

УДК 620.91; 624.482

## ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ В ГЕОТЕРМАЛЬНІЙ ВНУТРІШНЬО-СВЕРДЛОВИННІЙ U-ПОДІБНІЙ ЦИРКУЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ПРИ НЕПЕРЕРВНОМУ ВІДБОРІ ТЕПЛОТИ

Кравченко І.П., Кузнєцов М.П., докт. техн. наук

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,  
вул. Гната Хоткевича, 20а, м. Київ, Україна*

В статті досліджені тепло-масообмінні процеси між оточуючим геотермальну свердловину природним середовищем і двонаправленими потоками рідини у двотрубній внутрішньо-свердловинній циркуляційній системі, центральна труба якої встановлена коаксіально відносно обсадної, з метою з'ясування можливості промислового видобування геотермальної теплоти без застосування другої свердловини для утилізації відпрацьованого теплоносія.

В статье исследованы тепло-массообменные процессы между окружающей геотермальную скважину природной средой и двонаправленными потоками жидкости в двухтрубной внутрискважинной циркуляционной системе, центральная труба которой установлена коаксиально относительно обсадной, с целью определения возможности промышленной добычи геотермальной теплоты без использования второй скважины для утилизации отработанного теплоносителя.

The article examines the processes of heat and mass transfer between surrounding the geothermal wells natural environment and between bi-directional flow of fluid in the double pipe well of system, a central the tube which is set coaxially with respect of outer, with the aim of to determine the possibility of industrial production of geothermal heat without the use of a second well, absorbing of waste heat transfer agent.

Библ. 3, табл. 2, рис. 2.

**Ключові слова:** геотермальна енергетика, термальна вода, температура, теплота, родовище, свердловина, циркуляційна система, потік.

### *Вступ*

Гідрогеологічне середовище території України практично не містить родовищ парогідротерм, які дозволили б видобувати геотермальну теплоту у вигляді водяної пари, для чого не знадобилося б застосовувати, що стали вже класичним, подвійні системи свердловин для видобування і захоронення рідкого теплоносія.

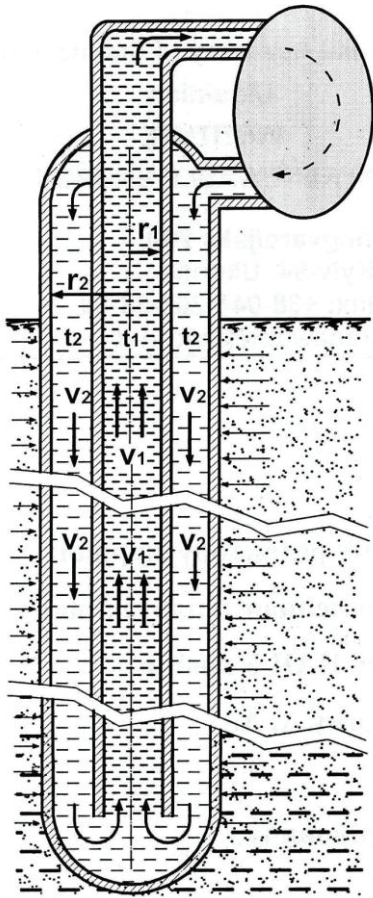
При цьому, не тільки видобування геотермальної енергії, але і розвідки її покладів, не кажучи вже про виконання бурових робіт, не ведеться вже більше тридцяти років. Усі, створені в Україні зразки дослідних геотермальних установок, побудовані на свердловинах півсторічного віку. В той же час, як на вироблених, так і на діючих родовищах вуглеводнів, особливо нафти, маються тисячі свердловин, які за координатами співпадають або приурочені до геотермальних ресурсів. Там існують як масиви свердловин, так

і окремі, як правило не задіяні видобуванням, свердловини. Для висновку про придатність такої свердловини для геотермального використання достатньо вивчити геологічні паспортні дані на неї, які зберігаються у відповідних геологічних і видобувних підприємствах. Аналізу можливостей такого використання поодиноких геотермальних свердловин і присвячена ця робота.

### *Постановка задачі*

Передбачається створення внутрішньо-свердловинної циркуляційної системи шляхом встановлення додаткової труби на усю глибину свердловини (рис.1), що вже аносувалось раніше без математичного аналізу [1]. Задачею цього дослідження є математичний аналіз тепло-масопереносу у свердловині.

Як видно з рисунку, термодинаміка такої системи надзвичайно складна. По-перше, на неї діє



**Рис. 1. Внутрішньо-свердловинна циркуляційна система.**

**Ілюстрація до методики і математичної моделі визначення параметрів тепломасообміну між потоками рідини і оточуючим середовищем.**

теплове поле оточуючого середовища, яке має надзвичайно велику теплову ємність як щодо відбору із свердловини теплоти, так і щодо насичення її теплою в залежності від конкретної точки прикладання цього впливу за глибиною і, відповідно, за температурою усіх складових системи у цій точці.

