

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІРСЬКОМУ МАСИВІ**

У дослідженні геотехнічних систем і виявлення 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. Розглянуті шляхи дослідження термічного і газо-гідродинамічного режимів геотехнічних систем, які перебувають під впливом теплового поля, викликаного підземним горінням вугілля.

*Ключові слова:* тепла 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. Рассмотрены возможные пути изучения теплового и газо-гидродинамического режимов 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. Authors have considered possible ways of studying of thermal and gaz-hydrodynamic modes of geotechnical systems which the thermal field of underground burning of coal influences.

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

Випадок теплового впливу підземного горіння вугілля є достатньо розповсюдженим з усіх можливих видів теплового впливу на геологічне середовище в умовах України. Крім того, наведені методики та отримані результати можуть застосовуватися при аналізі термічних процесів меншого масштабу (наприклад, антропогенне теплове забруднення) й іншої природи (наприклад, гідротермальні прояви) [1 – 4].

Оскільки тепла енергія в геологічному середовищі переноситься конвективно-дифузійним газовим потоком і підземними водами, необхідний аналіз динамічного режиму цих компонентів. Крім того, на технологічні і гідродинамічні умови істотно впливають тиск газової і рідкої фаз. Наявність в області термічного впливу речовин у газоподібному і рідкому станах і їхньої бінарної композиції вимагає опису динаміки, який враховує закономірності руху кожної з фаз.

Теоретичні дослідження руху підземних вод супроводжуються математичними труднощами аналітичних рішень для більш-менш складних гідрогеологічних умов і розрахункових схем, що їх відбивають. Дослідження, які розглядають питання динаміки підземних вод, досліджують питання фільтрації стосовно до окремих інженерних проблем (розрахунки дренажу, водозаборів, тощо), причому в якості основних використовують різноманітні методи моделювання на аналогових методів

---

© К. О. Гайдай, С. В. Жолудєв, 2012

присвячено питанням міграції тепла у підземних водах, що визначається актуальністю цієї проблеми.

Дослідження міграції тепла підземних вод йшло в напрямку отримання нових аналітичних рішень для більш складних розрахункових схем, що включають розгляд двовимірної дисперсії, гравітаційної сегрегації, фізико-хімічної взаємодії мігруючих речовин з породами та підземними водами; розроблялися методики визначення параметрів теплообміну в лабораторних і польових дослідженнях. Критичний погляд на

класичні моделі та рівняння, що базується на передумові про безперервність макроскопічного пористого середовища, відповідно до якого передбачається, що кожний нескінченно малий елемент пористого середовища складається одночасно із твердої речовини і пор, сприяв появі нових моделей, які враховують зміни концентрації та градієнта концентрації на границі розподілу між твердою речовиною і порами.

Також розвинуті чисельні методи рішення рівнянь теплопереносу, що дозволяють досліджувати ці явища при складній конфігурації водоносного шару, просторовій неоднорідності властивостей і при різноманітних граничних і початкових умовах. Разом з тим, застосування чисельних методів у ряді випадків виявилось недостатньо ефективним через значні витрати часу і засобів на підготовку до рішення завдань та машинний рахунок; відзначаються також складнощі у зв'язку із проблемою збіжності і стійкості рішень, які залежать від техніки дискретизації. Звичайний недолік вихідних даних про параметри водоносної системи і міграції часто змушує використовувати в моделі усереднені значення їх і, таким чином, переходити до простих схем, які більш ефективно і швидко можуть бути вирішені на основі аналітичного моделювання. Ці обставини, а також можливість використання аналітичних рішень для оцінки відносного значення тих або інших параметрів у процесі теплопереносу і для розрахунку параметрів за експериментальними даними, незважаючи на успіхи чисельних методів, підтримують інтерес дослідників до розширення арсеналу точних і наближених аналітичних рішень.

У першому наближенні, для оцінки теплового впливу високотемпературного джерела можуть бути використані теплофізичні закономірності, засновані на законі теплопровідності Фур'є [5]

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

де  $T$  – температура;  $Q$  – витрати тепла;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

У диференціальній формі (1) в найбільш загальній формі має вигляд:

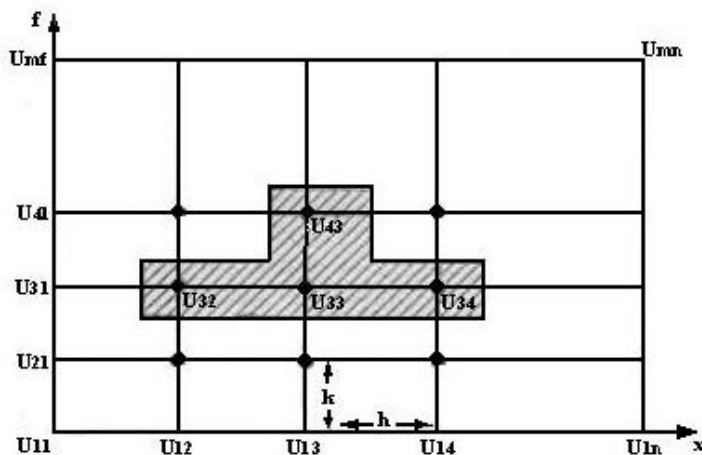
$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (2)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $\nabla^2$  - оператор Лапласа.

