

В.М. Карпенко, В.М. Стасенко, О.В. Карпенко

ГЕОТЕРМАЛЬНІ РЕСУРСИ УКРАЇНИ

Розглянуто геотермальні ресурси України та наведено їх нову оцінку на основі досвіду буріння та геофізичного дослідження глибоких свердловин на нафту і газ. Нові значення геотермальних ресурсів значно перевищили відомі, що розкрило широку перспективу їх освоєння найближчим часом з використанням геотермальних енергетичних установок типу “труба в трубі”, які не потребують паливних ресурсів, не виробляють шкідливих викидів у навколишнє середовище і здатні забезпечити всі сфери діяльності суспільства України власною тепловою і електричною енергією у достатній кількості.

Ключові слова: геотермальний фактор, геотермальні ресурси, геотермальна енергетична установка.

Вступ. Під час геофізичних досліджень глибоких свердловин на нафту і газ у різних куточках світу, зокрема в Україні, виявлено геотермальний фактор – зростання температури геологічного середовища (ГС) за глибиною свердловини, що визначається температурними градієнтами на рівні 0,02–0,05 °С/м. На глибинах понад 3000 м температура ГС перевищує 100 °С. Так, у св. 10 Сентянівської площі буровий розчин (б/р) виходив з глибини 4200 м у кількості 22 л/с за температури 51 °С під час буріння та 48 °С – в процесі промивання свердловини. На вибої в статичному режимі температура розчину сягала понад 140 °С.

На постійну дію геотермального фактора вказує той факт, що під час буріння свердловин одним долотом тривалий час (~700 год) б/р циркулює у свердловині з продуктивністю 40–20 л/с і виходить на поверхню зі сталою температурою, яка збільшується із заглибленням свердловини.

Проблема. Геотермальний фактор є негативним для технологій буріння глибоких і надглибоких свердловин, оскільки складні фізико-хімічні системи бурових розчинів не витримують тривалої його дії і втрачають свої властивості щодо запобігання ускладненням і аваріям. Послабити дію геотермального фактора на технологічні процеси неможливо. Тому технологія видобутку газу із глибоких горизонтів в Україні стає надалі складнішою і дорогою.

Зазначимо, що обсяг газу, який видобувають в Україні та імпортують, забезпечує суспільство тепловою і електричною енергією не повною мірою.

На цей час для отримання теплової енергії домінує технологія спалювання природних ресурсів: нафти, газу, конденсату, вугілля, торфу, деревини, рослинної і біологічної маси. Так, житлово-комунальне господарство України споживає 70 млн т усіх видів умовного палива (ум. п.), що становить близько 30 % загального споживання палива в Україні [10]. Разом із сільським господарством споживання умовного палива становить приблизно 100 млн т. Технології спалювання теплотворних природних ресурсів створили екологічну небезпе-

ку для існування самого суспільства, перед яким встала вимога: найближчим часом скоротити (відмовитися) існуючі технології спалювання природних ресурсів для отримання теплової та електричної енергії, оскільки вони спричиняють забруднення навколишнього середовища шкідливими викидами та утворення парникового ефекту. Останній зумовлює дестабілізацію клімату на планеті, підвищення рівня ґрунтових вод і рівня океанів внаслідок танення льодовиків, змінення теплових потоків океанських течій, перерозподіл маси талої води, що призводить до зміни перенапружень у літосфері і, як наслідок, до землетрусів, цунамі тощо. Тому 70 країн світу активно розвивають один з найперспективніших напрямів – освоєння власних геотермальних ресурсів. Цей напрям дає змогу отримувати автономну теплову та електричну енергію у достатній кількості й без забруднення довкілля.

Розв’язання існуючої проблеми. В Україні зазначений напрям існує на рівні дослідного виробництва [1, 2]. Так, в АР Крим, у селах Медведівка і Янтарна, побудовано кілька теплових пунктів на геотермальних свердловинах завглибшки 1900 м. Тепловий пункт біля с. Янтарне має такі характеристики: дебіт геотермальної свердловини – 65 м³/год, температура води – 85 °С, її тиск – 1,2 МПа, тепла потужність – 3 МВт. Використання геотермального тепла у с. Янтарне дає змогу опалювати 2 га теплиць і заощаджувати за сезон 1200 тис. м³ газу або 864 т дизельного палива.

Ідея використання геотермальних ресурсів з пробурених нафтових і газових свердловин для задоволення потреб суспільства у тепловій енергії висловлена в роботі [12], але наведена авторами модель не дає змоги визначити реальну кількість теплової енергії, яку можна отримати з однієї свердловини.

Для моделювання теплофізичних процесів у свердловинах використовують рівняння теплопровідності Фур’є без теплового джерела, які передбачають знання теплофізичних параметрів ГС, що є невідомими [5]. Крім того, враховуючи низьку

теплопровідність гірських порід [5–7, 9] неможливо пояснити значні теплові потоки, що встигають нагріти і не встигають охолодити буровий розчин у кількості близько 250 т за 1,5–2 год його циркуляції у свердловині.

Мета статті – оцінка геотермальних ресурсів України на основі експериментальних даних щодо теплофізичних параметрів ГС у процесі буріння і геофізичного дослідження глибоких і надглибоких свердловин на нафту і газ.

Запропоноване розв’язання проблеми. На підставі аналізу робіт [1, 2, 5–7, 9, 11, 12] розроблено енергетичну модель геотермального фактора (ЕМГФ), яка визначає параметри сталих теплообмінних потоків у глибоких свердловинах, з огляду на технологічні параметри процесу буріння. За цією моделлю можна дати загальну оцінку геотермальним ресурсам, зокрема в Україні, освоєння яких розв’яже проблему власної енергетичної та екологічної безпеки.

