури. Відповідні виходи спостерігаються в природних умовах. Якщо на глибині тиск зростає в результаті паротворення, то можуть виникнути ефектні гейзери, подібні тим, які можна побачити недалеко від Сакраменто в Каліфорнії (США), в районі Уайракея (Нова Зеландія), на Камчатці. Слід розуміти, проте, що ежектуються в цьому випадку саме гаряча вода, а не пара; штучного перегріву, пов'язаного з охолодженням напіврозплавленої магми, що застигає у вигляді лави. Першою ГеоТЕС, що використовує цей принцип, була станція потужністю 3 МВт, побудована на Гаваях в 1982р.; охолодження сухих скальних порід. Сухі скальні породи, що мають досить низьку теплопровідність (наприклад, граніт) протягом мільйонів років нагромаджували тепло. Створення штучних розривів в породах дозволяє прокачувати через них воду, відбираючи тепло.

На практиці ГеоТЕС в гіпертермальних районах працюють на природній гідротермальній циркуляції; у напівтермальних районах використовується як природна гідротермальна циркуляція, так і штучний перегрів за рахунок витягання тепла з сухих гірських порід. Нормальні ж райони мають дуже малі температурні градієнти, аби представляти комерційний інтерес.

### **3.1.2 Використання геотермальних ресурсів**

Геотермальну енергію отримують від джерел тепла з високими температурами і вона володіє деякими особливостями. Одна з них полягає в тому, що температура теплоносія істотно нижче за температуру при спалюванні палива. Не дивлячись на те, що сумарні запаси геотермальної енергії великі, її термодинамічна якість низька. Ці джерела мають багато загального з промисловими викидами тепла і тепловою енергією океану. Нижче коротко розглянута стратегія використання геотермальної енергії.

З геотермальними джерелами завжди зв'язують спроби виробітку електроенергії як найбільш коштовного продукту, тоді як найкращий спосіб утилізації теплової енергії — використання комбінованого режиму (і вироблення електроенергії і обігрів). Безумовно, електроенергія може бути подана в енергосистему і через неї передана споживачам разом з електроенергією, що виробляється іншими джерелами. В той же час не зайвим буде згадати, що потреба в теплі при температурі до 100°C зазвичай навіть вище, ніж в електроенергії. Таким чином, використання геотермальної енергії у вигляді тепла не менш важливо. Вироблення електроенергії, ймовірно, представлятиме інтерес, якщо теплоносії має температуру більш 300°C, і не буде, якщо остання нижче 150°C.

Тепло не так легко передавати на відстань більше 30 км., тому необхідно його використовувати поблизу місця видобутку. У зонах холодного клімату обігрів житла і промислових будівель створює відчутну потребу в теплі, якщо щільність населення складає більше 300 чоловік на 1 км<sup>2</sup> (більше 100 будинків на 1 км<sup>2</sup>). Таким чином, теплова станція потужністю 100 МВт може обслуговувати житловий район площею приблизно 20х20 км. при витраті тепла близько 2 кВт на приватний будинок. Подібна геотермальна система давно використовується в Ісландії і у меншій мірі — в Новій Зеландії. Інші крупні споживачі тепла — теплиці (до 60МВт/км<sup>2</sup> в одній установці для Північної Європи), ферми для розведення риби, установки для сушки харчових продуктів і для реалізації інших технологій.

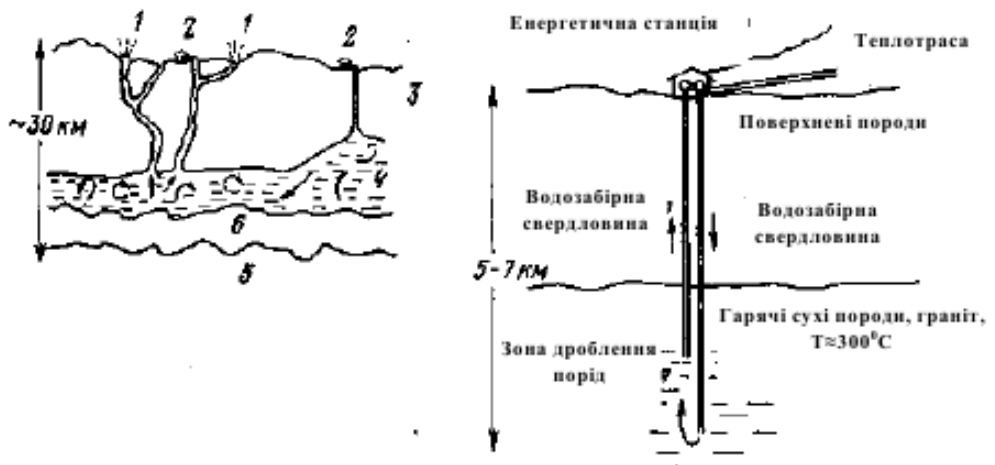
Масштаб використання геотермальної енергії визначають деякі чинники. Домінантою вартості виявляються капітальні витрати на спорудження свердловин, вартість яких експоненціально збільшується із зростанням їх глибини. Оскільки температура збільшується з глибиною, а вироблення енергії збільшується із зростанням температури, в більшості випадків обмежуються оптимальною глибиною свердловини приблизно 5 км. Як наслідок масштаб енергетичних установок зазвичай вибирають більше 100 МВт (електричних або теплових — для високих температур, лише теплових, — для низьких температур).

