

УДК 536.242

В. М. КАРПЕНКО<sup>1</sup>, Ю. П. СТАРОДУБ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національна акціонерна компанія “Нафтогаз України”, вул. Богдана Хмельницького, 6, Київ, 01601, Україна, тел. +38(066)3814781, ел. пошта: intexnaftogaz@ukr.net

<sup>2</sup> Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, Львів, 79000, Україна, тел. +38 067 2663182, ел. пошта: George\_Starodub@yahoo.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИНАХ

<https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.085>

**Метою** роботи є розроблення і дослідження енергетичного методу видобування геотермальної енергії з глибоких свердловин, яку генерують гірські породи до внутрішнього простору свердловин під час циркуляції в ній промивальної рідини у різних геологічних умовах світу, зокрема в Україні. **Методика** досягнення мети передбачає результати експериментальних і теоретичних досліджень стаціонарного процесу притоку тепла від геологічного середовища до простору глибокої свердловини на різних продуктивностях бурових pomp, у різних геологічних умовах, за різних властивостей промивальної рідини. Дослідження враховували моделі “холодної” і “гарячої” Землі. Як **результат**, досліджено теплообмін у глибоких свердловинах у різних геологічних умовах світу, вивчено питання про фізику зареєстрованого теплового потоку, про максимальну можливу щільність теплового потоку і від яких фізичних і технологічних параметрів вона залежить. Вивчено дію фактора геотермальної енергії з боку гірських порід на простір свердловини під час циркуляції в ньому промивальної рідини за різних продуктивностей pomp. Встановлено, що значення щільності теплового потоку від гірських порід у свердловину значно перевищують відомі значення, які визначаються геофізичним законом теплопровідності Фур’є на основі використання даних геотермального градієнта. Запропоновано енергетичний метод визначення реальних енергетичних характеристик фактора геотермальної енергії, який показав здатність глибоких свердловин генерувати теплову енергію з промисловими значеннями. Підтверджена правомірність моделей “холодної” Землі зі зменшенням і “гарячої” Землі з стабільними значеннями температур на вибої свердловини. **Наукова новизна** полягає в розв’язанні задачі ідентифікації параметрів експериментальної функції теплообміну системи геологічне середовище-свердловина-повітря з геофізичними параметрами процесу, на основі розробленого енергетичного методу теплообміну в просторі свердловини, надано наукове пояснення збільшеному і зменшеному значенням щільності теплових потоків у процесах теплообміну в глибоких свердловинах на основі “холодної” і “гарячої” моделей Землі. **Практична значущість** отриманих результатів полягає в обґрунтуванні доцільності і можливості побудови геотермальних станцій з промисловою потужністю видобування геотермальної енергії на основі використання окремих ізольованих від пластових флюїдів глибоких свердловин.

*Ключові слова:* глибокі свердловини, геологічне середовище, геотермальна енергія, промислові значення.

### **Вступ**

Дослідження фактора геотермальної енергії (ФГЕ), що діє на простір у глибоких свердловинах, у якому циркулює енергоносії (буровий розчин, вода, повітря, газ тощо), з метою оцінювання генерації теплової енергії “сухими” гірськими породами, проводилися у країнах, що освоюють протягом 30 років геотермальні ресурси покращеними геотермальними системами, що ґрунтуються на окремих ізольованих свердловинах (isolated single well electric geothermal system: ISW-EGS) [Geothermal ..., 2009].

### **Мета**

Метою роботи є розроблення і дослідження енергетичного методу видобування геотермальної енергії з глибоких свердловин, яку генерують

гірські породи до внутрішнього простору свердловин під час циркуляції в ній промивальної рідини в різних геологічних умовах світу, зокрема в Україні. Проблема, яка існує під час досліджень ФГЕ у глибоких свердловинах, полягає в технічній складності і значній вартості проведення таких досліджень і експериментів. Експериментальні дослідження ФГЕ вимагають наявності глибокої свердловини до 4000 м і глибшої, обсадженої колоною з максимальним діаметром, потужних бурових насосів, заміни бурового розчину на воду, тривалого часу (кілька діб) циркуляції води до встановленої температури на земній поверхні за різних продуктивностей насосів (до 50 л/с), безпровідних давачів температури, що встановлюються на вибої, самої експлуатаційної колони зі спеціальною термоізоляцією і оптимальними конструктивними

параметрами для зменшення гідродинамічного опору теплоносія, зворотної циркуляції; відсутності зв'язку об'єму свердловини з пластовими флюїдами. Тому всі проекти ISW-EGS реалізуються з використанням інформації про геофізику ФГЕ. Основним методологічним принципом у прогнозуванні енергетичних параметрів ISW-EGS є модель "холодної" Землі. Цей принцип говорить, що енергетичні параметри геотермальних теплових станцій з часом зменшуються. Однак, досвід тривалого буріння глибоких свердловин і експлуатації у світовій практиці майже 450 свердловин, що ґрунтуються на ISW-EGS, свідчить про існування принципу – стабільна генерація теплової енергії геологічним середовищем (ГС) зростає з глибиною, що пояснюється теорією моделі "гарячої" Землі [Geothermal..., 2009; Кузнецов В. В., 2008; Солов'єв В. В. та ін., 1989; Reboló R. та ін., 1995].

**Методика**

**Перші експериментальні дослідження** ФГЕ в глибоких свердловинах проводилися в СРСР, Азербайджан [Есьман Б. И. та ін., 1962; Кулиев С. М. та ін., 1968] на початку 60-х років ХХ ст. Так, на рис. 1–3 наведено результати досліджень ФГЕ під час промивання свердловин з використанням вибійних давачів температури.

Дані дослідження засвідчили, що тривала щільність теплового потоку нагріву бурового розчину (б/р) в свердловині за грубою оцінкою для св. 10 на рис. 2 становить

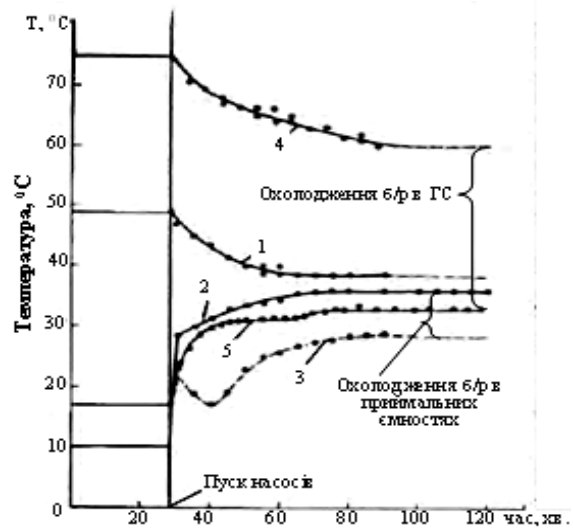
$$n = \frac{M_e c \Delta T_e + M_c c \Delta T_c}{pDL\Delta t} = \frac{277835 \cdot 3000 \cdot [(80-18) + (82,5-61)]}{3,14 \cdot 0,299 \cdot 3750 \cdot 120 \cdot 60} = 2745,55, \text{ т/м}^2, \quad (1)$$

Де  $M_e = M_c = r w_e = r w_c$  – маса б/р у приймальних ємностях об'ємом  $w_e, w_c$  і свердловині густиною  $r = 1300 \text{ кг/м}^3$ , кг;  $c$  – теплоємність б/р, Дж/кг/°С;  $\Delta T_c = [0,5(110+12) - 0,5(85+80)] = -21,5$  – різниця середніх температур б/р у свердловині в кінці і на початку перехідного процесу, °С;  $\Delta T_e = 80 - 18 = 62$  – різниця температур б/р у приймальних ємностях на початку і в кінці перехідного процесу, °С;  $pDL$  – загальна площа зовнішньої стінки обсадної колони, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – час перехідного процесу від початку промивання до стаціонарної температури б/р, с; що значно перевищує середню щільність теплового потоку ГС від прийнятого значення 0,05 Вт/м<sup>2</sup>.