Розглянемо існуючі оцінки геотермальних ресурсів України [6]: “*Теплова енергія Землі* є геоенергетичним ресурсом. Геоенергетичні ресурси України на проектних глибинах характеризують теплофізичні параметри Землі, а саме температури і густини теплового потоку (ГТП), що наведені на рис. 1. На підставі даних про ГТП побудовано карту густини геоенергетичних ресурсів у тоннах умовного палива на один квадратний метр, які можуть бути видобуті водіяною геоциркуляційною системою з температурою носія не нижче ніж 60 °С та його поверненням у надра з $T \sim 20$ °С. Загальні геоенергетичні ресурси України (визначені на даний час) приблизно в 20 разів перевищують усі запаси горючих копалин на її території. На деяких площах вони досягають 10 т у. п./кв. м (у. п. – умовне паливо), що перевищує запаси енергії, які можуть бути видобуті з великого родовища нафти чи газу...”

Наведену оцінку геотермальних ресурсів визначено таким методом [6]: “Густина теплового потоку – це кількість тепла, що виноситься з надр

на поверхню за одиницю часу на одиницю площі. Вона вимірюється у мВт/м² і визначається за законом Фур’є [7, 9, 11], як результат множення геотермічного градієнта в певному інтервалі глибин на теплопровідність порід цього інтервалу. На території України густина теплового потоку змінюється від 25–30 мВт/м² до 100–110 мВт/м². Температури на глибині 1 км змінюються від 20 до 70 °С, а на глибині 3 км – від 40 до 135 °С. Розподіл теплових потоків тісно пов’язаний з особливостями геологічного розвитку регіонів та їх тектонікою. ГТП визначається як спостережений тепловий потік, відкоригований з урахуванням численних близькоповерхневих впливів: палеоклімату, руху підземних вод із вертикальною складовою, геологічних структур, що зумовлюють негоризонтальне залягання поверхонь поділу порід із різною теплопровідністю, молодих насувів, накопичення молодих осадових відкладів тощо. Карта ГТП на рис. 1, б показує розподіл його фонових (35–50 мВт/м²) і аномальних ($\eta_{\phi} = 60 \div 130$ мВт/м²) величин на території України...”

В роботі [11] наведено тепловий баланс Землі за даними середніх річних значень теплових потоків. Так, тепловий баланс Землі складається з короткохвильової радіації (КХР: 0,1–4 мкм), що надходить на поверхню атмосфери від Сонця на рівні $\eta_c = 336$ Вт/м², частина якої відбивається у космічний простір на рівні $\eta_{c-k} = 100$ Вт/м², в кількості $\eta_{c-z} = 157$ Вт/м² поглинається землею поверхнею і в кількості $\eta_{c-a} = 79$ Вт/м² – атмосферою, а також з довгохвильової радіації (ДХР: 3–45 мкм), що випромінюється поверхнею Землі на рівні $j_3 = 392$ Вт/м². Інакше кажучи, поверхня Землі випромінює власне тепло на рівні $j_{30} = 235$ Вт/м². Оскільки тепловий потік ДХР від Землі у космічний простір дорівнює 235 Вт/м², сумарний тепловий баланс Землі характеризується термодинамічною рівновагою між припливом зовнішнього тепла і випромінюванням власного тепла, будучи у космічному просторі, тобто Земля є джерелом теплової енергії. Тоді визначений теп-

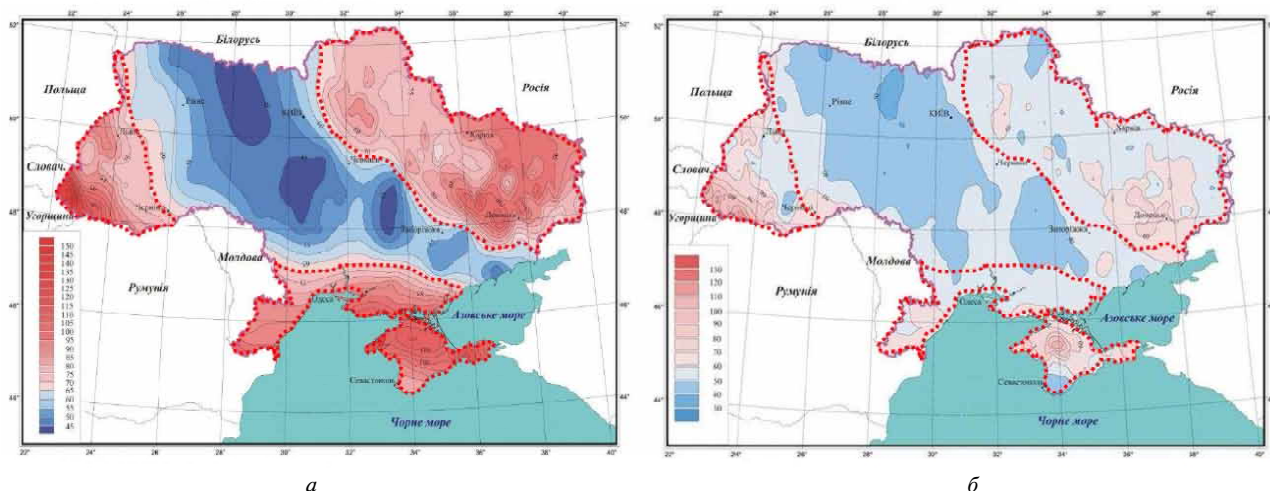


Рис. 1. Карти розподілу температур (а) і густини теплового потоку (б) гірських порід на глибині 3000 м в Україні [6]