Дане рівняння можна застосовувати для розрахунку температури середовища в будь-який момент часу. Для розглянутого випадку рівняння (2) використовувалося в одномірному вигляді, оскільки нас, більшою мірою, цікавить переміщення теплового фронту або у вертикальному, або в горизонтальному напрямках [6; 7]. Застосування моделей теплового джерела сферичної і циліндричної форм або шар-смуга, істотно ускладнює розрахунки, і на початковому етапі досліджень результати таких складних моделей можуть бути апроксимовані доповненням одномірних рішень [8].

Чисельно рішення виконується за допомогою методу кінцевих різниць за явною схемою розрахунку. Основна ідея цього методу полягає в тому, що для рішення параболічного або гіперболічного рівняння воно заміняється кінцево-різницевою апроксимацією, що виражає рішення для одного моменту часу через рішення у попередній момент [9]. Таким чином, завдання можна вирішувати, послідовно обчислюючи значення для всіх моментів часу. Для рішення будується прямокутна сітка, вузли якої визначаються у процесі обчислення (рис. 1). Значення вузлів на лівій і нижній сторонах сітки відомі із

граничних і початкових умов.



**Рис. 1. Обчислювальний шаблон явної різницевої схеми для рівняння теплопровідності**

За вищенаведеною методикою чисельного моделювання проведені дослідження теплопереносу в умовах геотехнічної системи підземного горіння бурого вугілля. Параметри розрахунку були прийняті для найбільш типових умов – тепловий радіус впливу становить від 20 до 40 метрів, температура у вогнищі горіння – 1000 °С, температура навколишнього середовища – 20 °С. Період горіння 300 днів з наступним остиганням. Коефіцієнт температуропровідності для порід, що вміщують, розрахований за формулою  $a = \lambda/C_p$ , де коефіцієнт теплопровідності для піщано-глинистих і карбонатних порід дорівнює 0,5÷3,5 Вт/м×град,  $C_p$  – коефіцієнт об’ємної теплоємності піщаного шару –  $C_p = (3,0\div3,7)10^6$  Дж/(кг×град) [10; 11].

У результаті розрахунків отримана картина зміни температури порід, що вміщують, у часі від моменту початку горіння, до повного остигання вигорілого простору [12]. Якщо в цей час відбудеться горіння сусідньої ділянки або шару, на його нагрівання; виявляється відповідний термічний вплив за рахунок остигання першого.

Область теплового впливу доходить до 30-ти метрів. Процес охолодження йде дуже повільно, багаторазово перевершуючи сам період горіння (на максимальний розрахунковий момент часу 10 років первісний тепловий режим середовища не був відновлений). Як з’ясувалося з розрахунку, на розігрів практично не впливає зниження температури прилеглої ділянки. Цей вплив відбувається лише у незначному нагріванні периферійної області, де тепловий режим уже був істотно змінений горінням сусіднього шару [13].

Наведені розрахунки прийнятні тільки в умовах фазової однорідності середовища, тобто при відсутності рідкої і газової складових [14; 15]. Однак, як відомо, наявність рідини – підземних вод – істотно впливає на тепловий режим [16; 17]. При фільтрації у водоносних шарах підземні води переносять не тільки розчинені в них речовини, але й теплову енергію, причому, як і при міграції речовини, перенос йде конвективним і дифузійним шляхом. Останній, у випадку теплопереносу, прийнято називати кондукцією. Кондуктивний перенос, який обумовлений передачею тепла від нагрітих ділянок шару до відносно холодних, також описується законом Фур’є.

Урахування підземних вод звузило область прогрівання навколишніх порід до перших метрів (у середньому 5 – 7 м), що відповідає літературним даним про експериментальні виміри температур у реальних умовах станцій підземної газифікації і підземного спалювання вугілля, а так само даним гідротермальних досліджень. За дослідженнями

Інституту фізики Землі інтервал прогріву порід, що вміщують, не перевищує 1 – 2 м від вогнища горіння [18]. Але пізніші спостереженням, що були виконані ВНДПідземгаз на базі Підмосковного вугільного басейну, зафіксували прогрівання порід до 100 °С на відстані 4 – 6 м від вугільного шару, а загальний радіус теплового впливу склав 12 – 15 м. Аналогічні результати були отримані лабораторією гідрогеологічних проблем ім. Ф. П. Сава-ренського під керівництвом О. І. Сілін – Бекчурина та Є. В. Крейніна. Порівняння отриманих значень із відомими експериментальними даними представлено в таб-лиці 1.

