УДК 556.0726.532.546+72

Г. М. Кононенко, *канд. техн. наук*
Київський національний університет
будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ФІЛЬТРАЦІЇ ВОДИ В ТРІЩИНІ ГІДРОРОЗРИВУ

Відомо, що в зв'язку низькою теплопровідністю глибинних гірських порід для забезпечення високої інтенсивності добування теплової енергії з допомогою підземних циркуляційних систем протягом довгого періоду необхідно, щоб система тріщин не тільки мала пропускну здатність, достатню для великої витрати води, але й охоплювала досить велику область масиву для конвектиного теплообміну між породами і течією води.

Одним з можливих способів створення каналів з низьким опором руху води і великою площею поверхні теплообміну є гідравлічний розрив масиву, якщо врахувати його порівняно низьку вартість, незначний вплив на навколишнє середовище та добре освоєну технологію впровадження. Найбільш сприятливим типом геотермічної системи в цьому випадку є одинична вертикально орієнтована плоска тріщина приблизно круглої форми, яка б забезпечувала стійкий рух теплоносія.

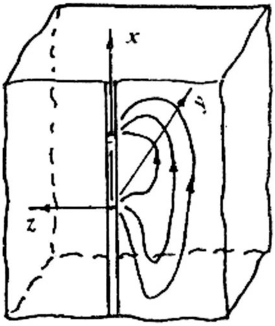

Рис. 1

Нехай у створеній таким способом циркуляційній системі відбувається фільтрація води для відбору тепла гірських порід. Залягання тріщини вважається настільки глибоким, що умови на денній поверхні не впливають на теплогідродинамічні процеси, що протікають в ній. Можлива зміна зяяння тріщини b, утворення нових тріщин в процесі експлуатації системи та втрати теплоносія через стінки тріщини в оточуючий гірський масив не враховуються. Крім того, фільтрація води в тріщині відповідає закону Дарсі, причому коефіцієнт фільтрації $k_{\text{Т}}$ визначається за формулою

$$k_{\text{Т}} = \frac{b^3 \Gamma}{12},$$

де Γ – густина тріщин.

Математичне формулювання задачі має вид (рис. 1):

$$div\, grad P = 0; \qquad z = 0 \tag{1}$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = C_п\, \rho_п \frac{\partial T}{\partial t}, \qquad z > 0 \tag{2}$$

$$\frac{2\lambda}{b}\frac{\partial T}{\partial z} - v_x C_P \frac{\partial T}{\partial x} - v_y C_P \frac{\partial T}{\partial y} = C_P \rho_P \frac{\partial T}{\partial t}; \; z = 0 \tag{3}$$

$$v_x = \frac{b^2}{12\nu}\left(-\frac{\partial P'}{\partial x} + \rho_0 g_x \beta \Delta T\right); \; v_y = \frac{b^2}{12\nu}\left(-\frac{\partial P'}{\partial y} + \rho_0 g_y \beta \Delta T\right);$$

$$\left.\frac{\partial P}{\partial r}\right|_{r = r_e} = \frac{6\nu Q}{\pi b^2 r_c}; \quad \left.\frac{\partial P}{\partial r}\right|_{r_1 = r_н} = -\frac{6\nu Q}{\pi b^2 r_c}; \quad \left.\frac{\partial P}{\partial n}\right|_{\Gamma_ф} = 0,$$

$$\left.T\right|_{r_1 = r_н} = T_в, \quad z = 0; \qquad \left.T\right|_{t = 0} = \left.T\right|_{z \to \infty} = T_0,$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad r = \sqrt{(R - x)^2 + y^2}.$$

Температура води в експлуатаційній свердловині

$$\theta_c = \frac{b}{Q}\int_{\Gamma_e} \theta_P \left(\vec{v} \cdot \vec{n}^0\right) d\Gamma_e,$$

•

а враховуючи значення скалярного добутку $\vec{v} \cdot \vec{n}^0$, температуру води на виході із системи можна обчислити за формулою

$$\theta_c = \frac{r_e}{\pi R}\int_0^{\pi}\left(v_x^* \cos\varphi + v_Y^* \sin\varphi\right)\theta_P(r_c, \varphi)\, d\varphi, \quad \left(x = r_c \cos\varphi; y = r_c \sin\varphi\right)$$

$$v_x^* = -\frac{2\pi b v_x}{Q}; \quad v_y^* = -\frac{2\pi b v_y}{Q},$$

де $\vec{n}^0$ – орт зовнішньої нормалі до контура експлуатаційної свердловини; $\vec{v}$ – вектор швидкості води $\vec{v} = v_x i + v_y j$; R – відстань між контуром нагнітання і контуром розвантажування (відстань між різноіменними свердловинами); P, T – відповідно тиск і температура води в тріщині.

