

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПІДЗЕМНИХ ГАЗИФІКАЦІЇ ТА СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ

У дослідженні геотехнічних систем і виявленні шляхів можливого керування ними вивчення теплофізичних і динамічних процесів, що відбуваються як у самій системі, так і навколишньому геологічному середовищі, є одним з основних напрямків. Автором були розглянуті шляхи дослідження термічного режиму геотехнічних систем, які перебувають під впливом теплового поля, викликаного підземним горінням вугілля.

*Ключові слова:* теплова енергія, геотехнічна система, теплопередача, конвекція.

В исследовании геотехнических систем и выявлении путей возможного управления ими изучение теплофизических и динамических процессов, происходящих как в самой системе, так и окружающей геологической среде, является одним из основных направлений. Автор рассмотрел возможные пути изучения теплового режима геотехнических систем, на которые влияет термическое поле подземного горения угля.

*Ключевые слова:* тепловая энергия, геотехническая система, теплопередача, конвекция.

In research of geotechnical systems and revealing of ways of possible management of them, studying the dynamic processes occurring as in the system, and the surrounding geological environment, is one of the basic directions. Author have considered possible ways of studying of thermal modes of geotechnical systems which the thermal field of underground burning of coal influences.

*Key words:* thermal energy, geotechnical system, a heat transfer, convection.

**Вступ.** Технології ПГВ і ПСВ для широкого застосування потребують досконалого дослідження усіх аспектів з метою підвищення ефективності та екологічності процесу. Одна з проблем раціонального використання пов'язана з оцінкою теплового впливу від підземного горіння вугільних покладів на гірські породи, що дозволяє використовувати підземні води в якості проміжного рухомого теплоносія.

**Постановка проблеми.** У першому наближенні для оцінки впливу горіння і охолодження підземного генератора на тепловий режим вугільного пласта і відкладів, що підстиляють і перекривають, можуть бути використані теплофізичні закономірності, засновані на законі теплопровідності Фур'є [1, 2]:

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

де  $T$  – температура, °С;  $Q$  – витрата тепла, Дж/кг;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$ .

Це рівняння можна застосовувати для розрахунку температури середовища у будь-який момент часу. Оскільки нас більшою мірою цікавить тепловий вплив працюючого генератора на вміщуючі породи вертикально [3], тому для даного випадку рівняння (1) використовується в одновірному вигляді.

У диференційній формі рівняння (1) має вигляд

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/добу.

Рішення рівнянь у частинних похідних достатньо складні і потребують додаткового застосування ЕОМ і тому у багатьох випадках має сенс користуватись аналітичними рішеннями.

**Викладення основного матеріалу.** Рівняння (2) може бути вирішене аналітично [4]

$$T_i = \Delta T \operatorname{erfc} \frac{x_i}{2\sqrt{at}} + T_{min}, \quad (3)$$

де  $\Delta T$  – різниця між температурами вогнища та довкілля, °С;  $T_{min}$  – температура довкілля, °С;  $t$  – розрахунковий час, доба.

В умовах однорідного водоненасиченого середовища типові параметри розрахунку для умов Дніпровського буровугільного басейну прийняті наступні: температура горіння – 1000°С, температура довкілля – 20°С, час роботи генератора – півроку (182,5 діб). Коефіцієнт температуропровідності для вміщуючих піщаних порід  $a_p = 0,038$  м<sup>2</sup>/добу.

За результатами розрахунків була отримана картина зміни температури вміщуючих порід в просторі при розігріві підземного генератора (рис 1).

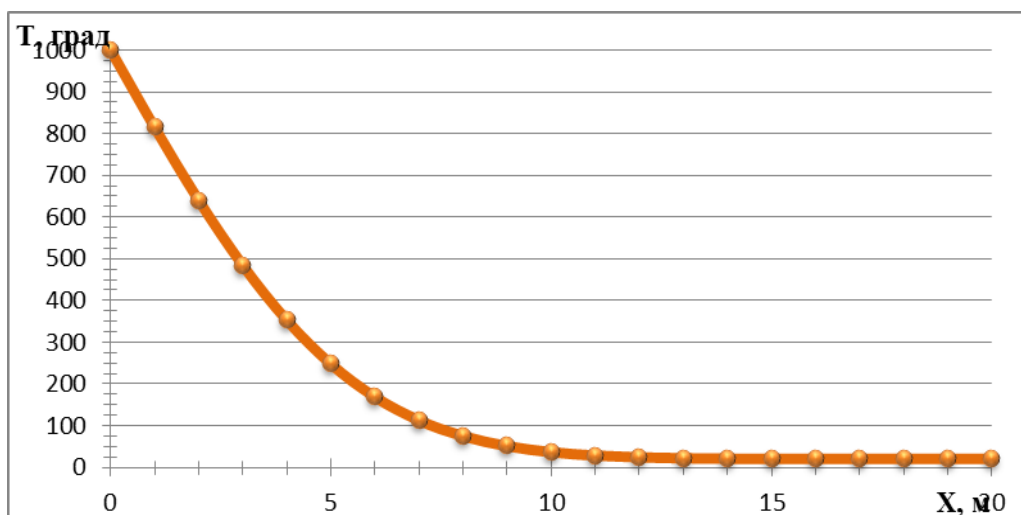


Рис. 1. Зміна температури середовища по мірі віддалення від осередку горіння в період експлуатації підземного газогенератора

