

УДК 620.91:004.94

Дослідження однофазної неізотермічної фільтрації в геотермальних циркуляційних системах

І. Е. Фуртат¹, О. М. Кравчук²

¹к.т.н., доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», м. Київ, Україна, i.e.furtat@gmail.com

²студ. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», м. Київ, Україна, o.m.kravchuk@ukr.net

Анотація. В даній статті розглянуто геометричну модель геотермального пористого пласту, основні допущення, які приймають при комп'ютерному моделюванні подібних систем та теплофізичну модель руху і теплообміну рідини в пористих тілах. Геометрична модель пласту побудована в програмному середовищі SolidWorks. Даний етап роботи є підготовчим. Він необхідний для проведення комп'ютерного моделювання температурного поля пласту. Подальші дослідження розподілу температури в пласті протягом певного періоду допоможуть оцінити час нормальної експлуатації (без втрати запланованої теплової потужності) геотермальної циркуляційної системи. Робота має дуже важливе практичне значення для промислового освоєння екологічно чистої технології використання геотермальних ресурсів шляхом створення циркуляційних систем. Результати можуть бути використані при оптимізації параметрів геотермальних установок.

Ключові слова: теплофізична модель, геотермальна циркуляційна система, температурне поле, однофазна фільтрація.

Вступ. Україна належить до енергодефіцитних країн і задовольняє потреби в первинних паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного видобутку не більше, ніж на третину (без урахування енергії атомних електростанцій). У зв'язку з цим використання відновлюваних джерел енергії є важливим напрямком енергетичної політики. Україна має значний потенціал геотермальних ресурсів, до яких відносять, насамперед, термальну воду та теплоту нагрітих сухих гірських порід. Крім того, до перспективних для використання в промислових обсягах можливо віднести ресурси термальної води, яка видобувається разом з нафтою та газом на відповідних родовищах. Згідно з прогнозними оцінками, технічно доступний потенціал енергії геотермальних вод дасть змогу виробляти щороку 13,5 млрд. кВт·год теплової енергії і 2,3 млрд. кВт·год електричної, що еквівалентно економії близько 2,0 млрд. м³ природного газу на рік.

Актуальність дослідження. Існуючі в Україні системи геотермальних циркуляційних систем (ГЦС) є недосконалими. Вони характеризуються невисоким дебітом свердловин (10-20 кг/с), при яких дана система теплопостачання є економічно не вигідною. Необхідні системи з більш ефективними методами перетворення геотермальної енергії. Тому розробка нових науково-технічних рішень щодо ефективного використання геотермальних ресурсів є актуальною задачею.

Останні дослідження та публікації. У роботі [1] розглядалася термогідродинамічна модель процесу неізотермічної фільтрації води та наведені дані чисельного моделювання температурного поля в пористому шарі. Результати комп'ютерного моделювання процесів теплообміну в підземному колекторі за

допомогою пакету Phoenixics представлено в роботі [2]. Однак, недостатня узгодженість отриманих даних потребує проведення додаткових досліджень.

Формулювання цілей статті. Важливим фактором при оцінці ефективності роботи геотермальної циркуляційної системи є період її експлуатації. Наразі відчувається дефіцит експериментальних даних про розподіл температури у водоносному пласті при довготривалому періоді експлуатації установки. У лабораторних умовах неможливо повністю відтворити реальні процеси, що протікають у підземних колекторах, а проведення натурних експериментів є економічно невигідним. Тому значну роль у дослідженні процесів, що протікають у геотермальних системах, відіграють методи чисельного моделювання.

Основна частина. Об'єкт дослідження – водоносний пористий пласт, який залягає на глибині 4200...4380 м від поверхні землі та обмежений непроникними гірськими масивами. Пласт сполучений з трубними системами для транспортування геотермальної води: три свердловини для підйому, інші три – для повернення та нагнітання теплоносія до пласта. Їхній внутрішній діаметр становить 0,196 м. У геотермальній системі відбувається циркуляція рідини в напрямку від нагнітальних свердловин до підйомних. Температура пласту в початковий момент становила 167 °С, тиск – 53 МПа. Максимальна витрата теплоносія у свердловині – 0,075 м³/с.