Таким чином, для визначення координат таких точок за глибиною позначимо цю вісь через  $Z$ , а фізичні відстані за нею будемо позначати індексом  $l$ . Радіуси труб позначимо через  $R_1$  для внутрішньої труби і  $R_2$  – для зовнішньої труби. Швидкості руху рідини у цих трубах позначимо відповідно через  $V_1$  і  $V_2$  (надалі ці індекси позначаються малими літерами). Визначаємо

гідродинаміку системи таким чином: вода, нагріта природним середовищем, піднімається догори по центральній трубі зі швидкістю  $v_1$ , де через теплообмінне устаткування віддає частину теплоти споживачу, а потім по міжтрубному простору опускається донизу зі швидкістю  $v_2$  і у самому низу знову міняє напрямок руху. Задачею цього дослідження є з'ясування величин приросту і втрат водою температури при досягненні найвищої і найнижчої точок у свердловині та пов'язаних з нею витрат рідини, або дебіту, за одну добу.

Оскільки ця методика передбачає ручне фізико-математичне визначення усіх термодинамічних чинників без використання складних комп'ютерних програм та носить оціночний характер, для спрощення приймаємо, що радіуси труб і швидкості в трубах відносяться

$$\text{як } v_2 = \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} v_1, \text{ а площі поперечного перетину}$$

обох потоків  $S_1 = S_2$  рівні між собою. Крім того, на першому етапі вважаємо центральну трубу теплоізоляційною або достатньо теплоізоляційною.

За умови усталеної швидкості рідини та усталених теплофізичних параметрах диференціальне рівняння, що описує температурне поле теплоносія у внутрішній трубі має вигляд [2]:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} R \frac{\partial t_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial Z^2} + \frac{v_1}{a} \frac{\partial t_1}{\partial Z} = 0. \quad (1)$$

Задаємо граничні умови:

$$\lambda \left. \frac{\partial t_1}{\partial R} \right|_{R=R_1} = -\alpha(t_1 - t_2), \quad \left. \frac{\partial t_1}{\partial R} \right|_{R=R_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial t_1}{\partial z} \right|_{z=0} = 0.$$

Диференціальне рівняння, що описує температурне поле теплоносія у зовнішній трубі:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} R \frac{\partial t_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial Z^2} - \frac{v_2}{a} \frac{\partial t_2}{\partial Z} = 0. \quad (2)$$

Відповідно граничні умови:

$$t_2(R, 0) = t_0, \quad \lambda \left. \frac{\partial t_2}{\partial R} \right|_{R=R_2} = -\alpha_2(t_2 - t_n),$$

$$\lambda \left. \frac{\partial t_2}{\partial R} \right|_{R=R_1} = -\alpha(t_1 - t_2), \quad \left. \frac{\partial t_2}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad t_1(R_1, l) = t_2(R_1, l)$$

(оскільки  $t_c > t_2$ ,  $t_1 > t_2$  і при зростанні  $R$ , в точці  $R=R_1$  температура  $T_2$  зменшується, а при  $R=R_2$  – зростає),

де  $t_c$  – температура середовища (гірського масиву) навколо свердловини,

$z$  – відстань (глибина), ( $z \leq l$ ,  $l$  – відстань, на якій потік змінює напрямок руху).

Оскільки зміна температури в радіальному перетині нехтовно мала, можна усереднити її за радіусами  $R$ . Зінтегруємо рівняння (1) за  $R$  в межах  $[0, R_1]$ , а рівняння (2) за  $R$  в межах  $[R_1, R_2]$ .

Позначимо  $T = \bar{T}(z)$  – температура, усереднена по радіусу.

З граничних умов випливає:

$$R \frac{dT_1}{dR} \Big|_{R_0}^{R_1} = -R_1 \frac{\alpha}{\lambda} (T_1 - T_2),$$

$$R \frac{dT_2}{dr} \Big|_{R_1}^{R_2} = \frac{R_1}{\lambda} a (T_1 - T_2) - \frac{R_2}{\lambda} a_2 (T_2 - T_c).$$

З урахуванням, що

$$R_2^2 - R_1^2 = \frac{R_1^2 v_1}{v_2}, \text{ при розмірностях } \frac{a}{\lambda} = \frac{1}{i}; \frac{v}{a} = \frac{1}{i},$$