Загальну кількість тепла, витягнутого з геотермальної свердловини, можна збільшити за рахунок повторного закачування відпрацьованої і частково охолодженої води. Це зручний спосіб позбавитися від скидних вод, які можуть бути сильно мінералізованими (містити до 25 кг/м<sup>3</sup> солей) і є небезпечними забрудниками середовища. Проте це наводить до зростання вартості станцій.

Найбільш успішно реалізовані проекти мають свердловини, пробурені безпосередньо в природні підземні колектори геотермальних районів (рисунок 1). Цей метод використовується в Гейзерах (Каліфорнія) і в Уайракеє (Нова Зеландія), де в свердловинах існує значний тиск. Подібні методи використовуються для витягання енергії з водоносних шарів у високотермальних районах, де природного натиску вистачає, аби обійтися без насосних систем.

Останні розробки направлені на витягання тепла з сухих гірських порід, оскільки вони можуть забезпечити більшу продуктивність, ніж водні джерела. Лідуюча група фахівців (Лос-Аламосська наукова лабораторія, США) розробила методи дроблення скель гідророзривом за допомогою холодної води, що нагнітається під тиском в свердловину (рисунок 1).

Після попереднього дроблення порід вода нагнітається через живлячу свердловину, фільтрується через скальні породи на глибині близько 5 км. при температурі 250°C, тепла вода повертається на поверхню через приймальну свердловину. Дві такі свердловини можуть забезпечити енергією установку потужністю порядку гігавата.



а) Схема розміщення гідротермальних станцій в гіпертермальному районі, б) схема видобутку тепла з сухих гірських порід;

1 – природний гейзер; 2 – енергетична станція; 3 – глибока свердловина (5 км.); 4 – пароводяне джерело (~280°C); 5 – мантія; 6 – гарячі скальні породи.

Рисунок 1 – Схеми отримання тепла з надр Землі

Якщо для здобуття електроенергії використовуються джерела з низькою температурою, то для приведення в дію турбін доводиться замість води застосовувати інші робочі рідини (наприклад, фреон, толуол). Новий вид техніки потребує підвищення ефективності. Особливі труднощі можуть виникнути з теплообмінниками із-за високої концентрації у воді зі свердловин різних хімічних речовин.

Капітальні витрати на будівництво ГеоТЕС в даний час варіюється від 1500 до 2500 дол. на кіловат встановленої електричної потужності, що виявляється порівнянним з такими для АЕС і ТЕС.

## 3.2 Методика розрахунку

### 3.2.1 Сухі скальні породи

Припустимо, що певна маса сухого скального матеріалу розташована в товщі кори порівняно недалеко від поверхні (рисунок 3). Скальні породи мають щільність  $\rho_r$ , питому теплоємність  $c_r$ , площа поперечного перетину даного масиву  $A$ .



Рисунок 2 – Схема для розрахунку запасу тепла сухих гірських порід (щільність  $\rho_r$ , питома теплоємність  $c_r$ , температурний градієнт  $dT/dz=G$ ;  $A$  – площа;  $T_0$  – поверхнева температура;  $T_1$  – мінімальна корисна температура;  $T_2$  – температура на максимальній глибині)

Для однорідного матеріалу у відсутність конвекції з глибиною температура збільшуватиметься лінійно. Якщо  $z$  зростає по напрямку від поверхні Землі (де  $z = 0$ ), то

$$T = T_0 + \frac{dT}{dz} z = T_0 + Gz. \quad (1)$$

Припустимо, що мінімальна допустима температура  $T_1$  відповідає глибині  $z_1$ , таким чином:

$$T_1 = T_0 + Gz_1; \quad z_1 = (T_1 - T_0) / G. \quad (2)$$

Корисний тепловміст  $\delta E$  в елементі завтовшки  $\delta z$  на глибині  $z$  при температурі  $T > T_1$  рівний

$$\delta E = (\rho_r A \delta z) c_r (T - T_1) = (\rho_r A \delta z) c_r G (z - z_1). \quad (3)$$