Оскільки з водоносного шару відбирається нагріта вода та закачується холодна – в системі виникає нестационарне поле температури та тиску. Пориста структура пласту є складною системою порожнин. У даному випадку пористість пласта становила 10 %, проникність – $0,5 \cdot 10^{-13}$. Фільтрація рідини в пласті відбувається з дуже маленькими швидкостями – порядку мікрометрів на секунду.

Модель геотермального пласту – це паралелепіпед розміром 135×90×6. Реальна модель зменшена в масштабі 1:20. Діаметр свердловин та витрата води у свердловинах не змінювались для зручності проведення комп'ютерного моделювання. Пласт з усіх боків обмежений шаром теплоізоляції. Схема водоносного шару з розміщеними свердловинами наведена на рис. 1.

При моделюванні були прийняті наступні припущення:

- пласт однорідний та ізотропний;
- теплопровідність у пласті відсутня (оскільки вплив теплопровідності на розподіл температури є дуже малим);
- потік суцільний – рідина займає весь об'єм пористого середовища;
- пласт обмежений шаром теплоізоляції з усіх боків.

Теплофізична модель процесів руху та теплообміну рідини в пористих тілах і свердловинах описується наступною системою рівнянь:

- рівняння нерозривності потоку у свердловині та пласті, відповідно:

$$\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{dr} + \frac{v}{r} = 0; \quad (1)$$

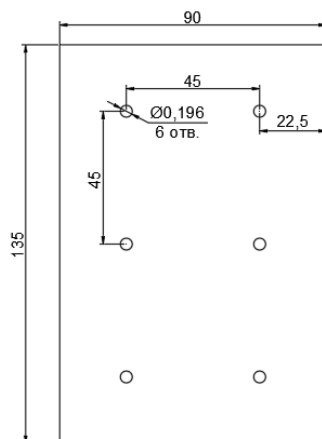


Рис. 1. Схема водоносного шару з розміщеними свердловинами

$$\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

- рівняння руху рідини в трубі – рівняння Нав'є-Стокса у свердловині:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + w \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2 r \nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial z} + v \frac{\partial w}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[2 \nu_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad (4)$$

- те ж у пласті:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \tau_x \tau_y; \quad (5)$$

- рівняння теплопровідності в свердловині та пласті, відповідно:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right); \quad (7)$$

Оскільки середовище протікає крізь пористе тіло, то вплив його на параметри течії моделюється з урахуванням гідравлічного опору, який визначається за формулою:

$$S = -k \delta \rho u; \quad (8)$$

де δ – товщина пористого тіла, ρu – динамічний напір; k – вектор сили опору пористого тіла, що визначається властивостями пористого матеріалу, а саме, типом проникності та гідравлічним опором за характерними напрямками проникності:

$$k = \frac{\Delta P \cdot S}{m \cdot l}; \quad (9)$$

де ΔP – перепад тиску між протилежними сторонами пористого тіла у формі паралелепіпеда у зворотному напрямку, Па; m – масова витрата крізь тіло в даному напрямку, кг/с; S – площа поперечного перерізу, м²; l – довжина тіла в даному напрямку, м.

Перепад тиску ΔP задається залежністю від m , S і l є постійними. Замість масової витрати можна задати об'ємну витрату Q . У цьому випадку:

$$m = \rho Q. \quad (10)$$

Геометрична 3D модель пласту побудована в системі тривимірного моделювання SolidWorks і наведена на рис 2.

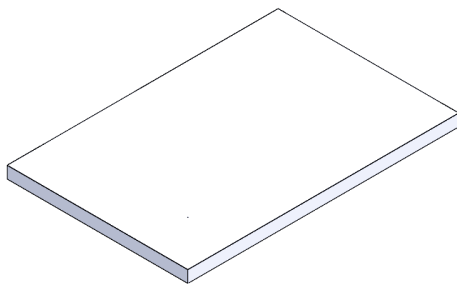


Рис. 2. Геометрична 3D модель пласту

Висновки. Створена теплофізична модель геотермального пористого шару, а також геометрична 3D модель. Адекватність даної моделі буде перевірена в комп'ютерному моделюванні процесів теплообміну в водоносному пористому шарі.