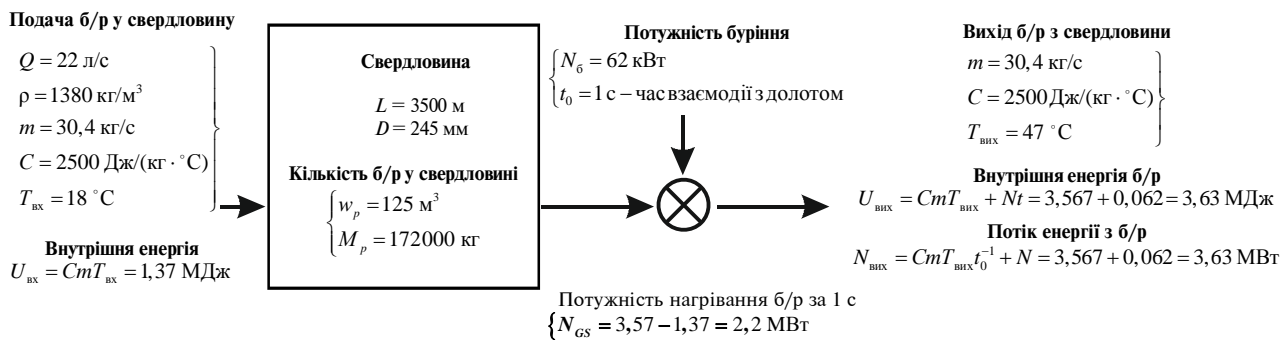


Рис. 2. Модель сталій дії геотермального фактора на буровий розчин (б/р) під час промивання (буріння) св. Сентянівська-10 на глибині 3500 м

ловий потік j_{30} має бути і на глибинах 3000 м, але його значення на цих глибинах (рис. 1), менші за наведене значення. Виникає питання про походження температур на вказаних глибинах.

Розглянемо досвід буріння глибоких свердловин на нафту і газ, який свідчить про інші значення теплових потоків у гірському масиві на великих глибинах у сталому режимі буріння і промивання свердловин.

На практиці відбувається фізичний процес, схема якого показана на рис. 2, а характеристика його параметрів наведена в табл. 1.

За цими параметрами можна наближено оцінити густину теплового потоку, що крізь стінки труб обсадної колони (ОК) і бурильної колони (БК) нагріває б/р масою 30,4 кг від 18 до 49 °С, та загальну потужність теплового потоку, що нагріває весь б/р у свердловині масою 172 000 кг. Так, загальна теплова потужність з боку ГС, що нагріває б/р масою 30,4 кг за час 5675 с його руху у свердловині, дорівнює

$$\bar{N}_{GS} = (U_{\text{вих}} - U_{\text{вх}}) / (t_1 + t_2) = 387,8 \text{ Вт},$$

а тепловий потік становить $\eta_{GS} = \bar{N}_{GS} / s_1 = 560 \text{ Вт/м}^2$, що в 2,4 раза більше j_{30} .

Для об'єктивного визначення густини теплового потоку у глибоких свердловинах розглянемо ЕМГФ у вигляді

$$\begin{cases} U_{\text{в}}(L) = U_{\text{вх}} + \Delta U_2(L) \\ U_{\text{вих}} = U_{\text{в}}(L) + \Delta U_1(L) \\ U_{g_0}(L) = (U_{\text{вих}} - U_{\text{вх}}) + \Delta U'_2(L) + \Delta U'_1(L) \\ N_0(L) = n_g(L) s_1 = \eta_1(L) s_1 = \eta_2(L) s_2 \\ N_g(L) = n_g(L) S_{\text{от}}, \end{cases} \quad (1)$$

де *перше* рівняння моделює нагрівання б/р масою m , що рухається від устя до вибою у бурильній трубі (БТ); *друге* – нагрівання б/р масою m , що рухається від вибою до устя в обсадній трубі (ОТ); *третє* рівняння моделює теплову енергію ГС, що складається з енергії, яка

подається на земну поверхню, теплової енергії у просторі ОТ і БТ свердловини заданої конструкції; *четверте* рівняння моделює потужність частки теплового потоку, що генерує ГС до свердловини, зокрема до б/р масою m у просторі ОК і БК; *п'яте* рівняння – загальна потужність теплової енергії, що генерує ГС у свердловині заданої глибини; відповідно $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вих}}$ – початкова та кінцева внутрішня енергія енергоносія масою m , кг/с; $U_{\text{в}}(L) = CmT_m$ – внутрішня теплова енергія б/р на вибої, Дж; T_m – температура б/р на вибої, Дж; $U_{g_0}(L) = \eta_g(L) [t_1(L) + t_2(L)] s_1$ – теплова енергія, віддана ГС у простір свердловини для нагрівання б/р масою m у просторах труб ОК і БК, Дж, (прийнято $\eta_g(L) = \eta_g = \eta_1 = \eta_2 = \text{const}$ – стабільні у часі середні значення густини теплових потоків, що змінюються на кожен метр глибини свердловини, запис (L) опущено); $N_g(L) = U_g(L) / t_0$ – загальна потужність передачі теплової енергії від ГС до всього простору свердловини крізь всю поверхню ОТ за 1 с, Вт; $N_0(L) = U_{g_0}(L) / t_0$ – зосереджена потужність теплової енергії від ГС до простору свердловини, що поглинається б/р масою m у процесі контакту з поверхнею ОТ s_1 за