У такому разі виникають такі питання:

- 1) про геофізику зареєстрованого теплового потоку;
- 2) про максимальну можливу щільність теплового потоку, від яких фізичних і технологічних параметрів вона залежить?

<sup>1</sup> Під час тривалого буріння свердловини щільність теплового потоку збільшується [Карпенко В. М. та ін., 2015].



**Рис. 1.** Характеристики температури бурового розчину (б/р) на вибої, усті та в приймальних ємностях під час промивання св.189 родовища Карадаг залежно від часу [Кулиев С. М. та ін., 1968]:

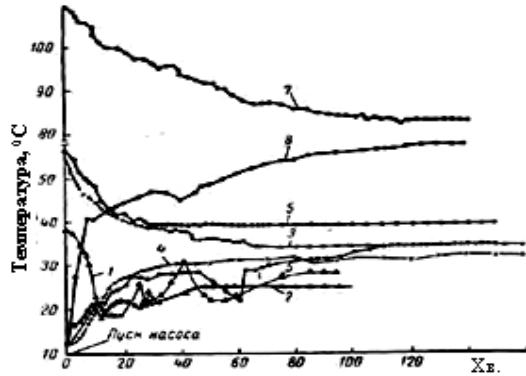
- 1 – вибійна температура на глибині 1800 м;
  - 2 – температура на усті при глибині 1800 м;
  - 3 – температура на вході нагнітальної лінії при промивці на глибині 1800 м;
  - 4 – вибійна температура на глибині 3765 м;
  - 5 – температура на усті при промивці на глибині 3765 м.
- Продуктивність насосів 30 л/с, обсадна колона – Ø299 мм, бурильна колона – Ø141 мм, теплоємність б/р 3000 Дж/кг/°С, густина б/р 1,3 г/см<sup>3</sup>

**Fig. 1.** Characteristics of the temperature of the drilling mud (d/m) on the bottom, mouth and in the receiving tanks when washing the well 189 Karadag field, depending on the time [Kuliev S. M., 1968]:

- 1 – The temperature at the depth of 1800 m;
  - 2 – temperature at the mouth at a depth of 1800 m;
  - 3 – the temperature for the inlet of the injection line when flushing at a depth of 1800 m;
  - 4 – a whipping temperature at a depth of 3765 m;
  - 5 – the temperature at the mouth at washing at a depth of 3765 m.
- The flow rate of the pumps is 30 l/s, the casing column – Ø299 mm, the drill column – Ø141 mm, the heat capacity d/m 3000 J/kg°C, the d/m density 1.3 g/cm<sup>3</sup>

Аналогічні дослідження ФГЕ виконувалися на Гавайських островах у 1991 р. Результати досліджень наведені в роботі [Morita K., 1992]. Свердловина мала такі параметри: ГС – базальт, глибина 879,6 м (встановлений цементний міст), альтитуда 180 м, рівень ґрунтових вод на глибині 186 м, температура на вибої 110,4 °С, діаметр обсадної колони (ОК) Ø = 177/157 мм, діаметр бурильної колони (БК) Ø = 89/56 мм, свердловина термоізольована, продуктивність води 80 л/хв. На рис. 4 наведено характеристики температури води,

що нагніталася з постійною температурою 25 °С і виходила із свердловини протягом 7 діб. Результати досліджень показали охолодження ГС на вибої в процесі циркуляції води від 91 °С до температури 45 °С під час закачування води з постійною температурою 25 °С.



**Рис. 2.** Залежність температури бурового розчину (б/р) на вибої і усті від часу промивання свердловини [Кулиев С. М. та ін., 1968]:

1, 2 – св. 291 родовища Карадаг на глибині 1071 м; 3, 4 – св. 135 родовища Карабагли на глибині 2700 м; 5, 6 – св. 169 родовища Карабагли на глибині 3150 м; 7, 8 – св. 10 родовища Текчай на глибині 3750 м

**Fig. 2.** Dependence of the temperature of the drilling mud (d/m) at the bottom and mouth for the duration of well washing [Kuliev S. M., 1968]:

1, 2 – well 291 of the Karadag deposit at a depth of 1071 m; 3, 4 – well 135 deposits of Karabagli at the depth of 2700 m; 5, 6 – well 169 deposits of Karabagli at a depth of 3150 m; 7, 8 – well 10 deposits of Tekach at a depth of 3750 m.

Автори роботи [Morita K, Bollmeier W. S., Mizogami H. 1992] стверджують доцільність використання геотермальної енергії “сухих” гірських порід за технологією ISW-EGT для потреб суспільства. Так, встановлена за формулою (1) щільність теплового потоку для води масою 13715,81 кг, що перебуває в свердловині на протязі часу 17325,67 с нагрівається від 25 °С до 45 °С становить<sup>2</sup>

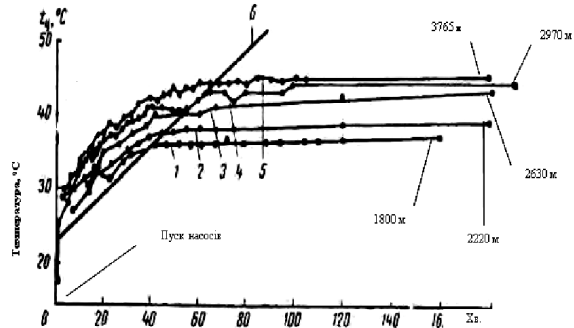
$$n = \frac{M_c c \Delta T_c}{p D L \Delta t} = \frac{13715,81 \cdot 4200 \cdot (45 - 25)}{3,14 \cdot 0,177 \cdot 879,6 \cdot 17325,67} = 136 \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

Наведені дослідження підтверджують справедливість одночасного існування моделей “гарячої” і “холодної” Землі.

<sup>2</sup> Припущення: температура води на вибої дорівнює температурі води на усті, оскільки для нормального геотермального градієнту 0,03 °С/м, обумовленого геостатичним стисненням, температура Дебая ГС на глибині 879,6 м становить 51,4 °С.

Для геологічних умов України перші прямі дослідження ФГЕ наведено в роботі авторів [Стародуб Ю. П., Карпенко В. М., 2012, 2015, 2016].

*Постановка проблеми.* Дослідити максимальні значення щільності теплового потоку у глибокій свердловині під час її промивання.

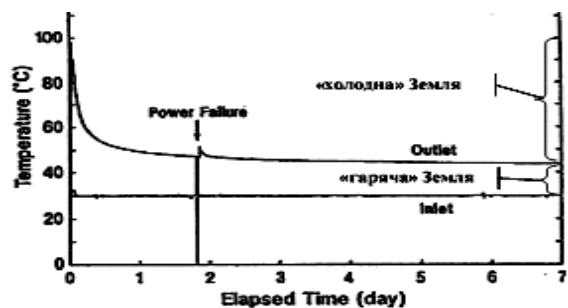


**Рис. 3.** Характеристики температури б/р на усті залежно від часу ввімкнення насосів [Кулиев С. М. та ін., 1968]:

1 – св.189 родовища Карадаг на глибині 1800 м; 2–4 – св. 216 родовища Карадаг на глибинах 2220 м, 2630 м, 2970 м; 5 – св. 189 родовища Карадаг на глибині 3765 м; 6 – границя зон між перехідними і сталими температурами. Продуктивність насосів 20–24 л/с.