Повний корисний тепловміст скального ґрунту до глибини виявляється рівним

$$E_\theta = \int_{z=z_1}^{z_2} \rho_r A c_r G (z - z_1) dz = \rho_r A c_r G \left[ \frac{z^2}{2} - z z_1 \right]_{z_1}^{z_2} = \rho_r A c_r G (z_2 - z_1)^2 / 2. \quad (4)$$

Хай середня допустима температура, що перевищує  $T_1$ , рівна  $\theta$ , причому



$$\theta = (T_2 - T_1) / 2 = G(z_2 - z_1) / 2. \quad (5)$$

В цьому випадку

$$E_\theta = C_r \theta,$$

де  $C_r$  – теплоємність гірських порід, що залягають в шарі між  $z_1$  і  $z_2$ :

$$C_r = \rho_r A c_r (z_2 - z_1). \quad (6)$$

Згідно (4)

$$E_\theta = \rho_r A c_r G (z_2 - z_1)^2 / 2. \quad (7)$$

Допустимо, що тепло витягується з порід рівномірно, пропорційно температурі, що перевищує  $T_1$ , за допомогою потоку води, що має об'ємну витрату  $V$ , щільність  $\rho_w$ , питому теплоємність  $c_w$ . У цьому безперервному процесі вода нагрівається до температури  $\theta$ . Таким чином,

$$\rho_w c_w \theta V = -C_r \frac{d\theta}{dt}, \quad (8)$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{V \rho_w c_w}{C_r} dt = \frac{dt}{\tau} \quad (9)$$

і

$$\theta = \theta_0 e^{-t/\tau}. \quad (10)$$

Пригадавши, що корисний тепловміст  $E = C_r \theta$ , отримаємо

$$E = E_0 e^{-t/\tau}. \quad (11)$$

Звідки швидкість видобування тепла

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{E_0}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad (12)$$

де постійна часу  $\tau$  визначається таким чином:

$$\tau = C_r / (V \rho_w c_w) = \rho_r A c_r (z_2 - z_1) / (V \rho_w c_w). \quad (13)$$

### Завдання для розрахунку сухих скальних порід

1) Розрахуйте корисний тепловміст на  $1 \text{ км}^2$  сухої скальної породи (граніт). Глибина  $z_2$  км, температурний градієнт  $G$ ,  $^\circ\text{C}/\text{км}$ , мінімальна допустиму температуру що перевищує поверхневу на  $(T_1 - T_0)$ ,  $^\circ\text{C}$  наведені у таблиці варіантів завдань А.1 додатку А. Щільність і питому теплоємність сухих гірських порід прийняти відповідно  $\rho_r = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c_r = 820 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

2) Чому дорівнює постійна часу видобування тепла при використанні як теплоносії води, якщо відома витрата води  $V \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (наведена у таблиці варіантів завдань А.1 додатку А)?

3) Які швидкості видобування тепла – на початку добування і через 10 років?

### Приклад рішення

#### Завдання

1) Розрахуйте корисний тепловміст на  $1 \text{ км}^2$  сухої скальної породи (граніт) до глибини  $z_2=7$  км. Температурний градієнт  $G=40^\circ\text{C}/\text{км}$ , мінімальну допустиму температуру що перевищує поверхневу  $(T_1 - T_0)=140 \text{ K}$ ,  $\rho_r = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c_r = 820 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

2) Чому дорівнює постійна часу видобування тепла при використанні як теплоносії води, якщо  $V=1 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ ?

3) Які швидкості видобування тепла  $dE/dt$  – на початку добування і через 10 років?