в квазістаціонарному випадку таке усереднювання переносить граничні умови на поверхнях циліндрів безпосередньо до диференціальних рівнянь:

$$\frac{d^2 T_1}{dz^2} + \frac{v_1}{a} \frac{dT_1}{dz} - \frac{2\alpha T_1}{\lambda R_1} + \frac{2\alpha T_2}{\lambda R_1} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 T_2}{dz^2} - \frac{v_2}{a} \frac{dT_2}{dz} - \frac{2v_2}{\lambda R_1 v_1} \cdot \frac{\alpha_2 R_2}{R_1} (T_2 - T_c) + \frac{2v_2 \alpha}{\lambda R_1 v_1} (T_1 - T_2) = 0. \quad (4)$$

### Вирішення задачі

Оскільки даний аналіз носить оціночний характер, виконаємо його за спрощеним варіантом, коли внутрішня труба теплоізольована і її коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha = 0$ . Це означає, що температура у внутрішній трубі однакова на усьому відрізку  $l$ :  $T_1 = \text{const}$ ;  $T_1 = T_2|_{z=l}$ . Виходячи з цього, для дослідження тепломасопереносу в міжтрубному просторі достатньо проаналізувати температурне поле в зовнішній трубі, тобто згідно з рівнянням (4):

$$\frac{d^2 T_2}{dz^2} - \frac{v_2}{a} \frac{dT_2}{dz} - \frac{2v_2}{\lambda R_1 v_1} \cdot \frac{\alpha_2 R_2}{R_1} (T_2 - T_c) = 0,$$

де:

$v_1, v_2$  – швидкість руху води, відповідно, у внутрішній та зовнішній трубах (м/сек);

$\alpha$  – коефіцієнт теплопроводності (м<sup>2</sup>/сек);

$R_1, R_2$  – радіуси внутрішньої та зовнішньої труб;

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі (Вт/м<sup>2</sup>·град);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопроводності (Вт/м·град);

$z$  – глибина (м);  $z \in [0, l]$ , де  $l$  – максимальна глибина;

$T_c$  – температура середовища навколо свердловини (град.);  $T_c \in [T_0, T_{\max}]$ .

Граничні умови для  $T_2$ :

$$T_2|_{z=0} = T_i \text{ (температура на вході); } \frac{dT_2}{dz} \Big|_{z=l} = 0 \text{ (на вході}$$

відсутній додатковий підігрів).

Швидкості рідини і радіуси труб пов'язані відношенням:

$$V_2 = \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot V_1.$$

На більшості розвіданих геотермальних і нафтових родовищ Дніпровсько-Донецької западини температура на дні свердловин, в залежності від глибини свердловини, коливається в межах + 90...135 °С, а градієнт її квазілінійної зміни в середовищі навколо свердловин, згідно з геологічними вимірами, в середньому становить 2.7 °С/100 м, що можна описати як

$$T_c = T_0 + kz, \text{ де } k = \frac{T_{\max} - T_0}{l}.$$

Зробимо заміну змінної:  $x = z/l$ , тоді  $x \in [0, 1]$ . Відтак, рівняння температурного поля для  $T_2 = T$  матиме вигляд:

$$-T'' + gT' + pT = k \cdot x + pT_0, \quad (5)$$

де:

$$g = \frac{v_2 l}{a}, \quad p = \frac{2v_2 \alpha_2 R_2 l^2}{\lambda R_1^2 v_1}, \quad \kappa = p \cdot kl \text{ (} g \text{ і } p \text{ величини}$$

безрозмірні,  $\kappa$  – град).

Граничні умови:  $T(0) = T_0$ ,  $T'(0) = 0$ .

Розв'язок рівняння (5) згідно з правилами розв'язання диференціальних рівнянь шукаємо у вигляді:  $T = C_1 e^{\mu_1 x} + C_2 e^{\mu_2 x} + Ax + B$ , де:

$\mu_1, \mu_2$  – корені квадратного рівняння  $-\mu^2 + g\mu + p = 0$ ,

$$\text{тобто } \mu_1, \mu_2 = \frac{g}{2} \pm \sqrt{\frac{g^2}{4} + p}.$$

Підставивши значення  $T$  в рівняння (5),

$$\text{отримаємо: } A = kl; \quad B = T_0 - kl \frac{g}{p}.$$

З граничних умов:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 + B = T_0 \\ C_1\mu_1 + C_2\mu_2 + A = 0 \end{cases} \quad (6) \quad \text{або} \quad \begin{cases} C_1 + C_2 = kl \frac{g}{p} \\ C_1\mu_1 + C_2\mu_2 = -kl \end{cases}$$

Якщо  $g^2 \gg p$ , то наближено можна взяти  $\mu_1 \approx g$  і  $\mu_2 \approx -\frac{p}{g}$ , і із системи

