

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГІЯ. РОЗРАХУНОК ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК. ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ОКЕАНІВ

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи ГеоТЕС і технологіями перетворення теплової енергії океану (ПТЕО), а також з методикою їх розрахунку.

6.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Використання теплової енергії океану. Технологія перетворення теплової енергії океану (ПТЕО) дозволяє створювати електрику за рахунок різниці температур між теплою і холодною океанською водою. Холодна вода перекачується через трубу з глибини більше 1000 метрів (з місця, куди сонячні промені ніколи не потрапляють). Система також використовує і теплу воду з області, близької до поверхні океану. Нагріта сонячними променями вода проходить через теплообмінник з хімічними речовинами з низькою температурою кипіння, наприклад аміаком, що створює хімічну пару, що приводить в рух турбіни електрогенераторів. Потім пара конденсується назад в рідку форму за допомогою охолодженої води з глибин океану. Тропічні регіони вважаються найбільш вдалим місцем для розміщення систем ПТЕО. Це обумовлено більшою різницею температур між водою на мілководді і на глибині.

На відміну від вітрових і сонячних ферм, океанічна ТЕС може виробляти екологічно чисту електроенергію цілодобово, 365 днів на рік. Єдиним побічним продуктом таких енергоблоків є холодна вода, яка може використовуватися для охолодження і кондиціонування повітря в адміністративних і житлових будівлях поряд з енергогенеруючим об'єктом.

Використання геотермальної енергії. Геотермальна енергія – це енергія, що отримується з природного тепла Землі. Досягти цього тепла можна за допомогою свердловин. Геотермічний градієнт у свердловині зростає на 1 °С кожні 36 метрів. Це тепло доставляється на поверхню у вигляді пари або гарячої води. Таке тепло може використовуватися як безпосередньо для обігріву будинків і будівель, так і для виробництва електроенергії.

За різними підрахунками, температура в центрі Землі складає, мінімум, 6650 °С. Швидкість охолодження Землі приблизно дорівнює 300-350 °С в мільярд років. Земля виділяє $42 \cdot 10^{12}$ Вт тепла, з яких 2% поглинається в корі і 98% – в мантії і ядрі. Сучасні технології не дозволяють досягти тепла, яке виділяється занадто глибоко, але і $84 \cdot 10^{10}$ Вт (2%) доступної геотермальної енергії можуть забезпечити потреби людства на довгий час. Області навколо країв континентальних плит є найкращим місцем для будівництва геотермальних станцій, тому що кора в таких зонах набагато тонша.

Існує декілька способів отримання енергії на ГеоТЕС:

- *Пряма схема:* пара прямує по трубах в турбіни, сполучені з електрогенераторами;

- *Непряма схема*: аналогічна прямій схемі, але перед попаданням в труби пар очищають від газів, що викликають руйнування труб;
- *Змішана схема*: аналогічна прямій схемі, але після конденсації з води видаляють гази, що не розчинилися в ній.

6.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

6.2.1 Оцінка теплового потенціалу геотермальної енергії.

Визначити початкову температуру t_2 і кількість геотермальної енергії E_0 (Дж) водоносного пласта завтовшки h км при глибині залягання z км, якщо задані характеристики породи пласта: щільність $\rho_{zp}=2700$ кг/м³; пористість $\alpha=5\%$; питома теплоємність $C_{zp}=840$ Дж/(кг·К). Температурний градієнт (dT/dz) в °С/км вибрати по таблиці варіантів завдання.

Середню температуру поверхні t_0 прийняти рівною 10°С. Питома теплоємність води $C_в=4200$ Дж/(кг·К); щільність води $\rho=10^3$ кг/м³. Розрахунок робити по відношенню до площі поверхні $F=1$ км². Мінімально допустиму температуру пласта прийняти рівною $t_1=40$ °С.

Визначити також постійну часу вилучання теплової енергії τ_0 (років) при закачуванні води в пласт і витраті її $V=0,1$ м³/(с·км²). Яка буде теплова потужність, вилученої спочатку $(dE/dz)_{\tau=0}$ і через 10 років $(dE/dz)_{\tau=10}$?

Завдання присвячено тепловому потенціалу геотермальної енергії, зосередженої в природних водоносних горизонтах на глибині z (км) від земної поверхні. Зазвичай товщина водоносного шару h (км) менше глибини його залягання. Шар має пористу структуру – скельні породи мають пори, заповнені водою (пористість оцінюється коефіцієнтом α). Середня щільність твердих порід земної кори $\rho_{zp}=2700$ кг/м³, а коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{zp}=2$ Вт/(м·К). Зміна температури ґрунту у напрямку до земної поверхні характеризується температурним градієнтом (dT/dz), вимірюваним в °С/км або К/км.

Найбільш поширені на земній кулі райони з нормальним температурним градієнтом (менше 40 °С/км) з щільністю витікаючих у напрямі поверхні теплових потоків приблизно 0,06 Вт/м². Економічна доцільність отримання тепла з надр Землі тут маловірогідна.