#### Рішення

1) Знаходимо різницю температур між глибиною  $z=7$  км ( $T_2$ ) і поверхнею ( $T_0$ ) з формули (2)

$$T_2 - T_0 = G \cdot z_2. \quad (14)$$

$$T_2 - T_0 = 40 \cdot 7 = 280 \text{ K}.$$

2) Глибину, на якій досягається мінімально допустима різниця температур  $T_1 - T_0$  знайдемо з формули (2)

$$z_1 = 140 / 40 = 3,5 \hat{e}i.$$

3) Виходячи з (7) корисний тепловміст на  $1 \text{ км}^2$  площі ґрунту  $E_0/A$ , знайдемо (підставляючи щільність ґрунту  $\rho_r$  у  $\text{кг}/\text{км}^3$ )

$$E_0/A = \rho_r c_r (z_2 - z_1)(T_2 - T_1)/2 \quad (15)$$

$$E_0/A = 2700 \cdot 10^9 \cdot 820(7 - 3,5)(280 - 140)/2 = 5,42 \cdot 10^{17} \text{ Дж} / \hat{e}i^2$$

4) Постійна часу видобування тепла з (13) (переводячи об'ємну витрату води  $V$  у  $\text{км}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$ ). Густина води  $\rho_w = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\tilde{h}_w = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

$$\tau / A = \frac{2700 \cdot 820 \cdot 3,5}{1 \cdot 10^{-9} \cdot 1000 \cdot 4200} / = 1,84 \cdot 10^9 \tilde{h} = 58,3 \delta^3 \hat{e}.$$

5) Швидкість видобування тепла знайдемо з (12). На початку видобування ( $t = 0$ )

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = \frac{E_0}{\tau} = \frac{E_0 / A}{\tau / A}, \quad (16)$$

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = (5,42 \cdot 10^{17}) / (1,84 \cdot 10^9) = 294 \cdot 10^6 = 294 \text{ МВт}/\text{км}^2$$

Через 10 років видобування

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=10 \text{ років}} = \frac{E_0}{\tau} e^{\tilde{p}(-10/58)}, \quad (17)$$

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=10 \text{ років}} = 294 \exp(-10/58) = 257 \text{ МВт}/\text{км}^2.$$

### 3.2.2 Природні водоносні пласти

В разі природних водоносних пластів, що залягають на значній глибині (рисунок 3), джерело тепла лежить усередині шару води. Частина пласта зайнята порами, заповненими водою (щільність  $\rho'$ ), решта простору заповнена скальною породою з щільністю  $\rho_r$ . Припустимо, що товщина водоносного шару ( $h$ ) багато менше глибини його залягання ( $z_2$ ) і що відповідно температура всієї маси рідини рівна  $T_2$ . Мінімальна корисна температура рівна  $T_1$ . Характеристики джерела тепла визначаються так, як це робилося для сухих скальних порід:

$$T_2 = T_0 + \frac{dT}{dz} z = T_0 + Gz, \quad (18)$$

$$E_0 / A = C_a (T_2 - T_1), \quad (19)$$

де

$$C_a = (\rho' \rho_w c_w + (1 - \rho') \rho_r c_r) \cdot h. \quad (20)$$

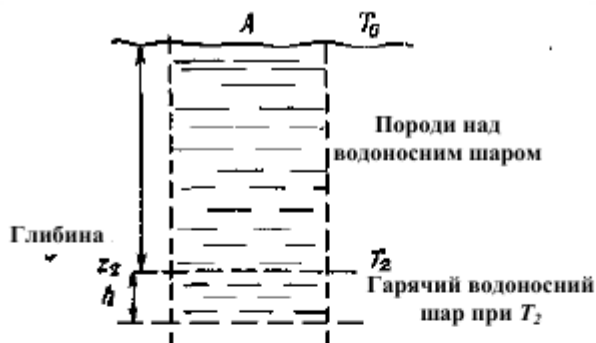


Рисунок 3 – Профіль гарячого водоносного шару для розрахунку запасу тепла

По аналогії з (8) визначимо відбір тепла при об'ємній швидкості (витраті)  $V$  і величині  $\theta$ , що перевищує  $T_1$

$$V \rho_w c_w \theta = -C_a \frac{d\theta}{dt}. \quad (21)$$

Таким чином

$$E = E_0 \exp(-t/\tau), \quad (22)$$

$$\frac{dE}{dt} = -(E_0/\tau) \exp(-t/\tau), \quad (23)$$

$$\tau/\lambda = C_a / (V \rho_w c_w) = [p' \rho_w c_w + (1-p') \rho_r c_r] h / (V \rho_w c_w). \quad (24)$$

### Завдання для розрахунку природних водоносних пластів

1) Визначите початкову температуру  $T_2$  і тепловміст  $C_a$  на  $1 \text{ км}^2$  до температур вище  $40^\circ\text{C}$  водоносного пласта завтовшки  $h$ , км при глибині залягання  $z$ , км, температурному градієнті  $G$ ,  $^\circ\text{C}/\text{км}$  (наведені у таблиці варіантів завдань Б.1 додатку Б). Прийняти пористість породи  $p'=5\%$ , щільність породи  $2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ , питома теплоємності породи  $840 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Розрахунок ведіть при середній температурі поверхні  $T_0 = 10^\circ\text{C}$ .