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = kl \frac{g}{p} \\ -C_1g + C_2 \frac{p}{g} = kl \end{cases} \quad \text{отримаємо} \quad C_1(g + \frac{p}{g}) = 0 \Rightarrow C_1 = 0;$$

$$C_2 = kl \frac{g}{p}. \quad \text{Тоді}$$

$$T(x) = kl \frac{g}{p} e^{-\frac{px}{g}} + klx + T_0 - kl \frac{g}{p} = T_0 + klx - kl \frac{g}{p} (1 - e^{-\frac{px}{g}}), \quad (7)$$

що з урахуванням наведеної граничної умови  $T_1 = T_2|_{x=1}$  дозволяє визначити температуру води на вході і на виході внутрішньої труби:

$$T_1 = T_2|_{x=1} = T(1) = T_i + kl - kl \frac{g}{p} (1 - e^{-\frac{p}{g}}), \quad (8)$$

**що і є розв'язком поставленої задачі.** При цьому зауважимо, що перші два елемента формули (8)  $T_0 + kl = T_{\max}$  – це температура на дні свердловини або точніше – в точці, де потік міняє напрямку руху із спуску на підйом, тобто з кільцевого міжтрубного простору – у внутрішню трубу. Якщо теплообмін з середовищем абсолютний, тобто  $\alpha_2 \rightarrow \infty$ , тоді  $T_1 = T_0 + kl = T_c$ .

Виконаємо за формулою (8) числові розрахунки для конкретного, розглянутого в розділі 3, Монастирищенського родовища, зокрема його свердловини № 20. Сформуємо геологічні і фізико-технічні вихідні дані без посилання на конкретні джерела, пославшись тільки на їх відомче походження з НГВУ «Чернігівнафтогаз»:

1. Глибина свердловини  $z=l$ , м – 3500;
2. Діаметр свердловини  $D$ , м – 0.146  
(радіус –  $R_2 = 0.073$ );
3. Температура на дні свердловини  $T_{\max}$ , °C – 97.1;
4. Температурний градієнт по глибині свердловини  $k$ , °C/100м – 2.7;
5. Приймаємо температуру води на поверхні  $T_0$ , °C – 10;
6. Грунти навколо свердловини – піщаники з параметрами:  
- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , Вт/м·град – 1;

- коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$ , Вт/м·град – 15;
- коефіцієнт температуропровідності  $a$ , м<sup>2</sup>/год –  $35 \cdot 10^{-4}$  або  $\approx 1 \cdot 10^{-6}$ .

7. Приймаємо умову, що швидкості потоків у внутрішній трубці і в міжтрубному просторі рівні між собою  $v_1 = v_2 = v$ , що досягається співвідношенням радіусів труб як  $R_1 = \frac{R_2}{\sqrt{2}}$  або рівністю площ перетину кожного з потоків. Розрахуємо залежність температури і саму температуру у внутрішній трубці, як функцію від швидкості для лінійної швидкості потоків  $v = 1$  м/сек, за формулою (8) за кроками:

$$1). \quad g = \frac{v_2 l}{a} = \frac{1 \text{ м/сек} \cdot 3500 \text{ м}}{10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}} = 3.5 \cdot 10^9.$$

$$2). \quad p = \frac{2v_2 \alpha_2 R_2 l^2}{\lambda R_1^2 v_1} = \frac{2 \cdot 1 \text{ м/сек} \cdot 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \cdot 0.073 \text{ м} \cdot 3500^2 \text{ м}^2}{1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \cdot 0.052^2 \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ м/сек}} = 9.92 \cdot 10^9 \approx 10^{10}.$$

3). Відзначимо: що, як видно,  $g^2 \gg p$ , що виправдовує допущення, прийняте при виводі формули (7).

$$4). \quad kl \frac{g}{p} = (97.1 - 10) \cdot \frac{3.5 \cdot 10^9}{10^{10}} = 30.485 \approx 30.5.$$

$$5). \quad e^{-\frac{p}{g}} = e^{-2.8} \approx 0.06.$$

6). Остаточно:

$$T_1 = T_0 + kl - kl \frac{g}{p} (1 - e^{-\frac{p}{g}}) = 97.1^\circ \text{C} - 30.5^\circ \text{C} \cdot (1 - 0.06) = 67.52^\circ \text{C}.$$

При тому ж співвідношенні перетину труб і, відповідно, рівності швидкостей у них, але при зменшенні номінального значення швидкості, наприклад, на 10, 20 і т. д. відсотків, ці показники матимуть такі значення (табл. 1.).

Як зміниться температура з часом? Температура середовища навколо свердловини буде падати через відбір тепла водою в її міжтрубному просторі. Відповідно тепловий потік від середовища до зовнішньої труби також буде падати. Як показано в [2], максимальне зниження температури відбудеться в перші 10...15 днів, а починаючи приблизно з 100-ї доби практично стабілізується і становитиме приблизно 1/4 від початкової величини.