Перспективи подальших досліджень. В подальших дослідженнях буде проведено комп'ютерне моделювання температурного поля водоносного пористого шару в середовищі SolidWorks Flow Simulation та визначений період експлу-

атації геотермальної циркуляційної системи. Для верифікації отриманих результатів буде виконано чисельне моделювання розподілу температури в пласті.

Література

1. Долинский А. А. Процессы фильтрации геотермального теплоносителя в пористом слое / А. А. Долинский, Б. И. Басок, А. А. Авраменко // Промышленная теплотехника. – 2009. Т.31, №5.
2. Сапрыкина Н. Ю. Математическое моделирование изменения температурного поля грунта в режиме работы ТНУ / Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев // Прикаспия: инженерно-строительный вестник. – 2015. - №1(11).

References

1. Dolynskiy A. A., Basok B. Y., Avramenko A. A. "Protsessy fyltratsii geotermalnogo teplonosytelia v porystom sloe." *Promyshlennaiia teplotekhnika*, no. 5, 2009.
2. Saprykina N. Yu., Yakovlev P. V. "Matematycheskre modelyrovanye yzmeneniya temperaturnoho polia hrunta v rezhyme raboty TNU." *Prykaspia: ynzhe-nerno-stroytelnyi vestnyk*, no. 1(11), 2015.

УДК 620.91:004.94

Исследование однофазной неизотермической фильтрации в геотермальных циркуляционных системах

І. Э. Фуртат¹, О. М. Кравчук²

¹к.т.н., доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского», г. Киев, Украина, i.e.furtat@gmail.com

²студ. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского», г. Киев, Украина, o.m.kravchuk@ukr.net

Аннотация. В данной статье рассмотрены геометрическая модель геотермального пористого пласта, основные допущения, которые принимают при компьютерном моделировании подобных систем и теплофизическая модель движения и теплообмена жидкости в пористых телах. Геометрическая модель пласта построена в программной среде SolidWorks. Данный этап работы является подготовительным и необходимым для проведения компьютерного моделирования температурного поля пласта. Дальнейшие исследования распределения температуры в пласте в течение определённого периода помогут оценить время нормальной эксплуатации (без потери запланированной тепловой мощности) геотермальной циркуляционной системы. Работа имеет очень важное практическое значение для промышленного освоения экологически чистой технологии использования геотермальных ресурсов путём создания циркуляционных систем. Результаты могут быть использованы при оптимизации параметров геотермальных установок.

Ключевые слова: физическая модель, геотермальная система, температурное поле, однофазная фильтрация.

UDC 620.91:004.94

Investigation of Single-Phase Non-Isothermal Filtration in the Geothermal Circulation Systems

I. Furtat¹, O. Kravchuk²

¹Candidate of Engineering Sciences NTUU "Igor Sikorsky KPI", Kyiv, Ukraine, i.e.furtat@gmail.com

²student NTUU "Igor Sikorsky KPI", Kyiv, Ukraine, o.m.kravchuk@ukr.net.

Abstract. In this article, there are geometric model of geothermal porous layer, basic assumptions that accept computational similar systems and thermophysical model of motion and heat transfer of fluids in porous solids. The geometrical model of the layer is built in the software environment SolidWorks. This phase of work is a preparatory and necessary during the computer simulation of the temperature field of the layer. Further study of the temperature distribution in the reservoir over a period of time will help evaluate normal operation (without loss of planned thermal power) of the geothermal circulation system. The work has very important practical significance for the industrial development of ecologically friendly technologies using geothermal resources by creating circulation systems. The results can be used to optimize the parameters of geothermal installations.

Keywords: physical model of the geothermal system, temperature field, single-phase filtration.

Надійшла до редакції 18 квітня 2017 р.