**Fig. 3.** Characteristics of the d/m temperature on the mouth, depending on the pumping time after the switching of the pumps [Kuliev S. M., 1968]:

1 – well 189 deposits at Karadag, a depth of 1800 m; 2–4 – well 216 deposits at Karadag, depths of 2220 m, 2630 m, 2970 m; 5 – well 189 deposits at Karadag a depth of 3765 m; 6 – the boundary of zones between transient and constant temperatures, flow rate of pumps 20–24 l / s.



**Рис. 4.** Температура води на вході і виході в ГС

**Fig. 4.** Water temperature at the inlet and outlet of the borehole

Експериментальні дослідження за схемою на рис. 5 проведено на свердловині № 2 Водянівської площі (бурильна колона (БК) без долота). Вхідні дані наведено в табл. 1. Отримані експериментальні характеристики зміни температури б/р в циркуляційній системі наведено на рис. 6.

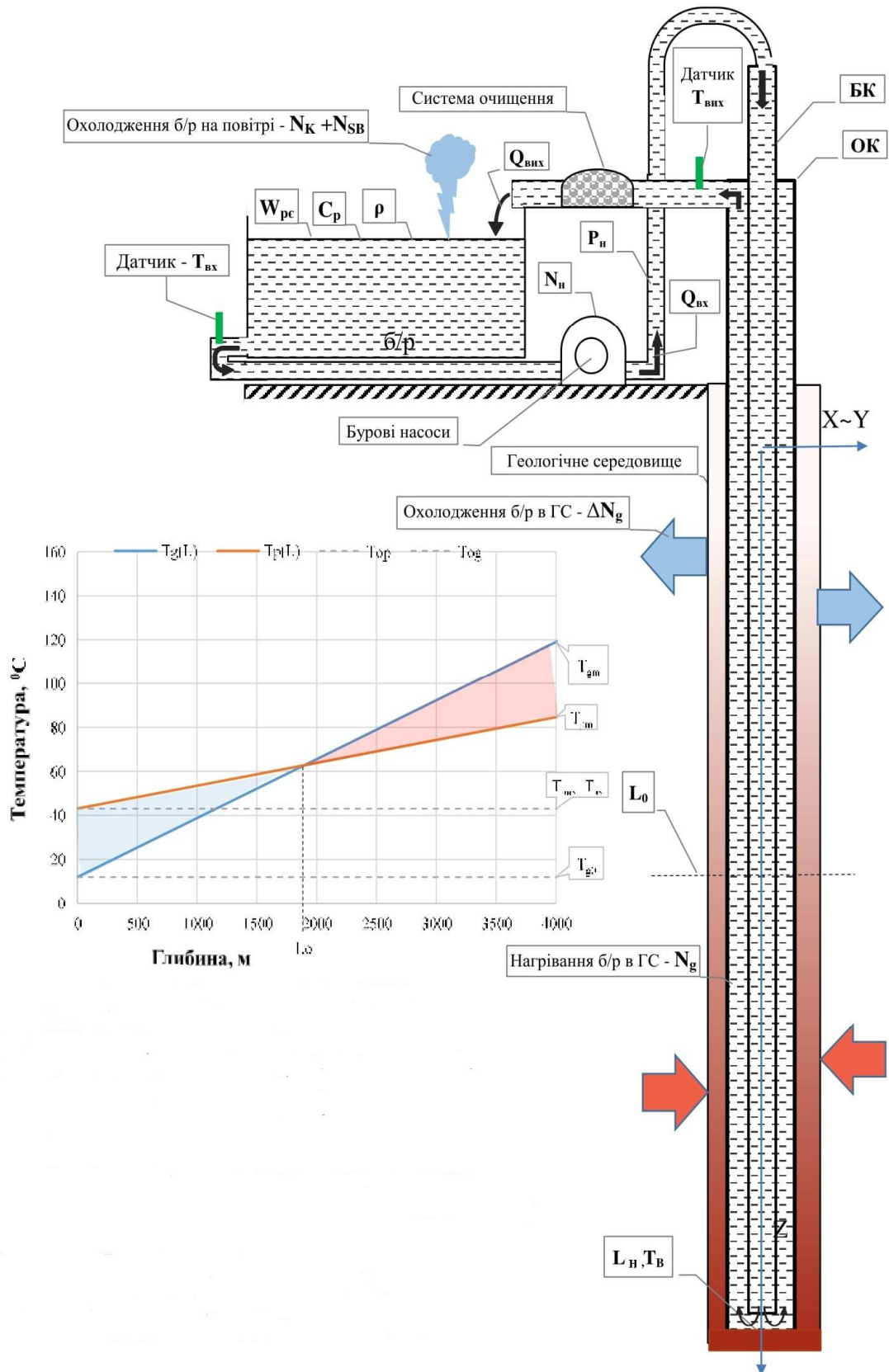


Рис. 5. Схема і характеристики дослідження геотермального фактора у св. № 2 Водянівської площі.

Fig. 5. Scheme and characteristics of the geothermal parameters study in the well № 2 of Vodyanivska area

**Технологічні параметри циркуляції б/р у св. № 2 Водянівської площі**  
*Technological parameters of circulation of drilling mud in the well № 2 of Vodyanivska area*

№	Параметр	Позначення	Значення	Міра
1	Температура зовнішнього повітря під час експерименту	$T_0$	0	°C
2	Температура на вибої	$T_{gm}$	106,3	°C
3	Глибина штучного вибою $\mathfrak{R}_m = \mathfrak{R}(x = d_{ok}, y = d_{ok}, z_m = L_m)$ – простір свердловини	$L_m$	3975	м
4	Глибина спуску бурильної колони	$L$	3937,27	м
5	Продуктивність бурових насосів (2 шт.)	$Q_{вих}, Q_{вх}$	41,8	л/с
6	Густина б/р	$\rho$	1255	кг/м <sup>3</sup>
7	Маса б/р за 1 с	$m$	52,459	кг/с
8	Температура б/р на вході в свердловину (промивка)	$T_{вх}$	49,65	°C
9	Температура б/р на виході з свердловини	$T_{вих}$	50,12	°C
10	Об'єм б/р у свердловині	$W_{pc}$	137,83	м <sup>3</sup>
11	Маса б/р у свердловині	$M_{pc}$	172,971	тонн
12	Об'єм б/р у приймальних ємностях $2 \times (2,5 \cdot 3 \cdot 7,6) + 36$ ( $x_0 = 2,5$ м; $y_0 = 7,6$ м; $z_0 = 3$ м) $\in \mathfrak{R}_0 = \mathfrak{R}(x_0, y_0, z_0)$	$W_{pe}$	150	м <sup>3</sup>
13	Маса б/р у приймальних ємностях	$M_{pe}$	188,25	тонн
14	Питома теплоємність б/р	$C_p$	3531,76	Дж/кг/К
15	Маса приймальних ємностей	$M_e$	111,758	тонн
16	Діаметр труб обсадної колони (ОК) (зовнішній)	$D_{ok}$	245	мм
17	Діаметр труб обсадної колони (ОК) (внутрішній)	$d_{ok}$	221	мм
18	Діаметр труб бурильної колони (БК) (зовнішній)	$D_{bk}$	127	мм
19	Діаметр труб бурильної колони (БК) (внутрішній)	$d_{bk}$	109	мм
20	Маса колони бурильних труб	$M_{bk}$	112,825	тонн
21	Питома теплоємність металу теплоємностей і БК	$C_{Fe}$	460	Дж/кг/К
22	Швидкість руху б/р у просторі труб БК	$V_{bk}$	4,482	м/с
23	Швидкість руху б/р у між трубному просторі ОК і БК	$V_{ok}$	1,628	м/с
24	Довжина БК, яку займає б/р об'ємом	$l_{bk}$	4,50	м
25	Довжина ОК, яку займає б/р об'ємом	$l_{ok}$	1,551	м
26	Площа теплообмінну в БК для б/р об'ємом 41,8 л/с	$s_2$	0,0127	м <sup>2</sup>
27	Площа теплообмінну в ОК для б/р об'ємом 41,8 л/с	$s_1$	0,047	м <sup>2</sup>
28	Загальний час руху б/р у просторі БК – $t_2$ ( $L = 3975$ м)	$t_2$	878,5	с
29	Загальний час руху б/р у просторі ОК – $t_1$ ( $L = 3975$ м)	$t_1$	2418,78	с
30	Середній температурний градієнт ГС	$\gamma_g$	0,0264	°C/м
31	Тиск на викиді насосів під час	$P_n$	22	МПа
32	Потужність бурових насосів (2 шт.)	$N_n$	919,6	кВт
33	Час взаємодії б/р об'ємом 41,8 л/с з поверхнями труб	$t_0$	1	с
34	Загальна площа внутрішніх стінок БК	$S_{bk}$	1570,10	м <sup>2</sup>
35	Загальна площа внутрішніх стінок ОК	$S_{ok}$	3028,94	м <sup>2</sup>
36	Загальна площа приймальних ємностей	$S_e$	197,2	м <sup>2</sup>
37	Коефіцієнт конвективного теплообміну	$k$	25	Вт/(К·м <sup>2</sup> )