Табл. 1. Таблица розрахунків температури води на виході із внутрішньої труби в залежності від її швидкості в потоці

Швидкість руху води м/сек	Значення компонент формули (8)				Температура T <sub>1</sub> (°C)		Квазідебет води (витрати) м.куб./доб.
	$g = \frac{v_2 l}{a}$	$p = \frac{2v_2 \alpha_2 R_2 l^2}{\lambda R_1^2 v_1}$	$\frac{g}{p}$	$e^{-\frac{p}{g}}$	В першу добу	Через 185 діб	
1	2	3	4	5	6	7	8
1.0	3.5·10 <sup>9</sup>	810·3500 <sup>2</sup>	0.350	0.057	68.4	56.1	723.2
0.9	3.15·10 <sup>9</sup>	-«-	0.315	0.042	70.8	72.3	650.9
0.8	2.8·10 <sup>9</sup>	-«-	0.280	0.028	73.4		578.5
0.7	2.45·10 <sup>9</sup>	-«-	0.245	0.017	76.4		506.2
0.6	2.1·10 <sup>9</sup>	-«-	0.210	0.008	79.0		433.9
0.5	1.75·10 <sup>9</sup>	-«-	0.175	0.003	81.9		361.6
0.4	1.4·10 <sup>9</sup>	-«-	0.140	≈0	84.9		289.3
0.3	10.5·10 <sup>8</sup>	-«-	0.105	-«-	88.0		217.0
0.2	7·10 <sup>8</sup>	-«-	0.070	-«-	91.0		144.6
0.1	3.5·10 <sup>8</sup>	-«-	0.035	-«-	94.1	92.0	72.3

Оскільки тепловий потік пропорційний різниці температур, то в 4 рази зменшиться і ця різниця. Отже, якщо при швидкості води в трубі 1 м/сек максимальний перепад температур між водою і середовищем досягав 30°, то через півроку він становитиме 7°...8°. По відомій формулі [3] за τ годин температура середовища буде:

$$T_c(\tau)|_{R=R_2} = T_c(0) - \frac{qR_2}{2\lambda} \ln \frac{4a\tau}{1.8R_2^2}, \text{ де } q = \alpha_2(T_c - T_2) - \text{тепловий потік.}$$

Якщо при попередніх числових даних перепад температур впаде з 30° до 7°...8°, то

$$T_c(\tau) = 97.1 - 3.8 \cdot \tau \cdot \ln(1.4\tau).$$

Через півроку при τ = 4300 годин  $T_c|_{R=R_2} \approx 97.1^\circ - 33^\circ = 64.1^\circ$ . При цьому температура води T<sub>1</sub>=64.1 °C – 8 °C = 56.1 °C, що, з урахуванням лінійності результатів, нанесено на графік рис. 2. лінією тільки між цими двома значеннями температур. Вид формули (8) при цьому не змінюємо, але значення α<sub>2</sub> треба обирати як для нового стану середовища.

Якщо швидкість v є іншою, наприклад v<sub>1</sub> = 0.1 м/сек, то перепад температур зменшиться з 3° до 0.8°...1°, температура середовища впаде до 93 °C, а води до 92 °C. Розраховані проміжні зна-

чення T<sub>1</sub> на відрізку швидкостей від 0.1 м/сек до 1.0 м/сек наведені в колонці 6 таблиці 2.

Викликають великий інтерес ще два варіанта розрахунків, умови в яких відрізняються від розглянутих вище.

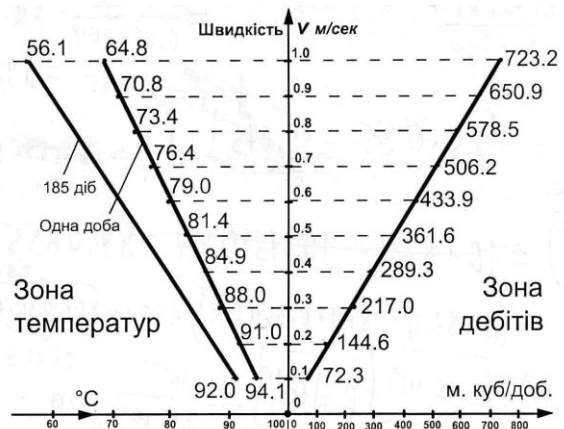


Рис. 2. Графік залежності температури T<sub>1</sub> води від швидкості її руху і відповідний цій залежності дебет теплоносія на поверхні.