Також можна додати, що за результатами досліджень простежується зміна теплового режиму при остиганні з урахуванням охолоджуючої дії води, що фільтрується. З однієї сторони, більша швидкість фільтрації знижує швидкість розігріву вогнища та навколишніх порід, з іншого боку – сприяє його прискореному остиганню, що теж знаходить підтвердження у відомих даних [19].

Беручи до уваги сформовану картину термічного поля, потрібно відзначити, що у вивченні теплового режиму горіння, що оточує вогнище горіння вугілля, необхідно враховувати варіації температури середовища залежно від зміни фазового стану підземних вод. У теорії теплофізики ці процеси розглядаються як задача Стефана і для її рішення використовуються різні модифікації традиційних чисельних методів розрахунку.

Таблиця 1

**Порівняння отриманих результатів  
з літературними експериментальними даними**

Відстань від вогнища горіння	Температура, °С								
	за О. І. Сілін - Бекчуриним		Інститут фізики Землі	за Є. О. Погребицьким	за І. Д. Дергуновим	за Н. В. Єфремочкиним	за О. О. Міняйловим	Розрахункові значення	
	Водоносний шар	Гірські породи						3 місяці	6 місяців
у вогнищі горіння	1000			800 – 900	1000 – 1100	1000 – 1200	800 – 900	1000	1000
поблизу вогнища		90 – 100		500			500 – 600	500 – 800	900 – 950
1,5 – 2,5 м			100					350 – 450	600 – 800
2,5 – 3,5 м				200	168			180 – 300	400 – 500
3,5 – 5,0 м					100	100		50 – 150	150 – 300
5,0 – 7,0 м	100			68	92 – 106		40 – 50	50 – 150	
7,0 – 10,0 м					42			40 – 45	
10,0 – 13,0	50					10 – 15	35 – 20	30 – 40	
13,0 – 20,0	10								

> 20,0 м		18 – 60					20
----------	--	---------	--	--	--	--	----

### Бібліографічні посилання

1. **Гинзбург Д. Б.** Газификация топлива и газогенераторные установки. Ч.1 / Д. Б. Гинзбург под ред. Б. С. Шевцова – М. – Л., 1938. – 603 с.
2. **Дядькин Ю. Д.** Извлечение и использование тепла Земли. / Ю. Д. Дядькин, Ю. М. Парийский – Л., 1977. – 114 с.
3. **Смирнов Б. В.** Использование моделирования для прогноза инженерно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых. / Б. В. Смирнов – М., 1975. – 100 с.
4. Тепло Земли и его извлечение / Щербань А. Н., Бабинец А. Е., Цырюльников А. С. и др. – К., 1974. – 262 с.
5. **Кошляков Н. С.**, Уравнения в частных производных математической физики: Учебное пособие для мех.- мат. фак. ун - тов. / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов – М., 1970. – 712 с.
6. **Беляев Н. М.** Основы теплопередачи. / Н. М. Беляев – К., 1989. – 343 с.
7. **Лейбензон Л. С.** Собрание трудов: В 4 т. / Л. С. Лейбензон – М., 1953. – Т. 2: Подземная гидрогазодинамика. – 544 с.
8. **Коздоба Л. А.** Вычислительная теплофизика. / Коздоба Л. А. – К., 1992. – 224 с.
9. **Фарлоу С.** Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров: пер. с англ. / С. Фарлоу – М., 1985. – 384 с.
10. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. / Н. Б. Варгафтик – М., 1963. – 708 с.
11. **Енохович А. С.** Справочник по физике и технике. / А. С. Енохович – М., 1989. – 224 с.
12. **Жолудев С. В.** К определению особенностей теплового режима эксплуатации газогенератора при подземной газификации углей / С. В. Жолудев // Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни. – 2003. – №4. – с. 21 – 27.
13. **Жолудев С. В.** К определению оптимального водного режима газогенераторов при подземной газификации углей / С. В. Жолудев // Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни. – 2003. - №3. – с. 13 – 17.
14. **Берман Р.** Теплопроводность твердых тел: пер. с англ. / Р. Берман – М., 1979. – 286 с.
15. **Мироненко В. А.** Динамика подземных вод. / В. А. Мироненко – М., 1996. – 519 с.
16. **Бутузова Л. Ф.** Роль воды в процессах термической и термоокислительной деструкции / Л. Ф. Бутузова, З. И. Саранчук, О. А. Буравцова, А. Е. Шендрик // Геотехнологические проблемы топливно-энергетических ресурсов Украины. – К., 1985. – с. 107-113.
17. **Кириллин В. А.** Техническая термодинамика. / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейдлин – М., 1983. – 416 с.
18. **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 // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П.Саваренского, т. XXIII. – М., 1960. – 126 с.
19. Теплопередача и прикладная гидродинамика. Сб науч. тр. / под ред. О. А. Герашенко – К., 1983. – 200 с.

Надійшла до редколегії 27.02.12