Теоретична характеристика температури б/р визначалася методом найменших квадратів за експериментальними даними (вибірка 7000 точок даних температури) для функції  $y(t) = a - be^{-gt}$ ,

де  $a, b, g$  – постійні коефіцієнти функції, з метою оцінки його максимальної температури в разі досягнення стаціонарного процесу теплообміну аналогічно до характеристик на рис. 1–3.

Отримана функція

$$y(t) = 70 + (26 - 70)e^{-0.0001385t}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

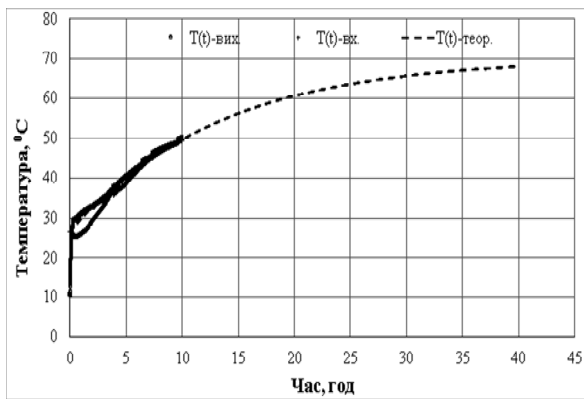
де  $a = 70, ^\circ\text{C}$ ;  $b = 44, ^\circ\text{C}$ ;  $g = 0,0001385$  – характеристика перехідного процесу,  $\text{c}^{-1}$ .

У роботі ставиться задача визначення фізичних параметрів коефіцієнтів  $a, b, g$  функції (3).

*Теоретичні дослідження.* З метою розв’язання задачі ідентифікації параметрів функції  $y(t) = a - be^{-gt}$  з фізичними параметрами процесу розроблено енергетичний метод теплообміну в системі “ГС–С–П” (геологічне середовище–свердловина–повітря). За формулою (1), без врахування внутрішнього теплообміну у свердловині, щільність теплового потоку у св. №2 сягає  $3519 \text{ Вт/м}^2$ .

*Фізична постановка задачі. Методологічні принципи методу:*

- 1) приток тепла від ГС у простір свердловини стаціонарний;
- 2) швидкість поширення тепла в моделі “гарячої” Землі набагато більша швидкості відтоку тепла з ГС у свердловину (наслідок першого принципу);
- 3) в енергетичному методі променевий теплообмін відбувається з урахуванням другого принципу.



**Рис. 6.** Характеристики температури бурового розчину під час промивання свердловини: на виході –  $T(t)_{\text{вих}}$ , вході –  $T(t)_{\text{вх}}$  і екстремальна –  $T(t)_{\text{теор}}$ , що визначена за методом найменших квадратів (вибірка 7000 точок), із свердловини для функції

$$y(t) = a - be^{-gt}$$

**Fig. 6.** Temperature of the drilling mud during the well wash: at the output –  $T(t)_{\text{вих}}$ , in the input –  $T(t)_{\text{вх}}$ , and the theoretical output temperature –  $T(t)_{\text{теор}}$  determined by the least squares method (sampling of 7000 points); from the well for function  $y(t) = a - be^{-gt}$

## Результати

### Енергетичний метод визначення геотермальної енергії в глибокій свердловині

Розроблення енергетичного методу оцінки геотермальної енергії, що генерує геологічне середовище в простір глибокої свердловини, який ізолюваний від пластових флюїдів і в якому циркулює промивальна рідина.

Введемо такі позначення:

$\mathfrak{R} \in [x, y, z]$  – загальний простір на земній поверхні і у свердловині, де має місце теплообмін,  $\text{м}^3$ ;

$\mathfrak{R}_0 \in [x_0, y_0, z_0]$  – простір на земній поверхні в приймальних ємностях,  $\text{м}^3$ ;

$\mathfrak{R}_c \in [x_c = d_{ok}, y_c = d_{ok}, z_c = L]$  – простір у свердловині,  $\text{м}^3$ ;

$\mathfrak{R}_{c+} \in [x_c = d_{ok}, y_c = d_{ok}, z_c = L_m > L > L_0]$  – простір у свердловині, що нагріває б/р,  $\text{м}^3$ ;

$\mathfrak{R}_{c-} \in [x_c = d_{ok}, y_c = d_{ok}, z_c = L < L_0]$  – простір у свердловині, що охолоджує б/р,  $\text{м}^3$ ;

$\mathfrak{R}_{c0} \in [x_c = d_{ok}, y_c = d_{ok}, z_c = 0]$  – простір на усті,  $\text{м}^3$ ;

$\mathfrak{R}_{cm} \in [x_c = d_{ok}, y_c = d_{ok}, z_c = L_{cm}]$  – простір на вибої,  $\text{м}^3$ ;

$L_0$  – глибина, менше від якої відбувається поглинання тепла холодними шарами ГС, м;

$L_m$  – глибина, де генерація теплової енергії гарячими шарами ГС дорівнює розсіяній тепловій енергії в холодних шарах ГС і у відкритому просторі на поверхні Землі, м;

$\mathfrak{R}_{G-} \in [x_g = D_g, y_g = D_g, z_c = L < L_0]$  – геологічний простір навколо свердловини, що забирає тепло від б/р,  $\text{м}^3$ ;  $D_g$  – діаметр ГС, яке нагрівається;

$\mathfrak{R}_{G+} \in [x_g = D_g, y_g = D_g, z_c = L_m > L > L_0]$  – геологічний простір навколо свердловини, що віддає тепло у простір свердловини,  $\text{м}^3$ ;  $D_g$  – діаметр ГС, яке охолоджується<sup>3</sup>.