Приведені вище розрахунки прийнятні в умовах фазової однорідності середовища, тобто за відсутності рідкої фази, що фільтрується. Проте, наявність рідини (в даному випадку підземних вод) істотно впливає на тепловий режим. При фільтрації у водоносних горизонтах підземні води переносять теплову енергію. Причому, як і при міграції речовини, перенесення йде конвективним і дифузійним шляхом, який у разі теплопереносу прийнято називати кондукцією. Кондуктивне перенесення, обумовлене передачею тепла від нагрітих ділянок пласта до відносно холодних, також підкоряється закону Фур'є [5]. Рівняння конвективно-дифузійного теплопереносу має вигляд [28, 29]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a_{\text{п}}} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{K_{\text{ф}}}{a_{\text{в}}} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

де  $a_{\text{п}}$  – коефіцієнт теплопроводності піщано-глинистих і карбонатних порід, м<sup>2</sup>/добу;  $a_{\text{в}}$  – коефіцієнт теплопроводності підземної води, м<sup>2</sup>/добу;  $K_{\text{ф}}$  – коефіцієнт фільтрації підземних вод, м/добу.

Рівняння (4) можливо також використовувати аналітичне рівняння [4]

$$T_i = \Delta T \left[ \operatorname{erfc} \frac{x_i}{2\sqrt{a_{\text{п}}t}} * \operatorname{erfc} \frac{x_i}{2\sqrt{a_{\text{в}}t}} \right] + T_{\text{min}}, \quad (5)$$

де  $a_i = \frac{a_{\text{в}}}{K_{\text{ф}}}$ .

Отримані результати дозволили зробити висновок про характер впливу теплового поля генератора на вміщуючі породи. Область прогрівання порід доходить до 20 м. На рис. 2 відображене порівняння отриманих результатів, які розраховані для різних параметрів теплопроводності вміщуючих порід. Як відомо, вони змінюються в залежності від температури середовища – при 20 °С теплопроводність дорівнює 12,24 м<sup>2</sup>/добу, а при температурі середовища 100 °С – 14,64 м<sup>2</sup>/добу. Проте, як виявив підрахунок ці зміни теплових параметрів взагалі не впливають на результати – обидві криві співпадають майже повністю (різниця в 10 °С не суттєва при таких температурах). Таким чином, в подальших розрахунках немає сенсу враховувати цю різницю і надалі будуть використані параметри для температури середовища 20 °С.

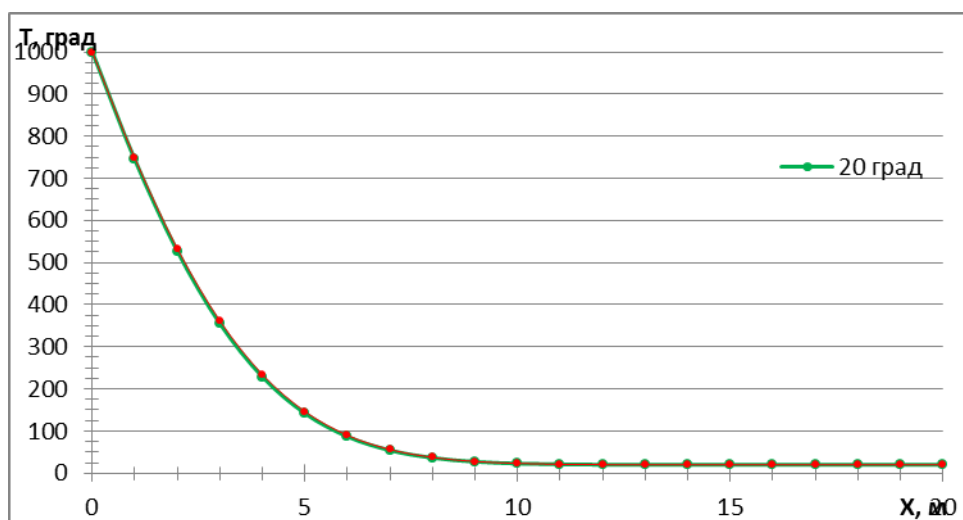


Рис. 2. Порівняльний графік отриманих результатів з використанням теплофізичних параметрів води різної температури

В результаті розрахунку була отримана картина впливу спалювання і газифікації вугільного пласта на тепловий режим вміщуючих порід за наявності підземних вод, що фільтруються. У розрахунку застосовувалися значення швидкості фільтрації підземних вод для надвугільного горизонту  $v = 3,0$  м/добу і  $6,0$  м/добу і для підвугільного  $v = 6,0$  м/добу,  $9,0$  м/добу і  $12,0$  м/добу, характерне для умов сильно обводнених вміщуючих порід Дніпровського буровугільного басейну. Зведені результати порівняння обох розрахунків представлені на рис. 3.