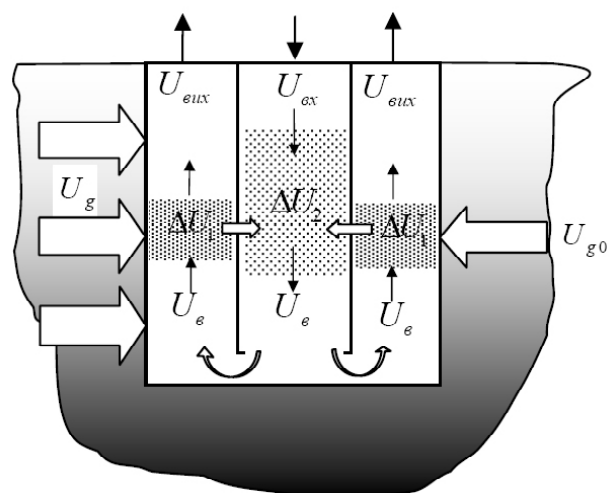


Рис. 3. Енергоінформаційна модель геотермального фактора у свердловині

Таблиця 1. Характеристика параметрів промивання (буріння) св. Сентянівська-10

Параметр	Позначення, значення і міра параметра
Подача б/р буровим насосом	$Q = 22$ л/с
Густина б/р	$\rho = 1380$ кг/м ³
Подача маси б/р за 1 с	$m = 30,4$ кг/с
Теплоємність б/р	$C = 2500$ Дж/(кг·°С)
Температура б/р на вході у свердловину	$T_{вх} = 18$ °С
Об'єм б/р у свердловині	$w_p = 125$ м ³
Маса б/р у свердловині	$M_p = 172\ 000$ кг
Температура б/р на виході із свердловини (промивка)	$T_{вих} = 47$ °С
Температура б/р на виході із свердловини (буріння)	$T'_{вих} = 49$ °С
Потужність роторного буріння	$N_6 = 62$ кВт
Діаметр труб бурильної колони (ОК) (зовнішній)	$D_{от} = 0,245$ мм
Діаметр труб бурильної колони (ОК) (внутрішній)	$d_{от} = 0,225$ мм
Діаметр труб бурильної колони (БК) (зовнішній)	$D_{6т} = 0,140$ мм
Діаметр труб бурильної колони (БК) (внутрішній)	$d_{6т} = 0,120$ мм
Швидкість руху б/р у просторі труб БК	$V_{6т} = 1,945$ м/с
Швидкість руху б/р у міжтрубному просторі ОТ і БТ	$V_{от} = 0,903$ м/с
Довжина БК, що займає б/р масою 30,4 кг	$l_{6т} = 1,945$ м
Довжина ОК, що займає б/р масою 30,4 кг	$l_{от} = 0,903$ м
Площа теплообмінну в БК для б/р масою 30,4 кг	$s_2 = 0,973$ м ²
Площа теплообмінну в ОК для б/р масою 30,4 кг	$s_1 = 0,695$ м ²
Глибина вибою свердловини, де виконані спостереження	$L = 3500$ м
Час руху б/р у просторі БК – t_2 ($L=3500$ м)	$t_2 = 1799$ с
Час руху б/р у просторі ОК – t_1 ($L=3500$ м)	$t_1 = 3876$ с
Температурний градієнт ГС	$\alpha_g = \text{grad}(T_g) = 0,04$ °С/м
Потужність продуктивності бурового насоса	$N_H = 180$ кВт
Тиск на викиді насоса під час буріння	$P_H = 9$ МПа
Час взаємодії б/р масою 30,4 кг з долотом	$t_0 = 1$ с
Загальна площа внутрішніх стінок БТ	$S_{6т} = 1320$ м ²
Загальна площа внутрішніх стінок ОТ	$S_{от} = 2474$ м ²
Внутрішня енергія б/р масою 30,4 кг на вході у свердловину	$U_{вх} = 1,37$ МДж
Внутрішня енергія б/р масою 30,4 кг на виході із свердловини	$U_{вих} = 3,57$ МДж

одну секунду, Вт; $\Delta U_2(L) = \eta_2 t_2(L) s_2$ – енергія нагрівання б/р масою m у просторі БТ, Дж; $\Delta U_1(L) = \Delta U'_1(L) + \Delta U'_2(L) = \eta_1 t_1(L) s_1 + \eta_2 t_2(L) s_2$ – загальна енергія нагрівання б/р масою m у просторі ОТ, що складається з енергії $\Delta U'_1(L)$ нагрівання б/р і переданої теплової енергії $\Delta U'_2(L)$ до БТ відповідно (прийнято, що товщини стінок БТ і ОТ дорівнюють нулю), Дж; $n_g = \eta_1, \eta_2$ – густини теплових потоків ГС, стінок ОТ і БТ відповідно, Вт/м².

Із системи рівнянь (1) визначимо середні параметри $n_g, N_g = n_g S_{от}$.

Введемо позначення:

$$\begin{cases} U_{вх}(L) = y, U_{вх} = a, U_{вих} = b \\ U_{г0} = \left\{ \begin{array}{l} \eta_g = x_1 \\ [t_1(L) + t_2(L)] s_1 = C_0 \end{array} \right\} = \\ \\ \Delta U_2 = \left\{ \begin{array}{l} \eta_2 = x_2 \\ t_2(L) s_2 = C_2 \end{array} \right\} = x_2 C_2 \\ \\ \Delta U_1 = \left\{ \begin{array}{l} \eta_1 = x_1 \\ t_1(L) s_1 = C_1 \\ t_1(L) s_2 = C_3 \end{array} \right\} = x_1 C_1 + x_2 C_3, \end{cases}$$

де a, b – задані параметри початкових і граничних умов енергетичного стану енергоносія; C_0, C_1, C_2, C_3 – задані константи, що визначаються за даними t_1, t_2, s_1, s_2 (табл. 1), які враховують глибину і конструкцію свердловини, продуктивність бурового насоса.