Для розв’язання задачі скористаємося загальним енергетичним рівнянням теплообміну у вигляді

$$Q_g(t, \mathfrak{R}_{c+}) = \underset{\text{генерація тепла}}{\Delta U_p(t, \mathfrak{R}_0)} + \underset{\text{розсіювання тепла}}{\Delta Q_p(t, \mathfrak{R}_{c-})} + \underset{\text{поглинання тепла}}{\Delta Q_m(t, \mathfrak{R})} + \text{Дж}, \quad (4)$$

де  $Q_g(t, \mathfrak{R}_{c+})$ ,  $\Delta Q_g(t, \mathfrak{R}_{c-})$  – загальна кількість тепла, що виділяє гаряча і споживає холодна частина ГС навколо свердловини за одиницю часу  $t$ , Дж;

<sup>3</sup> Приймається, що  $\mathfrak{R}_{G+} \approx \mathfrak{R}_{G-}$ , які розділяються  $L_0$ .



де  $\frac{N_{g\uparrow\downarrow}(\mathfrak{R}_{C+})}{\Sigma A(\mathfrak{R})} = T_{pm}$  – максимальна температура

б/р на земній поверхні, °С

Загальна потужність нагрівання б/р у свердловині визначається рівнянням вигляду

$$N_{g\uparrow}(t, \mathfrak{R}_{C+}) = \frac{2p}{k_n} \int_{L_0}^{L_m} \{T_{0g}(t, z=L_0) + g_g z\} dz -$$

$$- \frac{2p}{k_n} \int_{L_0}^{L_m} \{T_{op}(t, z=L_0) + g_p(t)z\} dz =$$

$$= \frac{p}{k_n} [g_g - g_p(t)] (L_m^2 - L_0^2) \Big|_{T_{0g}(t, z=L_0)=T_{op}(t, z=L_0)} ;$$

$$k_n = \frac{1}{I_{Fe}} \ln \left( \frac{D_{ok}}{d_{ok}} \right) + \frac{1}{I_g} \ln \left( \frac{D_g}{D_{ok}} \right) + \beta \beta \approx 0 ;$$

$N_{g\downarrow}(\mathfrak{R}_{C+}) = \beta T_p(\mathfrak{R}_{C+})$  – зворотна потужність теплової енергії, що повертається в свердловину, Вт;

$\beta$  – тепловий опір для поверхні “б/р-сталь”.

Загальна тепловіддача для встановленої максимальної температури  $T_{pm}$  б/р у свердловині і приймальних ємностях визначається рівнянням вигляду

$$\Sigma A(t, \mathfrak{R}) = \frac{N_{SB}(t, \mathfrak{R}_0) + N_K(t, \mathfrak{R}_0)}{T_{pm}} +$$

$$+ \frac{N_{\Delta g}(t, L < L_0) + \Delta N_g(t, \mathfrak{R}_{C-})}{T_{pm}},$$

де загальна потужність охолодження б/р у свердловині визначається рівнянням вигляду

$$N_{\Delta g}(z) = \frac{2p}{k_o} \int_0^{L_0} [(T_{0g} + g_g z) - \{T_{0p}(t) + g_p(t)z\}] dz =$$

$$= \frac{2p}{k_o} \{ [T_{0g} - T_{0p}(t)] L_0 + 0,5 L_0^2 [g_g - g_p(t)] \},$$

$$k_o = \frac{1}{I_{Fe}} \ln \left( \frac{d_{ok}}{D_{ok}} \right) + \frac{1}{I_g} \ln \left( \frac{D_{ok}}{D_g} \right) + \beta \beta \approx 0.$$

Загальна потужність охолодження б/р у приймальних ємностях визначається рівняннями вигляду

$$N_{SB}(t, \mathfrak{R}_0) + N_K(t, \mathfrak{R}_0),$$

де  $N_{SB}(t, \mathfrak{R}_0) = s [T_{0p}^4(t, \mathfrak{R}_0) - T_0^4] S_e$  для закону Стефана–Больцмана, Вт,

$N_K(t, \mathfrak{R}_0) = k S_e [T_{op}(t, \mathfrak{R}_0) - T_0]$  – для конвективного теплообміну, Вт;

$g(t, \mathfrak{R}) = \frac{\Sigma A_i(t, \mathfrak{R})}{\Sigma E_i(t, \mathfrak{R})}$  – загальна частота процесу стабілізації теплообміну, с<sup>-1</sup>;

$1/g(t, \mathfrak{R})$  – постійна часу нагрівання системи “ГС–С–П”, с;

$\Sigma E_i(t, \mathfrak{R}) = m_p(\mathfrak{R}_c) c_p + m_p(\mathfrak{R}_0) c_p + m_{ок}(\mathfrak{R}_c) c_{Fe} + m_{ок}(\mathfrak{R}_c) c_{Fe} + m_e(\mathfrak{R}_0) c_{Fe} + m_g(L < L_0) c_g$  – загальна ентропія елементів системи “ГС–С–П”, Дж/°С;

$$\Delta N_g(t, \mathfrak{R}) = \frac{dU(t, \mathfrak{R})}{dt} = \beta c_p \Delta T(\mathfrak{R}_C) –$$

теплова потужність, що виноситься б/р з гарячої частини простору свердловини до холодної і далі на земну поверхню в приймальні ємності, Вт,

де  $\Delta T(\mathfrak{R}_C) = T_{pm}(\mathfrak{R}_{Cm}) - T_{p0}(\mathfrak{R}_{C0})$  – різниця температур між вхідним і вихідним з свердловини б/р (заресстрована різниця 0,025 °С);

$\beta = 5,9 \cdot 10^{-6}$  – встановлений температурний градієнт б/р, °С/м.

Невідомим параметром в рівнянні (6) є:  $L_0$  – глибина, де температури б/р і ГС співпадають, що дозволяє встановити однозначний зв’язок даних параметрів наступним рівнянням

$$\begin{cases} T_g(z=L_0) = T_{0g} + g_g L_0 \\ T_p(z=L_0) = T_{0p} + g_p(t) L_0 \end{cases} \Rightarrow L_0 = \left( \frac{T_{0p} - T_{0g}}{g_g - g_p(t)} \right), \quad (7)$$

та визначити параметр  $L_0$  з рівняння (5), представленого у вигляді

$$\frac{p}{k_n} [g_g - g_p(t)] (L_m^2 - L_0^2) - N_{g\downarrow}(\mathfrak{R}_{C+}) =$$

простір нагрівання ГС

$$= \frac{2p}{k_o} \{ [T_{0g} - T_{0p}(t)] L_0 + 0,5 L_0^2 [g_g - g_p(t)] \} + , \quad (8)$$

простір охолодження ГС

$$+ N_{\Sigma}(t, \mathfrak{R}),$$

простір охолодження на земній поверхні

де

$$N_{\Sigma}(t, \mathfrak{R}) = N_{SB}(t, \mathfrak{R}_0) + N_K(t, \mathfrak{R}_0) +$$

$$+ \beta c_p L_m [g_g - g_p(t)].$$

З рівняння (8) виводиться рівняння для визначення параметру  $L_0$  вигляду

$$L_0^2 + C_1 L_0 + C_0 = 0, \quad (9)$$

де

$$C_1 = 2k_n \frac{[T_{0g} - T_{0p}(t)]}{(k_o + k_n) [g_g - g_p(t)]},$$

$$C_0 = k_n \frac{k_o N_{\Sigma}(t, \mathfrak{R}) + k_o N_{g\downarrow}(\mathfrak{R}_{C+}) - \frac{p k_o}{k_n} [g_g - g_p(t)] L_m^2}{(k_o + k_n) p [g_g - g_p(t)]},$$

$$L_{01,2} = 0,5 C_1 \pm \sqrt{0,25 C_1^2 + C_0}.$$

Для теплопровідності флюїдонасичених гірських порід (пісковиків, алевролітів, аргілітів, вапняків) наближених до пластових умов, які наведені на рис. 7, для тиску 100 МПа було прийняте середнє значення  $\lambda = 3,98, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .



**Наукова новизна**

Диференціальне рівняння (5) разом з рівнянням (9) дозволяють досягти поставленої мету через розв'язання задачі ідентифікації експериментальних даних з теоретичними даними, як оберненої термодинамічної задачі.

З метою розв'язання оберненої задачі: визначення геофізичних параметрів системи "ГС–С–П" скористаймося результатами, що отримані методом найменших квадратів  $T_{pm} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $g = 0.0001385 \text{ c}^{-1}$  для визначення функції (3) і системою рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\sum N(t, \mathcal{R})}{g(t, z) \cdot [\sum E_i(t, \mathcal{R})]} = T_{pm} \\ \frac{\sum A_i(t, \mathcal{R})}{\sum E_i(t, \mathcal{R})} = g(t, \mathcal{R}) \\ \frac{\sum N(t, \mathcal{R})}{T_{pm}} = \sum A_i(t, \mathcal{R}) \end{cases}, \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned} \sum N(t, \mathcal{R}) = & N_{SB}(t, \mathcal{R}_0) + N_K(t, \mathcal{R}_0) + \\ & + N_{\Delta g}(t, L < L_0) + \Delta N_g(t, \mathcal{R}_{C-}) \end{aligned}$$

або

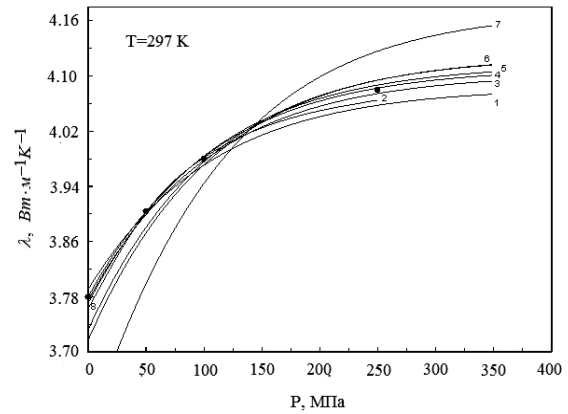
$$\sum N(t, \mathcal{R}) = N_{g\uparrow\downarrow}(t, \mathcal{R}_{C+})_{t \rightarrow \infty}$$

Система рівнянь (10) дає змогу визначити невідомі енергетичні параметри, а саме, максимальну геотермальну енергію, яку генерує геологічне середовище у простір свердловини за заданого режиму циркуляції промивальної рідини, теплову енергію, яку поглинають верхні шари ГС і яка є потенціальною енергією для промислового використання разом з енергією, що розсіюється на земній поверхні.

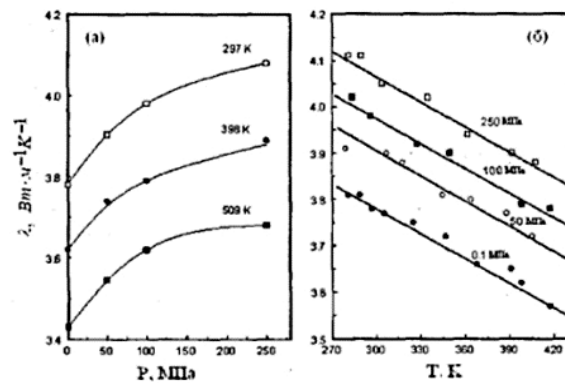
Енергетичний метод дав змогу оцінити реальний ККД для цього експерименту і потенціальний, який можна досягти під час видобування геотермальної енергії технологією ISW-EGS.

Окремим результатом досліджень є виявлена стабільна значна щільність теплового потоку, що спостерігається в глибокій свердловині з боку гірських порід. Таку щільність теплового потоку можна пояснити на основі закону Стефана–Больцмана для інфрачервоного хвильового (ІЧХ) поля, яке утворюють нагріті гірські породи за двома фізичними механізмами. Перший – поглинання гірськими породами і пластовими флюїдами ІЧХ власного теплового поля Землі, що утворюється в її надрах. Другий – термопружний механізм, що виникає в наслідок всебічного геостатичного стиску.

Визначені геотермофізичні параметри системи "ГС–С–П" наведено в табл. 2.



а



б

**Рис. 7.** Характеристики залежності теплопровідності водонасичених пісковиків (13 %) [Абдулагатова З. З., 2012; Курбанов А. А., 2007]:

а – 1–7 різні моделі з середніми експериментальними даними; б – експериментальні дані за різних ізобарів і ізотермів, відповідно

**Fig. 7.** Water-saturated sandstones dependence on thermal conductivity (13 %) [Abdulagatova Z. Z., 2012; Kurbanov A. A., 2007]: a – 1–7 different models with average experimental data; b – experimental data for various isobars and isotherms, respectively

**Практична значущість**

Визначені енергетичні параметри процесу теплообміну між гірськими породами і промивальною рідиною у просторі глибокої свердловини під час її циркуляції свідчать про енергетичну ідентичність теплової потужності геотермальної глибокої свердловини з газовою свердловиною продуктивністю 27 тис. м<sup>3</sup>/добу. У роботах [Карпенко В. М. і ін., 2015 р., 2016 р.] автори довели, що собівартість геотермальної однієї Гкал удвічі менша за собівартість газової за однакових витрат на буріння свердловин.

Таблиця 2  
**Геофізичні параметри системи “ГС-С-П”**  
 у св. № 2 Водянівської площі

Table 2  
**Geophysical parameters of the system**  
**“geological medium-well-air” in the well № 2**  
**of Vodyanivska area**

№	Назва параметра	Позначення	Значення	Розмірність
1	ККД фактичний	%	1,26	
2	ККД максимальний (зворотна потужність 50 %)	%	50	
3	Загальна теплова потужність ГС	$N_{g\uparrow}(t, \mathcal{R}_{C+})$	28,87	МВт
4	Зворотна потужність	$N_{g\downarrow}(t, \mathcal{R}_{C+})$	12,97	МВт
5	Втрати теплової потужності в ГС	$N_{\Delta g}(t, L < L_0)$	13,88	МВт
6	Втрати потужності від конвекції (15 Вт/С/м <sup>2</sup> )	$N_K(t, \mathcal{R}_0)$	0,207	МВт
7	Втрати потужності від променів	$N_{SB}(t, \mathcal{R}_0)$	0,154	МВт
8	Активна потужність, що нагріває б/р на земній поверхні	$\Delta N_g(t, \mathcal{R}_{C-})$	4604,5	Вт
9	Щільність теплового потоку	$n$	4817,7	Вт/м <sup>2</sup>
10	Діаметр теплового живлення в ГС	$D_g$	274,4	мм
11	Глибина температурного балансу	$L_0$	1900	м
12	Ентропія системи “ГС-С-П”	$\sum E_i(t, \mathcal{R})$	15,46	ГДж/°С
13	Теплоємність ГС прийнята	$c_g$	960	Дж/кг/°С
14	Теплоємність сталі (Fe)	$c_{Fe}$	460	Дж/кг/°С
15	Щільність ГС	$\rho_g$	2600	кг/м <sup>3</sup>
16	Щільність сталі	$\rho_{Fe}$	7800	кг/м <sup>3</sup>
17	Середня температура у свердловині до промивання	$T_{ср}$	58,15	°С
18	Середня температура у свердловині при стаціонарному промиванні	$T_{pm}$	70	°С

**Висновки**

Досліджені енергетичні параметри фактора геотермальної енергії мають промислове значення.