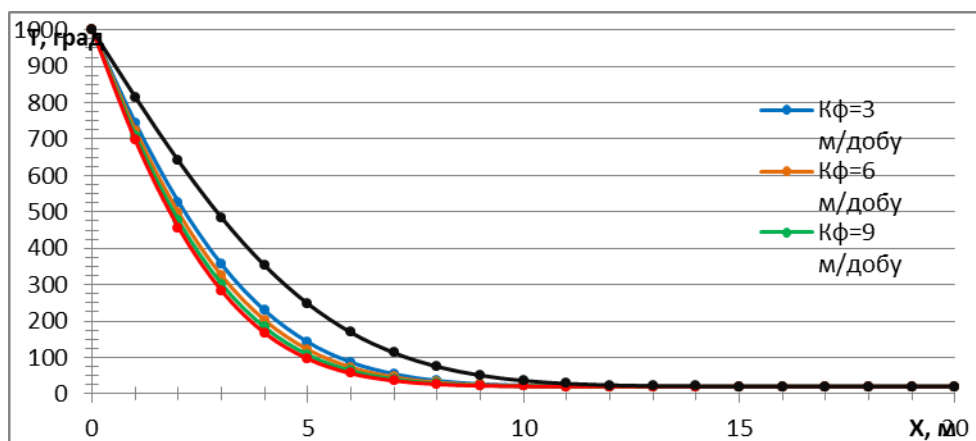


Рис. 3. Порівняння температурного режиму при роботі генератора, розрахованого з урахуванням впливу фільтрації підземних вод і без урахування

Порівняння результатів розрахунку обома способами також виявило істотний вплив швидкості руху води на розподіл температури. Радіус дії поодинокого генератора знижується до 10 м, тобто швидкість охолодження набагато вища, і початковий тепловий режим відновиться швидше після припинення горіння. Область прогрівання навколишніх порід в цілому не перевищує перших метрів (в середньому 5–7 м), що відповідає літературним даним про експериментальні виміри температур в реальних умовах станцій ПГВ і ПСВ [6–10].

Таким чином, можна зробити висновок, що підвугільний напірний водоносний горизонт буде охолоджуватися швидше, ніж надвугільний, завдяки більш високим фільтраційним параметрам. Крім того, наведена методика також дозволяє використовувати її замість більш складних кінцево-різницевого розрахунку рівнянь у частинних похідних.

**Висновки.** На підставі розрахунків встановлено, що термодинамічний режим теплогенератора при підземному горінні вугілля формується системою «вміщуючі породи – підземні води» з радіусом термічного впливу до 20 м (для гомогенного середовища) і до 12–15 м (при фільтрації підземних вод через активну зону теплогенератора з різною швидкістю). Цей радіус можна вважати зоною теплового забруднення підземних вод і вміщуючих порід при горінні вугілля. Під час досліджень також була встановлена можливість аналітичного розв'язання термодинамічних процесів і відсутність впливу на результати теплофізичних параметрів води, що були отримані для різних температур.

### Бібліографічні посилання

1. **Беляев Н. М.** Основы теплопередачи: Учебник / Н. М. Беляев. – К.: Вища школа, 1989. – 343 с.: ил.
2. **Орадовская А. Е.** Миграция вещества и тепла в подземных водах / А. Е. Орадовская // Гидрогеологические исследования за рубежом / Под ред. Н. А. Маринова. – М.: Недра, 1982. – С. 33–74.

3. **Смирнов Б. В.** Использование моделирования для прогноза инженерно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых / Б. В. Смирнов. – М.: Недра, 1975. – 100 с.

4. **Шестаков В. М.** Динамика подземных вод / Н. С. Шестаков. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 368 с.

5. **Кириллин В. А.** Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейдлин. – М.: Энергоиздат, 1983. – 416 с.: ил., табл.

6. **Силин-Бекчурин А. И.** Роль подземных вод и других природных факторов в процессе подземной газификации углей / А. И. Силин-Бекчурин, К. Ф. Богородицкий, В. И. Кононов // Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф. П. Саваренского, т. XXIII. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 126 с.

7. **Садовенко И. А.** Миграция и теплоперенос вокруг подземного газогенератора / И. А. Садовенко, А. В. Инкин, С. В. Жолудев. – Днепропетровск: Грани, 2012. – 281 с.

8. **Жолудев С. В.** Влияние фазовых превращений подземных вод на тепловой режим газогенератора / С. В. Жолудев // Уголь Украины. – 2005. – № 4. – С. 31–33.

9. **Жолудев С. В.** Возможность использования подземных вод термической зоны подземного газогенератора в качестве теплоносителя теплогенерирующих установок / С. В. Жолудев // Вісник Дніпропетровського університету. Сер. Геологія. Географія. – Вип. 6. – 2004. – № 8. – С. 31–34.

10. **Жолудев С. В.** Расчет теплового режима газогенератора при подземной газификации углей / С. В. Жолудев // Вісник Дніпропетровського університету. Сер. Геологія. Географія. – Вип. 5. – 2003. – № 7. – С. 11–20.

*Надійшла до редколегії 21.04.2014 р.*