Систему рівнянь (1) перепишемо у вигляді

$$\begin{cases} y = a + x_2 C_2 \\ b = y + x_1 C_1 + x_2 C_3 \\ x_1 C_0 = (b - a) + x_1 C_1 + x_2 C_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_2 (C_2 + C_3) = (b - a) - x_1 C_1 \\ x_1 = \frac{(b - a)}{C_0 - C_1} + x_2 \frac{C_3}{C_0 - C_1} \end{cases} \quad (1.1)$$

Із системи рівнянь (1.1) визначаємо шукані параметри:

$$\begin{cases} x_1 = (b - a) \frac{(C_2 + 2C_3)}{C_2 C_0 + C_3 C_0 - C_2 C_1} \\ N_g = (b - a) \frac{(C_2 + 2C_3)}{C_2 C_0 + C_3 C_0 - C_2 C_1} S_{от} \end{cases} \quad (1.2)$$

або

$$\begin{aligned} n_g &= (U_{вих} - U_{вх}) \frac{(2t_1 + t_2)}{s_1 (t_1^2 - t_2 t_1 + t_2^2)}, \\ N_g &= (U_{вих} - U_{вх}) \frac{(2t_1 + t_2)}{s_1 (t_1^2 - t_2 t_1 + t_2^2)} S_{от}. \end{aligned} \quad (2)$$

За даними табл. 1 знаходимо значення шуканих параметрів:

$$\begin{aligned} n_g &= (3,57 - 1,37) \times \\ &\times \frac{(2 \cdot 3876 + 1799)}{0,695(3876^2 - 3876 \cdot 1799 + 1799^2)} \cdot 10^6 = 2680 \text{ Вт/м}^2; \\ N_g &= 2680 \cdot 2474 = 6,63 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Теплова енергія ГС в 3,57 МВт виходить на устя, 3,06 МВт – циркулює у свердловині крізь стінки БТ між потоками б/р, що течуть униз і вгору.

Розроблена ЕМГФ (1) надає розв'язок (2) з оцінки головного параметра геотермального фактора – генерації теплової енергії ГС. ЕМГФ не розглядає окремо такі теплофізичні параметри, як температуру, теплоємність, теплопровідність, тепловіддачу б/р і гірських порід, конструкцію свердловини. Всі характеристики теплообміну між простором бурильних труб і міжколонним простором, швидкостями передачі тепла гірськими породами та його акумуляції енергоносієм (б/р) враховують у поточних теплофізичних параметрах б/р, які контролюють на поверхні в його граничних енергетичних станах на вході і виході із свердловини і

які невідомим чином змінюються у просторі (ОК і БТ) та часі у зв'язку з рухом б/р масою m .

Інший приклад оцінки густини теплового потоку крізь стінки БК наведено за даними спеціальних геотермальних досліджень, які проведені у св. Карадаг-189 [5] (табл. 2, 3).

Максимальну густину теплового потоку від гірських порід, що нагріває б/р масою m крізь стінки БК, визначають за формулою

$$n_p = \frac{\Delta U_{БК}}{t_{БК} \cdot S_{БК}} = c_p \rho_p \frac{d_{БК}}{4} \cdot \Delta T_{БК} \frac{V_{БК}}{L_m}, \quad (3)$$

де $\Delta U_{БК} = mc_p \Delta T_{БК}$ – отримана тепла енергія б/р масою m у БТ, Дж; $\Delta T_{БК} = T_{БК} - T_{вх}$ – температура нагрівання б/р масою $m = \rho_p w = \rho_p \frac{\pi d^2}{4} V t_0$, що рухається від устя до вибою під час промивання свердловини, °С; $w = 0,02$ – продуктивність бурового насоса, м³/с; $t_{БК} = L_m / V_{БК} = 3765 / 1,77 = 2127$ – час руху (нагрівання) б/р у БТ, с; $S_{БК} = \pi d_{БК} V_{БК} t_0$ – площа внутрішніх стінок БТ, що контактує з б/р масою m , м²;

$$n_p = 2190 \cdot 1500 \frac{0,12}{4} \frac{70 - 18}{3765} 1,77 = 2,41 \text{ кВт/м}^2,$$

що збігається із значенням густини теплового потоку у св. Сентянівської-10, визначеною за формулою (2).

Для середнього значення температури 0,5 ΔT щільність $\langle n_p \rangle = 1,2$ кВт/м², а за визначенням [5], густина теплового потоку в ГС на вибої дорівнює

$$\tilde{n}_p = \frac{T_{БК} - T_{вх}}{L} \lambda = \frac{70 - 18}{3765} 2,5 = 0,035 \text{ Вт/м}^2, \quad (4)$$

де $\lambda = 2,5$ Вт/м/°С – теплопровідність ГС [8].