Потенціальна теплова потужність системи “ГС-С-П” становить 50 % від загальної теплової потужності і може сягати більше ніж 10 МВт.

Одним фізичним поясненням значної щільності теплових потоків на глибинах ГС є об’ємна щільність інфрачервоних хвиль (ІЧХ), яка для

100 °С гірських порід за законом Стефана–Больцмана сягає 12 кВт/м<sup>2</sup>, а відомі середні значення теплових потоків на рівні 50 мВт/м<sup>2</sup> є наслідком поглинання гірськими породами ІЧХ у вузькому діапазоні. Флюїди мають діапазон поглинання ІЧХ значно ширший, чим і пояснюється існування геотермально активно зон на території України, де розташовані всі поклади нафти і газу. Тобто, температура ГС є наслідком поглинання ІЧХ гірськими породами і флюїдами. Так, для геотермального градієнту 0,03 °С/м закон Стефана–Больцмана дає значення щільності теплового потоку на рівні 0,11 Вт/м<sup>2</sup> за коефіцієнта чорноти ГС, який дорівнює 0,8, що однаково для теплопровідності ГС 3,69 Вт/м/°С (3,69×0,03 = 0,11 Вт/м<sup>2</sup>).

Другим фізичним поясненням генерації ІЧХ є зростання інтенсивності коливань атомів і молекул ГС за поступового зростання гравітаційної енергії з глибиною, яка змінює температуру Дебая у разі збільшення всебічного стиску. У цьому разі кожна точка ГС є стабільним генератором теплової енергії, яку можна зменшити тільки через зменшення геостатичного об’ємного тиску.

**Список літератури**

Абдулагатова З. З. Теплопроводность сухих и флюидонасыщенных горных пород при высоких температурах и давлениях. Эксперимент и моделирование : дис. ... канд. техн. наук / З. З. Абдулагатова. – Махачкала, 2012– 171 с.

Есьман Б. И. Влияние температуры на процесс бурения глубоких скважин / Б. И. Есьман, Г. Я. Дедусенко, Е. А. Яишникова. – М. : Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1962. – 153 с.

Карпенко В. М. Концепція методу енергетичного аналізу руху елементарних об’єктів літосфери Землі / В. М. Карпенко, Ю. П. Стародуб // Вісник Львів. ун-ту. Серія геологічна. – 2006. – Вип. 20. – С. 215–235.

Карпенко В. М. Метод динамічної термометрії / В. М. Карпенко, В. М. Стасенко // Нафтова і газова промисловість. – 2016. – № 3. – С. 30–37.

Карпенко В. М. Стан і перспективи використання глибоких свердловин для забезпечення споживачів тепловою та електричною енергією / В. М. Карпенко, В. М. Стасенко, А. О. Михальчишин, В. М. Бенько, В. Л. Кушнарьов // Нафтова і газова промисловість. – 2015. – № 3. – С. 39–47.

Кузнецов В. В. Введение в физику горячей Земли. ИКИР, Камчатка, с. Паратунка, 2008. – 366 с.

Кулиев С. М. Температурный режим бурящихся скважин / С. М. Кулиев, Б. И. Есьман, Г. Г. Габузов. – М. : Недра, 1968. – 168 с.

Курбанов А. А. Закономерности изменения теплофизических свойств флюидосодержащих коллекторов при изменении температуры и

- порового давления : дис. ... д-ра техн. наук / А. А. Курбанов. – М. – 2007. – 279 с.
- Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Москва, 1979. – 417 с.
- Соловьёв В. В. Физика Земли: новый взгляд на некоторые проблемы / В. В. Соловьёв, В. В. Кузнецов, Н. Н. Семаков, В. Н. Доровский, П. Е. Котляр. – Новосибирск : Наука, 1989. – 128 с.
- Стародуб Ю. П. Аспекти оцінки та освоєння геотермальних ресурсів України / Ю. П. Стародуб, В. М. Карпенко, В. М. Стасенко, М. С. Нікорюк, О. В. Карпенко, В. Л. Рибчак // Геодинаміка. – 2012. – № 2(13). – С. 95–105.
- Geothermal power generation. Economically viable electricity generation through advanced geothermal energy technologies. Version February 2009. Bassfeld Technology Transfer. 17 ch. des Mollies/1293 Bellevue/Switzerland. www.bassfeld.eu Modeofaccess: [https://static.aminer.org/.../systems\\_in\\_technology\\_transfer\\_i](https://static.aminer.org/.../systems_in_technology_transfer_i). – Title from the screen. – Date of Access 01.07.2017.
- Morita K. W. S. Bollmeier, H. Mizogami An experiment to prove the concept of the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) in Hawaii // 1992. Transactions – Geothermal Resources Council, 16, pp. 9–16.
- Rebolo R., M. R. Zapareto Osorio, L. Martin Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster // Nature. – 1995. – Vol. 377.

В. М. КАРПЕНКО<sup>1</sup>, Ю. П. СТАРОДУБ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальная акционерная компания “Нафтогаз Украины”, ул. Богдана Хмельницкого, 6, Киев, 01601, Украина, тел. + 38 (066) 3814781, эл. почта: [intexnaftogaz@ukr.net](mailto:intexnaftogaz@ukr.net)

<sup>2</sup>Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, ул. Клепаривська, 35, Львов, 79000, Украина, тел. +38 067 2663182, эл. почта: [George\\_Starodub@yahoo.com](mailto:George_Starodub@yahoo.com)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ

**Целью** работы является разработка и исследование энергетического метода добычи геотермальной энергии из глубоких скважин, которую генерируют горные породы к внутреннему пространству скважин при циркуляции в них промывочной жидкости в различных мировых геологических условиях, включая Украину. **Методика** достижения цели включает результаты экспериментальных и теоретических исследований стационарного процесса притока тепла от геологической среды в пространство глубокой скважины при различной производительности буровых насосов, в различных геологических условиях, при различных свойствах промывочной жидкости. Исследования учитывали модели “холодной” и “горячей” Земли. Как **результат**, исследован теплообмен в глубоких скважинах в различных геологических условиях мира, изучены вопросы о физике зарегистрированного теплового потока, о максимально возможной плотности теплового потока и от каких физических и технологических параметров она зависит. Изучено действие фактора геотермальной энергии, влияющего со стороны горных пород на пространство скважины при циркуляции в ней промывочной жидкости при различной производительности насосов. Установлено, что значение плотности теплового потока от горных пород в скважину значительно превышают известные значения, которые определяются геофизическим законом теплопроводности Фурье на основе использования данных геотермального градиента. Предложено энергетический метод определения реальных энергетических характеристик фактора геотермальной энергии, который показал способность глубоких скважин генерировать тепловую энергию с промышленными значениями. Подтверждена правомерность моделей “холодной” Земли с уменьшением и “горячей” Земли со стабильными значениями температур на забое скважины. **Научная новизна** заключается в решении задачи идентификации параметров экспериментальной функции теплообмена системы геологическая среда-скважина-воздух с геофизическими параметрами процесса. На основе разработанного энергетического метода теплообмена в пространстве скважины, предоставлено научное объяснение увеличенному и уменьшенному значениям плотности тепловых потоков в процессах теплообмена в глубоких скважинах на основе “холодной” и “горячей” моделей Земли. **Практическая значимость** полученных результатов заключается в обосновании целесообразности и возможности построения геотермальных станций с промышленной мощностью добычи геотермальной энергии, которые используют отдельные изолированные от пластовых флюидов глубокие скважины.