**Варіант №1**

Якщо внутрішня труба не є повністю тепло непроникною (α≠0), розподіл температур у внутрішньому і зовнішньому потоках є

взаємопов'язаним. Розглянемо вихідну систему диференційних рівнянь (3) і (4), записавши її у вигляді (з урахуванням введених вище позначень):

$$\begin{cases} T_1'' + g_1 T_1' - mp_1(T_1 - T_2) = 0 \\ T_2'' + g_2 T_2' - p_2(T_2 - T_c) + mp_1(T_1 - T_2) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$(T_c = T_0 + klx)$

При рівності швидкостей використаємо умову  $v_1 = v_2$  та позначимо:

$$m = \frac{\alpha_1 R_1}{\alpha_2 R_2} = \frac{\alpha}{\sqrt{2}\alpha_2}, \quad g_1 = g_2 = g, \quad p_1 = p_2 = p.$$

З (9) отримаємо:

$$T_1 = T_2 + \frac{1}{mp} [p(T_2 - T_c) + gT_2' - T_2''],$$

$$T_2'' - T_2''(2mp + p + g^2) - T_2' \cdot gp + mp^2 = mp \cdot T_c - gp \cdot kl. \quad (10)$$

Якщо підставити використані раніше числові значення ( $g = 3.5 \cdot 10^9$ ,  $p = 10^{10}$ ), то можна зазначити малість множників при вищих похідних, що дозволяє спростити рівняння (10), знизивши його порядок до 2-го. Оскільки зміна температури вздовж каналу труби відбувається плавно, по закону, близькому до лінійного, то вплив других похідних в рівняннях (9) досить незначний і їх можна ігнорувати, спростивши систему до двох рівнянь 1-го порядку при 2-х граничних умовах. Розв'язок (10) матиме вигляд:

$$T_2 = C_1 e^{\mu_1 x} + C_2 e^{\mu_2 x} + T_c$$

при граничних умовах  $T_2|_{x=0} = T_0$ ,  $T_2|_{x=1} = T_1|_{x=1}$ . Звідси

$$\mu_1, \mu_2 = -\frac{p}{g} \left( \pm \sqrt{\frac{1}{4} + m + \frac{1}{2}} \right)$$

визначається як розв'язок характеристичного рівняння

$$\mu^2 + \frac{p}{g} \mu - m \frac{p^2}{g^2} = 0; \quad C_1 = -C_2 = C; \quad (\mu_1 < 0, \mu_2 > 0).$$

Константу  $C$  визначаємо з рівняння:

$$C \left[ \frac{g}{p} (\mu_1 e^{\mu_1} - \mu_2 e^{\mu_2}) + (e^{\mu_1} - e^{\mu_2}) \right] = -kl \frac{g}{p}. \quad (11)$$

Цей вираз можна спростити, якщо врахувати, що  $e^{\mu_1} \ll e^{\mu_2}$  при  $m \gg 0$ ,

$$C \left( 1 + \frac{g}{p} \mu_2 \right) = kl \frac{g}{p} e^{-\mu_2}. \quad (12)$$

Враховуючи, що  $kl = 87.1^\circ$ , розглянемо вплив величини  $m = \frac{\alpha}{\sqrt{2}\alpha_2}$  на температуру води на вході та виході внутрішньої труби, тобто  $T_1(1)$  та  $T_1(0)$ :

$$T_1(1) = T_2(1) = T_0 + kl - C e^{\mu_2},$$

$$T_1(0) = \frac{g}{mp} [C(\mu_1 - \mu_2) + kl] + T_0,$$

де  $C$  визначається з (12).

Практичний розрахунок температур на вході і виході внутрішньої труби виконаємо для чотирьох не нульових значень  $m$  та порівняємо їх з попереднім результатом, коли  $m = 0$ . Результати розрахунків наведені в таблиці 2:

Табл. 2. Розрахунки  $T_1$  в залежності від значення  $m$  у межах  $0 \leq m \leq 10$

Характеристика параметрів	Параметри	Значення				
		0	0.1	0.5	2	10
Вишукувані	$T_1 _{x=0}, ^\circ\text{C}$	67	65	43	21	13
	$T_1 _{x=1}, ^\circ\text{C}$	67	70	75	77	85
Допоміжні	$\mu_1$	-2.8	-3.0	-3.8	-4.5	-10
	$\mu_2$	0	0.25	1.0	1.7	7
	$C$	30	21	8.2	3.5	$\approx 0$

Таким чином, наявність теплопровідності у внутрішньої труби спричиняє дужчий підігрів води в міжтрубному просторі за рахунок відтоку теплоти з внутрішньої труби, через що вихідна

вода з неї значно охолоджується. При високій теплопровідності вода у внутрішній трубі майже не нагрівається. Відбувається тільки внутрішній теплообмін між потоками.

**Варіант №2**

Усі, розглянуті вище, геотермічні розрахунки відносилися до умов, коли гірське середовище навколо свердловини є піщаниками з параметрами, наведеним у п.6 вище, і отримувана в розрахунках температура  $T_1$  відносилася до точки  $z$  у свердловині, де потік міняє напрямок руху, тобто відразу переходить з міжтрубного простору у центральну трубу.