У напівтермальних районах температурний градієнт дорівнює 40-80 °С/км. Тут доцільно використовувати тепло надр для опалювання, в теплицях, в бальнеології.

У гіпертермальних районах (поблизу меж платформ земної кори) градієнт більше 80 °С/км. Тут доцільно будувати ГеоТЕС.

При відомому температурному градієнті можна визначити температуру водоносного пласта перед початком його експлуатації:

$$T_2 = T_0 + (dT/dz)z \quad (6.1)$$

де T_0 – температура на поверхні Землі, К (або °С).

У розрахунковій практиці характеристики геотермальної енергетики зазвичай відносять до 1 км² поверхні F .

Теплоємність пласта C_{nl} (Дж/К) можна визначити згідно рівняння:

$$C_{nl} = hF[\alpha\rho_вC_в + (1-\alpha)\rho_{zp}C_{zp}], \quad (6.2)$$

де $\rho_в$ і $C_в$ – відповідно щільність і ізобарна питома теплоємність води;
 $\rho_{гр}$ і $C_{зр}$ – щільність і питома теплоємність ґрунту (порід пласта); зазвичай
 $\rho_{зр}=820-850$ Дж/(кг·К).

Якщо задати мінімально допустиму температуру, при якій можна використовувати теплову енергію пласта T_1 (К), то можна оцінити його тепловий потенціал на початок експлуатації (Дж):

$$E_0 = C_{нл}(T_2 - T_1) \quad (6.3)$$

Постійну часу пласта τ_0 (можливий час його використання, в роках) у разі відведення теплової енергії шляхом закачування в нього води з об'ємною витратою V (м³/с) можна визначити по рівнянню:

$$\tau_0 = C_{нл}/(V\rho_вC_в) \quad (6.4)$$

Вважають, що тепловий потенціал пласта під час його розробки змінюється за експоненціальним законом:

$$E = E_0 \exp(-\tau/\tau_0) \quad (6.5)$$

де τ – число років з початку експлуатації.

Теплова потужність геотермального пласта у момент часу τ (років з початку розробки) у Bm (MBm):

$$\left(\frac{dE}{d\tau}\right)_\tau = -\frac{E_0}{\tau_0} \exp(-\tau/\tau_0) \quad (6.6)$$

Для варіантів значення вихідних величин наведено у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні данні для розрахунку теплового потенціалу геотермальної енергії

Величини і одиниці їх виміри	Варіанти завдань									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h, км	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
z, км	2,5	3,0	3,5	4,0	3,5	3,0	2,5	4	3,5	3
(dT/dz) °C/км	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30

Розв'язання. Приймаємо наступні умови: водоносний пласт завтовшки $h=1$ км при глибині залягання $z=3$ км, якщо задані характеристики породи пласта: щільність $\rho_{зр}=2700$ кг/м³; пористість $a=5\%$; питома теплоємність $C_{зр}=840$ Дж/(кг·К). Температурний градієнт $(dT/dz)=60^\circ\text{C}/\text{км}$.

Середню температуру поверхні t_0 прийняти рівною 10°C . Питома теплоємність води $C_в=4200$ Дж/(кг·К); щільність води $\rho=10^3$ кг/м³. Розрахунок робити по відношенню до площі поверхні $F=1$ км². Мінімально допустиму температуру пласта прийняти рівною $t_1=40^\circ\text{C}$.

Визначити також постійну часу вилучення теплової енергії τ_0 (років) при закачуванні води в пласт і витраті її $V=0,1$ м³/(с·км²). Яка буде теплова потужність, вилученої спочатку $(dE/dz)_{\tau=0}$ і через 10 років $(dE/dz)_{\tau=10}$?

1. Температура водоносного пласта перед початком його експлуатації:

$$T_2 = T_0 + (dT/dz)_z = 10 + 60 \cdot 3 = 190 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Теплоємність пласта C_{nl} можна визначити за рівнянням:

$$C_{nl} = hF [\alpha \rho_s C_s + (1 - \alpha) \rho_{zp} C_{zp}] = \\ = 1 \cdot 1 \cdot 10^9 (0,05 \cdot 10^3 \cdot 4200 + 0,95 \cdot 2700 \cdot 840) = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ Дж/К,}$$

3. Тепловий потенціал на початок експлуатації:

$$E_0 = C_{nl} (T_2 - T_1) = 2,4 \cdot 10^{15} \cdot (190 - 40) = 360 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$$

4. Постійну часу пласта τ_0 :

$$\tau_0 = C_{nl} / (V \rho_s C_s) = \frac{2,4 \cdot 10^{15}}{(0,1 \cdot 10^3 \cdot 4200)} = 5,7 \cdot 10^9 \text{ с або 181 рік}$$

5. Теплова потужність геотермального пласта у момент часу τ (років з початку розробки) у Вт (МВт):

$$\left(\frac{dE}{d\tau} \right)_\tau = - \frac{E_0}{\tau_0} \exp(-\tau/\tau_0)$$

При $\tau=0$

$$\left(\frac{dE}{d\tau} \right)_0 = - \frac{E_0}{\tau_0} \exp(-\tau/\tau_0) = \frac{360 \cdot 10^{15}}{5,7 \cdot 10^9} \exp(-0/181) \approx 63 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

При $\tau=10$

$$\left(\frac{dE}{d\tau} \right)_0 = - \frac{E_0}{\tau_0} \exp(-\tau/\tau_0) = \frac{360 \cdot 10^{15}}{5,7 \cdot 10^9} \exp(-10/181) \approx 57,3 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

6.2.2. Розрахунок використання перепаду температур поверхневих і глибинних вод океану для отримання електроенергії на ОТЕС.