*Ключевые слова:* глубокие скважины, геологическая среда, геотермальная энергия, промышленные значения.

V. M. KARPENKO<sup>1</sup>, Yu. P. STARODUB<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Natsionalna aktsionerna kompaniia "Naftohaz Ukrainy", 6, Bohdana Khmelnytskoho Str., Kyiv, 01601, Ukraine, tel. +38(066)3814781, e-mail: intexnaftogaz@ukr.net

<sup>2</sup> Lviv State University of Life Safety, 35, Kleparivska str., Lviv, 79000, Ukraine, tel. +38 067 2663182, e-mail: George\_Starodub@yahoo.com

#### RESEARCH OF GEOTHERMAL ENERGY PARAMETERS IN DEEP WELLS

**The aim** of the work is to develop and study an energy method for extracting geothermal energy from deep wells, which is generated by rocks to the internal space of wells during the circulation of the washing fluid in it in different geological conditions of the world, and in particular in Ukraine. **The method** of achieving the goal includes the results of experimental and theoretical studies of the stationary process of heat flow from the geological environment to the space of the deep well in the various productions of drill pumps, in different geological conditions, with different properties of the washing liquid. The research took into account the models of "cold" and "hot" Earth. The investigation included the heat transfer in deep wells in different geological conditions of the world, and studied the questions about the physics of the measured heat flux, the maximum possible density of the heat flux, and their dependent physical and technological parameters. The influence of the geothermal energy factor on the part of rocks in the space of the well during the circulation of the washing liquid in it at various pump outputs was studied. It is established that the value of the density of the heat flux from the rocks in the well significantly exceeds the known values that are determined by the geophysical law of the Fourier thermal conductivity on the basis of the use of geothermal gradient data. The energy method for the determining of the real energy characteristics of the geothermal energy factor, which show the ability of deep wells to generate thermal energy for commercial use is proposed. The legitimacy of "cold" Earth models with a decrease and "hot" Earth with stable values of temperatures for the well hole is confirmed. **The scientific novelty** consists in solving the problem of identifying the experimental parameters of the heat transfer system in the borehole with the geophysical parameters of the process, on the basis of the developed energy method of heat transfer in the space of the well. This provided a scientific explanation of the increased and reduced value of the density of heat fluxes in the processes of heat transfer in deep wells based on the "cold" and "hot" models of the Earth. **The practical significance** of the results obtained substantiated the feasibility of building geothermal plants with an industrial capacity for the extraction of geothermal energy based on the use of separate insulating layers in deep wells.

*Keywords:* deep wells, geological environment, geothermal energy, industrial values.

#### REFERENCES

- Abdulagatova Z. Z. *Teploprovodnost' suhih i fljuidonasyshhennyh gornyh porod pri vyso-kih temperaturah i davlenijah. Jeksperiment i modelirovanie* [Thermal conductivity of dry and fluid-rich rocks at high temperatures and pressures. Experiment and simulation]. Disertacija k.t.n. [The thesis Ph.D.] 2012. Mahachkala [Makhachkala]. 171 p. (in Russian).
- Es'man B. I., Dedusenko G. Ja., Jaishnikova E. A. *Vlijanie temperatury na process burenija glubokih skvazhin* [Effect of temperature on the process of drilling deep wells]. Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo neftjanoj i gorno-toplivnoj literatury: [State Scientific and Technical Publishing House of Petroleum and Mining Fuel Literature]. Moscow, 1962, 153 p. (in Russian).
- Karpenko V. M., Stasenko V. M. *Metod dinamichnoj termometrii* [The method of dynamic thermometry]. *Naftova i gazova promislovist'* [Oil and gas industry]. 2016, no. 3, pp. 30–37.
- Karpenko V. M., Stasenko V. M., Mihal'chishin A. O., Ben'ko V. M., Kushnar'ov V. L. *Stan i perspektivi vikoristannja glibokih sverdlovin dlja zabezpechennja spozhi-vachiv teplovoju ta elektrichnoju energiju* [Status and prospects of use of deep wells for providing consumers with thermal and electric energy]. *Naftova i gazova promislovist'* [Oil and gas industry]. 2015, no. 3, pp. 39–47. (in Ukrainian).
- Karpenko V. M., Starodub Ju. P. *Koncepcija metodu energetichnogo analizu ruhu elementarnih ob'ektiv litosferi Zemli* [The concept of the method of energy analysis of the motion of elementary objects of the Earth's lithosphere]. *Visnik L'viv. un-tu* [Visnyk Lviv University]. *Seriya geologichna* [Geological series]. Issue 20, 2006, pp. 215–235 (in Ukrainian).
- Kuliev S. M., Es'man B. I., Garbuzov G. G. *Temperaturnyj rezhim burjashhihsja skvazhin* [Temperature regime of drilling wells]. Moscow: Nedra, 1968, pp. 168. (in Russian).
- Kurbanov A. A. *Zakonomernosti izmenenija teplo-fizicheskikh svojstv fljuidosoderzhashhih kollektorov pri izmenenii temperatury i porovogo davlenija* [Regularities in the change in the thermophysical properties of fluid-containing reservoirs as the temperature and pore pressure change]. *Disertacija dok-ra.teh.nauk* [The thesis of the doctor of technical sciences]. Moscow. 2007, 279 p. (in Russian).

- Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow. 1979, 417 p. (in Russian).
- Kuznecov V. V. *Vvedenie v fiziku gorjachej Zemli* [Introduction to the physics of hot Earth]. IKIR, Kamchatka, Paratunka, 2008. 366 p. (in Russian).
- Solov'jov V. V., Kuznecov V. V., Semakov N. N., Dorovskij V. N., Kotljar P. E. *Fizika Zemli: novyj vzgljad na nekotorye problem* [Physics of the Earth: A New Look at Some Problems]. Novosibirsk: *Nauka, Sibirskoe otdelenie* [Science, Siberian Branch]. 1989, 128 p. (in Russian).
- Starodub Y. P., Karpenko V. M., Stasenko V. M., Nikoryuk M. S., Karpenko O. V., Rybchak V. L. *Aspekty ocinky ta osvojennya geotermal'nych resyrsiv Ukrainy* [Aspects of estimation and development of geothermal resources of Ukraine]. *Geodynamics*. 2012, no. 2(13), pp. 95–105 (in Ukrainian).
- Geothermal power generation. Economically viable electricity generation through advanced geothermal energy technologies. Version February 2009. Bassfeld Technology Transfer. 17 ch. des Mollies/1293 Bellevue/Switzerland [www.bassfeld.eu](http://www.bassfeld.eu) Mode of access: [https://static.aminer.org/.../systems\\_in\\_technology\\_transfer\\_i](https://static.aminer.org/.../systems_in_technology_transfer_i). – Title from the screen. – Date of Access 01.07.2017.
- Morita K., Bollmeier W. S., Mizogami H. An experiment to prove the concept of the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) in Hawaii. 1992. *Transactions-Geothermal Resources Council*, 16, pp. 9–16.
- Rebolo R., Zapareto Osorio M. R., Martin L. Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster. *Nature*. 1995. Vol. 377.

Надійшла 26.04.2017 р.