Теплова енергія б/р, що виходить з БК на вибої, дорівнює

$$\Delta U_p = 2190 \cdot 30 \cdot (70 - 18) = 3,4 \text{ МДж}.$$

Оскільки ця енергія виходить кожену секунду, загальна потужність теплового потоку від ГС до всього б/р, що знаходиться у просторі БК у кількості 40 м³ (маса 60 000 кг), становить 3,4 МВт, що близько до значення 3,56 МВт у св. Сентянівська-10. Тому модель (1) теплообмінів у свердловині дає можливість прогнозувати температуру б/р на вибої за формулою

$$T_{БК} = T_{вх} + \frac{n_g S_{от} (t_{БК} + t_{ок})}{M_p C}. \quad (5)$$

Для св. Сентянівська-10 б/р під час промивання на вибої нагрівається до температури

$$T_{БК} = 18 + \frac{2680 \cdot 2474 (1799 + 3876)}{172000 \cdot 2500} = 105,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Таблиця 2. Характеристика теплообміну в св. Карадаг-189 (експериментальні дані)

Енергоносії	Позначення	Значення	Енергоносії	Позначення	Значення
Буровий розчин			Геологічне середовище		
Маса/час, кг/с	m/t_0	30	Температурний градієнт, °С/м	$\alpha_g = \text{grad}(T_g)$	0,01992
Температура на вході, °С	$T_{\text{вх}}$	18	Густина, кг/м ³	ρ_g	2760
Температура на виході, °С	$T_{\text{вих}}$	33	Теплоємність, Дж/(кг·°С)	C_g	1180
Теплоємність, Дж/(кг·°С)	c_p	2190	Температура, °С на усті	T_{gL}	18
Швидкість, м/с ³			на вибої		93
у БК	$V_{\text{БК}}$	1,768	Свердловина		
в ОК	$V_{\text{ОК}}$	0,437	Глибина, м	L	3765
Густина, кг/м ³	ρ_p	$1,5 \cdot 10^3$	Діаметр ОК, мм зовнішній	$D_{\text{ОК}}$	299
			внутрішній	$d_{\text{ОК}}$	279
Температура на вибої	$T_{\text{БК}}$	85	Діаметр БК, мм зовнішній	$D_{\text{БК}}$	140
стаціонарна, °С	$T_{\text{ОК}}$	85	внутрішній	$d_{\text{БК}}$	120
			Питома теплоємність заліза, Дж/(кг·°С)	c_z	465

Таблиця 3. Розподіл температури (°С) б/р у св. Карадаг-189 (див. [5, табл. 36])

Характеристика процесу, місце визначення	Глибина вибою L_m , м				
	0	1100	1800	2800	3765
На вибої, стаціонарна	18	51	59	70	85
Після промивання свердловини на усті та на вибої, гл. 3765 м					
без поправки	33	—	—	—	70
з поправкою	33	—	—	—	60
Після промивання свердловини на вибої, гл. 1800 м					
без поправки	36	—	47,5	—	—
з поправкою	36	—	39	—	—

за температури ГС на глибині 3500 м $T_g = L \cdot \alpha_g = 3500 \cdot 0,04 = 140$ °С, а у св. Карадаг-189 – дорівнює 59,8 °С, що відповідає експериментальному показнику (табл. 3).

Результати оцінки основних значень геотермальних енергетичних ресурсів: щільності теплового потоку і теплової потужності ГС за рівняннями (1) і (2) показують, що максимальна густина останнього становить 2680 Вт/м².

Цей безперечний факт генерації тепла гірськими породами автори пояснюють дією термодинамічного фактора, що складається з термодинамічного (теплообміну б/р зі стінками ОТ) і термоелектромагнітного (мікрохвильова дія на простір свердловини і б/р) чинників, на одиничний об'єм гірської породи, що уявляється моделлю Дебая твердого тіла. Тверде тіло гірської

породи (1 м³) моделюють як систему, що складається з багатьох фізичних осциляторів, які стиснуті зовнішнім тиском і випромінюють мікрохвильовий електромагнітний безперервний спектр ДХР певної потужності. Тому осцилятори для досягнення термодинамічної рівноваги вимушені коливатися швидше, що і збільшує внутрішню енергію 1 м³ ГС за глибиною його залягання. Тим самим кожна точка ГС стає не тільки термоелектропровідником, а й джерелом випромінювання ДХР електромагнітної енергії з відповідною до глибини і геостатичної енергії потужністю. Отже, ГС, як вся Земля, перебуває у стані термодинамічної рівноваги із загальним випромінюванням у космічний простір теплової енергії густиною 235 Вт/м², яка за глибиною

змінюється і на глибині 3500 м дорівнює 2680 Вт/м^2 , тобто $\text{grad}(\eta) = 0,765 \text{ Вт/м}^2/\text{м}$.

Розглянемо постановку таких науково-технічних задач.

1. Пояснити за допомогою класичної фізики природу густини теплового потоку на рівні $2,68 \text{ кВт/м}^2$ у свердловинах на глибинах 3500 м. Зазначимо, що ні за витратами потужності на буріння, ні за існуючими параметрами густини вертикальних теплових потоків $\eta_{\text{ф}} = 60\div 130 \text{ мВт/м}^2$ і $j_{30} = 235 \text{ Вт/м}^2$ не можна пояснити походження реальних горизонтальних теплових потоків у глибоких свердловинах. Це можливе, якщо моделювати процес теплопровідності у ГС рівнянням вигляду [11]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_v T) = \text{Віддана енергія ГС} \quad (6)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_g,$$

Перехідна енергія в ГС Енергія ГС, як джерела

де ρ – густина ГС; c_v – теплоємність ГС; $T(x, y, z)$ – температура ГС; $\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \delta c$ – теплопровідність ГС; δ – довжина вільного пробігу фононів; c – середня швидкість руху фононів; $F_g(x, y, z)$ – густина теплових джерел.

Подібне моделювання враховує густину джерел теплової енергії гірських порід і густину теплових потоків охолодження і нагрівання заданого об'єму ГС, що змінюється з глибиною за незмінної початкової густини теплового потоку на земній поверхні, рівнянням

$$\eta_g = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_v T) \partial r - \int_{r_1}^{r_2} F_g \partial r + C_0, \quad (6.1)$$

де r – радіус свердловини.