Вважається, що дійсний ККД η океанічної ТЕС, що використовує температурний перепад поверхневих і глибинних вод $(T_1 - T_2) = \Delta T$ і що працює по циклу Ренкіна, удвічі менше термічного ККД установки, що працює по циклу Карно, η_{tk} . Оцінити можливу величину дійсного ККД ОТЕС, робочим тілом якої є аміак, якщо температура води на поверхні океану t_1 , $^\circ\text{C}$, а температура води на глибині океану t_2 , $^\circ\text{C}$. Яка витрата теплої води V , м/год буде потрібно для ОТЕС потужністю N МВт?

Вважати, що щільність води $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, а питома масова теплоємність $C_p = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Завдання присвячено перспективам використання перепаду температур поверхневих і глибинних вод океану для отримання електроенергії на ОТЕС, що працює по відомому циклу Ренкіна. Як робоче тіло передбачається використання легкокіплячих речовин (аміак, фреон). Внаслідок невеликих перепадів температур ($\Delta T = 15 \div 26 \text{ } ^\circ\text{C}$) термічний ККД установки, що працює по циклу Карно, складає всього 5-9%. Реальний ККД установки, що працює по циклу Ренкіна, буде удвічі менше. В результаті для отримання частки відносно невеликих потужностей на ОТЕС вимагаються великі витрати «теплої» і

«холодної» води і, отже, величезні діаметри трубопроводів, що підводять і відводять воду.

Якщо вважати теплообмінники (випарник і конденсатор) ідеальними, то теплову потужність, отриману від теплої води Q_0 (Вт) можна представити як:

$$Q_0 = \rho V C_p \Delta T \quad (6.7)$$

де ρ – щільність морської води, кг/м³;

C_p – масова теплоємність морської води, Дж/(кг·К);

V – об'ємна витрата води, м³/с ;

$\Delta T = T_1 - T_2$ – різниця температур поверхневих і глибинних вод (температурний перепад циклу) в °С або К.

У ідеальному теоретичному циклі Карно механічна потужність N_0 (Вт) може бути визначена як:

$$N_0 = \eta_{tk} Q_0, \quad (6.8)$$

де η_{tk} – термічний ККД циклу Карно: $\eta_{tk} = (T_1 - T_2)/T_2$.

Для варіантів значення вихідних величин наведено у табл.6.2.

Таблиця 6.2 – Вихідні данні для розрахунку використання перепаду температур поверхневих і глибинних вод океану

Величини і одиниці їх виміри	Варіанти завдань									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N , МВт	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
t_1 , °С	30	30	28	28	26	26	24	23	21	20
t_2 , °С	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5

Розв'язання. Приймаємо наступні умови: Вважається, що дійсний ККД η океанічної ТЕС, що використовує температурний перепад поверхневих і глибинних вод $(T_1 - T_2) = \Delta T$ і що працює по циклу Ренкіна, удвічі менше термічного ККД установки, що працює по циклу Карно, η_{tk} . Оцінити можливу величину дійсного ККД ОТЕС, робочим тілом якої є аміак, якщо температура води на поверхні океану $t_1 = 30$ °С, а температура води на глибині океану $t_2 = 5$ °С. Яка витрата теплої води V , м/год буде потрібно для ОТЕС потужністю $N = 5$ МВт?

Вважати, що щільність води $\rho = 10^3$ кг/м³, а питома масова теплоємність $C_p = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

1. Термічний ККД циклу Карно:

$$\eta_{tk} = (T_1 - T_2)/T_2 = \frac{(30 - 5)}{5} = 5$$

2. Теплова потужність:

$$Q_0 = \frac{N}{\eta_{tk}} = \frac{5}{5} = 1 \text{ МВт}$$

3. Об'ємна витрата води:

$$V = \frac{Q_0}{\rho C_p \Delta T} = \frac{10^6}{10^3 \cdot 4,2 \cdot 10^3 (30 - 5)} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Питання для самоконтролю

1. Принцип дії систем ПТЕО.
2. Що таке геотермальна енергія.
3. Основні способи отримання енергії ГеоТЕС.
4. Принцип отримання енергії на океанічних ТЕС.
5. Що таке цикл Ренкіна та цикл Карно?
6. Яке робоче тіло використовується в ОТЕС?