У реальної свердловини № 20 Монастирищенського родовища, щодо якого здійснені тут усі розрахунки, останні 31.6 метрів являють собою потужний, заводнений термальною водою, горизонт з температурою по усій товщі 31.6 м рівною 97,1 °С. До речі, таке явище притаманне більшості родовищ як нафти, так і газу, які приурочені до термоводонесних шарів оточуючого їх гірського середовища.

Розрахуємо величину добавки температури до води у свердловині № 20, яка надійшла по міжтрубному простору і пройшла через усю товщу термоводонесного горизонту. Що змінилося в умовах нової задачі? Те, що на протязі усього нового значення  $l$  температура середовища  $T_c$  є незмінною і конкретно рівна 97,1 °С. Вважаємо, що теплоємність усього гірського масиву і вміщеного в нього термоводонесного горизонту навколо свердловини є настільки енергоємним, що відбір теплоти рухомим циліндричним шаром води діаметром 0.146 м з товщиною стінки усього 0.02 м не здатний відчутно вплинути на його параметри. При цьому необхідно встановити нові значення параметрів для розрахунків, які змінилися з появою водного середовища навколо свердловини:

- висота відрізка свердловини  $l$ , м – 31.6;
- коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$ , Вт/м<sup>2</sup>·град – 300\*.

\* – Таблиця повних коефіцієнтів теплообміну містить значення  $\alpha_2$  для систем «Рідина всередині і зовні труб» ([www.tehtab.ru](http://www.tehtab.ru)) в межах 150...1200 Вт/м<sup>2</sup>·град. Тут вибрано значення в розмірі 1/4 від максимальної з огляду на фільтрацію рідини, що оточує свердловину, не в порожнині, а в пористому середовищі. При ігноруванні впливу скелету породи цей показник значно вищий.

Скористаємося другим диференціальним рівнянням з системи (9), за яким виконували попередні розрахунки:

$$T_2'' + g_2 T_2' - p_2 (T_2 - T_c) + m p_1 (T_1 - T_2) = 0 \text{ з урахуванням, що у цьому випадку } m = 0, \text{ та нехтуючи старшою похідною:}$$

$$g_2 T_2' + p_2 (T_2 - T_c) = 0, \tag{13}$$

але з граничною умовою  $T_0 = T_2(0) = T_2|_{z=0}$ . Тобто, початкова температура дорівнює досягнутому значенню на глибині  $l$ . Натомість, в зовнішньому шарі товщиною  $l_1$  температура практично незмінна:  $T_c = T_{max}$ . Тоді розв'язок рівняння (13) матиме вигляд:

$$T_2(x) = C_1 e^{mx} + C_2, \text{ або } T_2(x) = T_c - (T_c - T_0) e^{-\frac{p_2 x}{g_2}}.$$

Тут  $z \in [0, l_1]$ , тобто  $x \in [0, 1]$ ,  $z = x l_1$ .

При розрахунку  $g_2$  і  $p_2$  враховуємо умови теплопередачі в термоводонесному шарі, які відповідають його фізичним властивостям. Оцінимо величину такої добавки для розглянутого вище значення  $v_1 = v_2 = v = 1$  м/сек (колонка 6 таблиці 1):

$$T_0 = 67.5 \text{ °С}, \quad T_{max} = 97.1 \text{ °С}, \quad l_1 = 31.6 \text{ м},$$

$$\alpha_2 = 300 \text{ Вт/м}^2\text{·град.}$$

$$\frac{p}{g} = \frac{4\alpha_2 a l}{v \lambda R_2} = \frac{4 \times 300 \times 10^{-6} \times 31.6}{1 \times 1 \times 0.073} = \frac{0.03792}{0.073} = 0.52;$$

$$T_2(1) = 97.1 - 29.6 \times e^{-0.52} = 97.1 - 29.6 \times 0.594 = 79.52 \approx 79.5.$$

Тобто, при проходженні кільцевого міжтрубного потоку ще 31.6 м зі швидкістю 1 м/сек, вода підігріється на  $79.5 - 67.5 = 12.0$  градусів.

При швидкості ж 0.1 м/сек добавка значення температури становитиме:

$$\frac{p}{g} = \frac{4\alpha_2 a l}{v \lambda R_2} = \frac{4 \times 300 \times 10^{-6} \times 31.6}{0.1 \times 1 \times 0.073} = \frac{0.03792}{0.0073} = 5.19;$$

$$T_2(1) = 97.1 - 29.6 \times e^{-5.19} = 97.1 - 29.6 \times 0.0056 = 97.1 - 0.17 = 96.93.$$

При такій швидкості вода практично прийме температуру оточуючого середовища і при використанні теплоізолюваної внутрішньої труби досягне поверхні з температурою реального геотермального флюїду.