2. Розробити модель геотермальної енергетичної установки (ГТЕУ), яка здатна доставляти на поверхню теплову енергію у кількості понад $3,4 \text{ МДж}$, оскільки на сьогодні на усті вільна теплова енергія б/р значно менша, ніж на вибої. Так, на прикладі св. Карадаг-189 температура б/р на усті ($33 \text{ }^\circ\text{C}$) має вільну теплову енергію на рівні

$$\Delta U_{\text{вих}} = 2190 \cdot 30(33 - 18) = 0,98 \text{ МДж},$$

а температура ГС на глибині 3765 м дорівнює $93 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Розробити модель і метод оцінки ККД ГТЕУ, оскільки для св. Карадаг-189 (аналогічно для св. Сентянівська-10) її ККД становить усього

$$\eta = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_p} = \frac{0,98}{3,4} = 0,29.$$

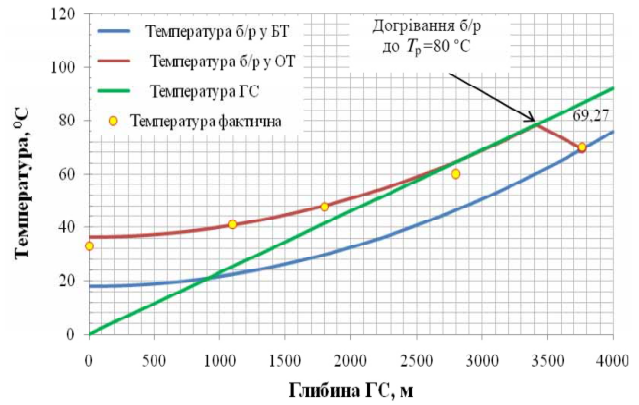


Рис. 4. Характеристики розподілу температур у просторі бурових і обсадних під час прямої циркуляції б/р у кількості $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$

На рис. 4 показано теоретичні й експериментальні характеристики розподілу температур у б/р під час його циркуляції у св. Карадаг-189 [5].

Аналіз кількості геотермальної енергії, яка залишається у свердловині (близько $2,42 \text{ МДж}$) і зосереджується у замкненому процесі теплообміну між потоками бурового розчину, який тече вниз і вгору крізь стінки бурової колони під час промивання свердловини, показує, що необхідні розробка моделі ГТЕУ, яка цю енергію доставлятиме на поверхню, а також технології спорудження геотермальних свердловин,

Оскільки температура нагрівання б/р ΔT у рівнянні (3) цілком залежить від геотермального температурного градієнта, то його підвищення разом із збільшенням конструктивних параметрів свердловини, а також часу нагрівання енергоносія у свердловині внаслідок реверсу його циркуляції дає змогу оцінити реальні видобувні запаси теплової енергії за допомогою ГТЕУ типу “труба в трубі”.

Так, для найактивніших геотермальних зон східної частини України (див. табл. 1) б/р масою m акумулює теплову енергію на вибої в кількості

$$U_p = C \rho_p w (\alpha_g L - T_{\text{вх}}), \quad (8)$$

$$U_p = 2500 \cdot 1380 \cdot 0,022(0,04 \cdot 3500 - 18) \approx 9,23 \text{ МДж},$$

яку необхідно зберегти і підняти на поверхню Землі.

Вода густиною $\rho_b = 1000 \text{ кг/м}^3$, теплоємністю $c_b = 4190 \text{ Дж/кг/}^\circ\text{C}$, кількістю 22 л/с може акумулювати максимальну кількість теплової енергії на рівні

$$U_b = c_b \rho_b w [\alpha_g L - T_{\text{вх}}], \quad (9)$$

$$U_b = 4190 \cdot 1000 \cdot 0,022(0,04 \cdot 3500 - 18) \approx 11,25 \text{ МДж}$$

за час руху у БТ: $t_{\text{бт.в}} = t_{\text{бт.п}} \cdot U_b / U_p = 1799 \cdot 11,25 / 9,23 = 2192 \text{ с}$, оскільки теплова дія ГС на енергоносії є однаковою, що еквівалентно продуктивності насоса 18 л/с (зменшення в $1,22$ раза). Однак

збільшення діаметра обсадних труб від 245 до 377 мм збільшить площу теплообміну у свердловині в 1,54 раза, що компенсує втрату продуктивності насоса з 18 до 22 л/с, тобто загальна потужність ГТЕУ з однакою густиною теплового потоку акумулюватиме за однаковий час теплову енергію кількістю:

$$U_{\max - \text{в}} = 11,25 \cdot 1,54 / 1,22 = 14,2 \text{ МДж, енергоносієй - вода,}$$

$$U_{\max - \text{б/р}} = 9,23 \cdot 1,54 = 14,2 \text{ МДж, енергоносієй - б/р.}$$

Згідно з тепловим еквівалентом q (32 500 кДж/м³) від спалювання 1 м³/с газу, продуктивність ГТЕУ дорівнює продуктивності газової свердловини:

$$Q = \frac{U_{\max - \text{в}} \cdot T_{\text{доб}}}{q} = \frac{12,5 \cdot 10^6 \cdot 24 \cdot 3600}{32,5 \cdot 10^6} = 33,2 \text{ тис. м}^3/\text{добу}$$

(для порівняння: середній дебіт газової свердловини в Україні близько 20 тис. м³/добу).

Висновки.