Поставлена задача відповідає випадку, коли вода входить у вертикальну плоску тріщину в деякій фіксованій точці (контур "н") і рухається в ній за рахунок вимушеної і природної конвекції, а виходить із тріщини в іншій точці (контур "р"). Тепло поступає до теплоносія за рахунок кондукції від гарячого масиву з обох сторін тріщини.

Для дослідження гідротермодинамічних процесів тріщини і породах розроблено двовимірну різницеву модель і проведено чисельний експеримент для такої циркуляційної системи: радіус тріщини 500 м, початкова температура води $T_в$ = 50 °С, середня температура гранітного масиву 250 °С, значення геотермічного градієнта 0,05 °С, розкриття тріщини $b = 1$ мм. Теплоємність води приймалася постійною, а її густина $\rho_в$ і коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu_в$ визначались за такими формулами:

$$\rho_в = 1320 - 0{,}987\sqrt{1{,}05 \cdot 10^5 + (1{,}8T - 28)^2} \quad (кг/м^3),$$

$$\mu_в = \frac{1776 - (1{,}8T + 32)}{26{,}5(1{,}8T + 32)} \qquad (сПз).$$

При цьому область фільтрації покривається прямокутною різницевою сіткою, яка в області контурів нагнітання та розвантажування стикується з осесиметричною сіткою, що відповідає реальній течії теплоносія поблизу свердловин. Оскільки коефіцієнти, що входять в рівняння моделі, залежать від температури, то для розв'язання одержаного нелінійного різницевого рівняння організується ітераційний процес. На кожній ітерації, крім різницевого аналога задачі гідродинаміки, розв'язується також різницева задача конвективного теплообміну в області фільтрації і кондукції в масиві порід. Початкові значення T_0, ρ_0 і μ_0, необхідні для організації ітерацій, беруться з попереднього часового шару.

При цьому рівняння гідродинаміки представляється як рівняння нестаціонарної дифузії шляхом введення деякого фіктивного часу, а рівняння конвекції в кожній з областей розв'язується методом поділу на фізичні процеси.

"Склеювання" осесиметричної і прямокутної сіток здійснюється застосуванням інтерполяції.

Попередні результати чисельного експерименту представлені на рис. 2 у вигляді миттєвих ліній течії для різних моментів часу і чисел Грасгофа.

9*

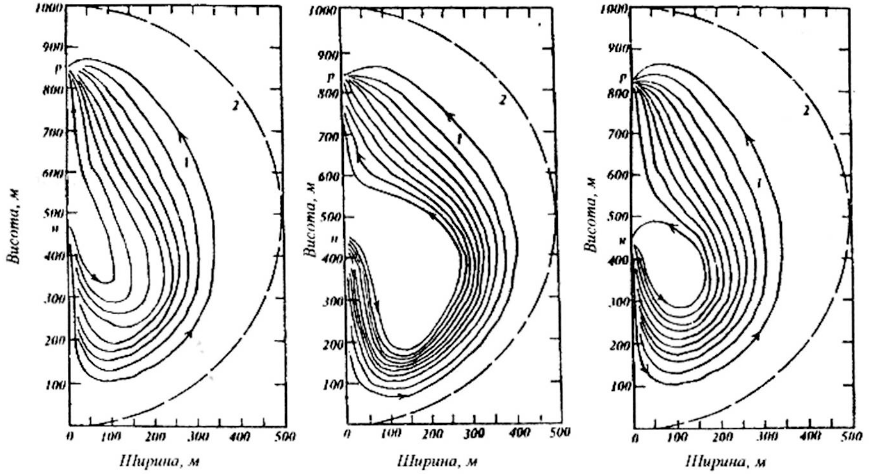

Рис. 2. Миттєві лінії течії для різних періодів і різних значеннях числа Грасгофа:
1 – лінії течії; 2 – зовнішня межа тріщини

Використана література

1. *Кононенко Г. М.* Комбинированные модели тепло- и масопереноса: принципы построения, структура, алгоритмы и методы их реализации. – К., 1985. – 64 с. (НАН України. Ін-т математики; 85–95).

2. *Кононенко Г. М., Вознюк Л. Ф.* Приближенные методы исследования тепло- и массопереноса в системах извлечения тепла Земли. – К., Наукова думка, 1975. – 139 с.