2) Яка постійна часу видобування тепла при закачуванні води і витраті її  $V$ ,  $\text{м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ ? (значення  $V$  наведене у таблиці варіантів завдань Б.1 додатку Б).

3) Яка теплова потужність видобувається спочатку і через 10 років?

## Приклад рішення

### Завдання

1) Визначите початкову температуру і тепловміст на  $1 \text{ км}^2$  до температур вище  $40^\circ\text{C}$  водоносного пласта завтовшки  $0,5 \text{ км}$  при глибині залягання  $3 \text{ км}$ , пористості  $5\%$ , щільність породи  $2700 \text{ кг/м}^3$ , питомій теплоємності  $840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ , температурному градієнті  $30^\circ\text{C/км}$ . Розрахунок ведіть при середній температурі поверхні  $10^\circ\text{C}$ .

2) Яка постійна часу видобування тепла при закачуванні води і витраті її  $V=0,1 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ ?

3) Яка теплова потужність видобувається спочатку і через 10 років?

### Рішення

1) Температура  $T_2$  на глибині  $z_2$  з (18)

$$T_2 = 10 + (30 \cdot 3) = 100^\circ\text{C}.$$

Якість енергії відповідає її використанню на ГеоТЕС або для обігріву житла.

2) З (20) знаходимо тепловміст ( $C_a$ ) геотермальної води на  $1 \text{ км}^2$  площі (підставляючи щільність ґрунту і густину води у  $\text{кг/км}^3$ )

$$\begin{aligned} C_a &= (0,05 \cdot 1000 \cdot 10^9 \cdot 4200 + (1 - 0,05) \cdot 2700 \cdot 10^9 \cdot 840) 0,5 = \\ &= 1,18 \cdot 10^{15} \text{ Дж} / (\text{K} \cdot \text{m}^2). \end{aligned}$$

3) Враховуючи (19) корисний тепловміст на  $1 \text{ км}^2$  площі ґрунту  $E_0 / A$

$$E_0 / A = 1,18 \cdot 10^{15} (100 - 40) = 0,71 \cdot 10^{17} \text{ Дж} / \text{m}^2.$$

4) За формулою (24) постійна часу видобування тепла

$$\tau / A = 1,18 \cdot 10^{15} / (0,1 \cdot 1000 \cdot 4200) = 2,8 \cdot 10^9 \text{ с} \approx 90 \text{ років}.$$

5) Згідно (23) теплова потужність на початку видобування

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = \frac{E_0}{\tau} = \frac{E_0 / A}{\tau / A}, \quad (25)$$

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = 0,71 \cdot 10^{17} / (2,8 \cdot 10^9) = 25 \cdot 10^6 \text{ Вт} / \text{m}^2 = 25 \text{ МВт} / \text{m}^2.$$

Перевірка:

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = V \rho_w c_w (T_2 - T_1) = 0,1 \cdot 1000 \cdot 4200 \cdot 60 = 25 \text{ МВт} / \text{m}^2.$$

6) Згідно (23) теплова потужність через 10 років видобування

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=10 \text{ років}} = 25 \exp(-10 / 90) = 22 \text{ МВт} / \text{m}^2.$$

## Питання для самооцінки:

- 1) Які з геотермальних джерел можна віднести до поновлюваних джерел енергії, а які – ні? Поясніть свою думку.
- 2) Яку температуру повинно мати геотермальне джерело для того щоб перетворювати цю енергію на електричну?
- 3) Які класи геотермальних районів Вам відомі? Охарактеризуйте кожний з них з точки зору придатності до використання для видобутку енергії.
- 4) Що таке природа гідротермальна циркуляція води? В яких геотермальних районах її можна використовувати?
- 5) Що таке комбінований режим використання геотермальної енергії і в чому його перевага?
- 6) Назвіть найбільш крупних споживачів геотермальної енергії?
- 7) Надайте схеми отримання теплоти з водоносних пластів і сухих гірських порід.
- 8) Які недоліки у геотермальних джерел енергії у порівнянні з іншими нетрадиційними і поновлюваними джерелами енергії?
- 9) Від яких величин залежить корисний тепловміст одиниці площі сухої скальної породи, що використовується як геотермальне джерело енергії?
- 10) Від яких величин залежить кількість геотермальної енергії водоносного пласта?