**Висновки**

1. При застосуванні внутрішньо-свердловинних технологій видобування і аку-

мулювання теплової енергії, позитивний ефект досягається тільки за умови теплоізоляції внутрішньої труби. Певним винятком є тільки умова, якщо свердловина явно геотермальна, тобто вона закінчується термоводонесним горизонтом з температурою флюїду, що відповідає геотермічному градієнту температури, відносно якого ведеться проектування геотермального водозабору.

2. При проектуванні такої системи необхідно враховувати взаємну залежність дебету і температури, яка визначається швидкістю руху рідини у міжтрубному просторі системи (графік рис. 2). Розрахунок параметрів тепломасообміну при нерівних між собою площах перетину потоків  $S_1 \neq S_2$  і, відповідно, нерівністю між швидкостями  $v_1 \neq v_2$  в потоках, не ставився в даній оціночній задачі.

3. При створенні внутрішньо-свердловинних циркуляційних систем доцільно надавати перевагу родовищам, глибина буріння на яких перевищує 3500 метрів, а в ідеалі – на рівні

4500...5000 метрів з огляду на природну температуру на їхній максимальній глибині (120 і більше градусів за Цельсієм).

4. При створенні внутрішньо-свердловинних циркуляційних систем доцільно надавати перевагу свердловинам, які пронизують термоводонесні горизонти, особливо у своїй найнижчій ділянці.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *І. П. Кравченко*. Перспективи розвитку в Україні геотермальних гібридних тепло-технологій на вироблених нафтових і газових родовищах// Відновлювана енергетика, №4(43), – 2015, Київ. – С. 60–66

2. *Ю. П. Морозов*. Эффективность извлечения теплоты горного массива путём использования буровой скважины//Альтернативная энергетика и экология, Саров, 2014. – №23(163), С. 49–52.

3. *Лебедев Н. Н.* Сборник задач по математической физике /Лебедев Н.Н., Скальская И.П., Уфлянд Я.С., Государственное изд. технико-теоретической литературы, М., –1955 г. – 420 с.



## PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER IN GEOTHERMAL U-SHAPED CIRCULATION SYSTEM AT CONTINUOUS OF THE HEAT REMOVAL

**Kravchenko I.P., Kuznetsov M.P.**

Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
vul. Hnata Khotkevicha, 20A, Kyiv, 02094, Ukraine

In hydrogeological environment in Ukraine almost no deposits of heat steams that can produce geothermal energy, which was not necessary to apply dual system of wells for the extraction and disposal of liquid coolant. In addition, in Ukraine not only the extraction of geothermal energy, but the exploration of deposits, not to mention of drilling operations, not made more than thirty years. At the same time, in the deposits of hydrocarbons, particularly petroleum, have thousands of freed wells, coordinates which coincide with geothermal resources. The conclude on the suitability of such geothermal wells can if study geological passport data, which stored in geological and mining enterprises. To analysis such capabilities use single geothermal wells dedicated ritherch in to this work.

Supposed making of circulation system by installing additional coaxial of pipe to the entire depth of the well (Figure 1), about which was announced earlier without mathematical analysis [1]. The object of this research is the mathematical analysis of heat and mass transfer in the well.

As a result of mathematical operations with the system of differential equations that describe the temperature field in the inner and outer tube, received one working differential equations. The solution of this equation yielded the following result: extract geothermal heat transfer fluid using such a system is possible only if the inner tube nonconductor heat. Even so, temperature of water on the surface depends on the speed of its pumping by the annulus (Figure 2).

In summary it is concluded that the production of geothermal energy in this way is suitable at depths wells deeper 3,500 meters and temperature at their bottom more than 100 degrees Celsius.

References 3, tables 2, figures 2.

**Key words:** geothermal energy, thermal water, temperature, heat, well, circulation systems, flow.

1. *Kravchenko I.P.* Perspektivi rozvitku v Ukrainy heothermalnih gibrinih theplotehnologiy na viroblenih naftovih I gasovih rodovishchah // Vidnovluvana energetika, №4(43), 2015, Kyiv, P. 60–66;
2. *Morozov Y.P.* Effektivnost izvlechenija teploty gornogo massiva putiom ispolzovanija burvoy skvaziny// Alternativnaja energetika i ecologyja, Sarov, 2014, №23 (163), pp. 49–52.
3. *Lebedev N.N.* Sbornik zadach po mathematicheskoy fiziky / Lebedev N.N., Skalskaya I.P., Uflyand Y.S., State ed. technical and theoretical Literature, Moscow, 1955, 420 p.

*Получено 02.08.2016*

*Received 02.08.2016*