1. Теплову енергію від ГТЕУ можна використувати для обігріву приміщень житлово-комунального, промислового, сільськогосподарського призначення; генерації електричної енергії [4,10], синтезу газу [13], водню.
2. Геотермальні ресурси України, оцінені за градієнтом густини теплового потоку на рівні (0,3÷0,7 Вт/м²)/м (10 МВт на глибині 3500 м з поверхнею тепловіддачі 3500 м² у свердловині), здатні [3] забезпечити потреби країни у тепловій і електричній енергії повною мірою. Одноразові витрати на створення ГТЕУ з терміном дії 20–40 років становитимуть 211–570 млрд грн. проти існуючих щорічних витрат у 100 млрд грн. Причому кожна наступна ГТЕУ з термоелектричними модулями (ТЕМ) [4] на рівні ККД близько 4 % після витрат на створення перших трьох ГТЕУ окупиться за один рік, а з ТЕМ на рівні ККД 20 %, що можливо з використанням плазмопіролітичних установок газифікації вугілля [10,13] або вивільнення водню з води, витрати на кожну ГТЕУ будуть рентабельними через 1–2 роки. Звільнений природний газ спрямовуватиметься на випуск термоізолювальних труб для заміни зношених металевих теплових мереж.
3. Геотермальна енергетика на основі геотермальних ресурсів змінює державну стратегічну парадигму – економію енергетичних ре-

сурсів, що спалюються, яка стримує розвиток суспільства, на протилежну – збільшення споживання теплової і електричної енергії, що зберігає чистим навколишнє середовище і надає умови для розвитку суспільства.

1. Білодід В.Д. Аналіз можливостей розвитку геотермальної енергетики України // Відновлюв. енергетика . – 2006. – № 1. – С. 71–76.
2. Білодід В.Д. Аналіз ефективності створення Тарханкутської геотермальної електростанції в АР Крим / В.Д. Білодід, Т.В. Павлюченко // Там само. – 2006. – № 4. – С. 82–88.
3. Карпенко В.М. Проект розвитку інформаційного суспільства в Україні на основі геотермальної енергетики / Карпенко В.М., Стародуб Ю.П. // Тези доп. Міжнар. наук. конгр. “Інформаційне суспільство в Україні” (м. Київ, 25–26 жовт.) 2012 р.: Тези доп. – К., 2012. – С. 32–37.
4. Компания Комацу и ее деятельность / Хиромаса Т. Кайбе, Икуто Аояма, Сейджиру Сано // Термоэлектричество. – 2009. – № 1. – С. 61–70.
5. Кулиев С.М. Температурный режим бурящихся скважин / Кулиев С.М., Есьман Б.И., Габузов Г.Г. – М.: Недра, 1968. – 186 с.
6. Національний атлас України. – К.: ДНВП “Картографія”, 2007. – 440 с.
7. Петрунин Г.И. Теплофизические свойства вещества Земли. Ч. 1 / Петрунин Г.И., Попов В.Г. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – 60 с.
8. Стан та перспективи реформування системи теплозабезпечення в Україні / Шевцов А.І., Бараннік В.О., Земляний М.Г. та ін.: Аналіт. доп. – Дніпропетровськ: Регіон. філ. Нац. ін-ту стратег. досліджень, 2010. – 66 с.
9. Тепловое поле территории Украины / Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Усенко О.В. – Киев: Знание Украины, 2002. – 170 с.
10. Термоэлектрический генератор (варианты) и способ изготовления термоэлектрического генератора / Каминский В.В., Голубков А.В., Казанин М.М., Павлов И.В., Соловьёв С.М., Шаренкова Н.В. – Заявка на изобретение № 2005120519/28 от 22.06.2005, положительное решение от 16.06.2006.
11. Физическая энциклопедия. – В 5 т. – М.: Большая Рос. энцикл., 1998. – Т. 5. – 691 с.
12. Ценципер А.І. Одержання теплової енергії з ліквідованих нафтових свердловин / Ценципер А.І., Костіков А.О., Голошапов В.М. // Нафт. і газ. пром-сть. – 2009. – № 3. – С. 41–43.
13. Экономическая эффективность плазмохимической переработки угля. – <http://tbc-inv.ru/tech/2009-09-25-09-56-56>.

ДП “Науканафтогаз” НАК “Нафтогаз України”,
Вишневе, Україна

E-mail: karpenko@naukanaftogaz.kiev.ua

НАК “Нафтогаз України”, Київ, Україна

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
Київ, Україна

Надійшла до редакції 27.12.2012 р.

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ УКРАИНЫ

Рассмотрены геотермальные ресурсы Украины и дана их новая оценка на основе опыта бурения и геофизического исследования скважин на нефть и газ. Новые значения геотермальных ресурсов существенно превысили известные, что раскрыло широкую перспективу их освоения в ближайшее время с помощью геотермальных энергетических установок типа “труба в трубе”, которые не используют топливных ресурсов, не выбрасывают вредных веществ в окружающую среду и способны обеспечить все сферы деятельности общества Украины тепловой и электрической энергией в достаточном количестве.

Ключевые слова: геотермальный фактор, геотермальные ресурсы, геотермальная энергетическая установка.

GEOHERMAL RESOURCES IN UKRAINE

Considered here are geothermal resources of Ukraine and a new estimation is proposed based on the experience of drilling and geophysical examination of wells for oil and gas. The obtained values of geothermal resources significantly exceeded those known before, which opens broad prospects for their development in the near term using geothermal power plants (GTEU) of “pipe in pipe” type. They do not use fuel resources or emit harmful substances into the environment, and are able to provide heat and electricity in sufficient quantities for all activity of Ukrainian society.

Keywords: geothermal resources, geothermal power plant.