

ПІДЗЕМНІ ГАЗИФІКАЦІЯ ТА СПАЛЮВАННЯ БУРОГО ВУГІЛЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Проблема раціонального видобудку вугілля з одночасним захистом навколишнього середовища є одною з пріоритетних для України. Підземні газифікація (ПГВ) і підземне спалювання вугілля (ПСВ), які поєднують розробку корисних копалин з їх одночасною підземною переробкою в єдиному технологічному процесі, здатні вирішити ці проблеми. Одним із способів вдосконалення розробки може бути використання як проміжного теплоносія підземних вод.

Ключові слова: вугілля, підземна газифікація, підземне спалювання, підземні води.

Проблема рациональной добычи угля одновременно с защитой окружающей среды является одной из приоритетных для Украины. Подземные газификация (ПГУ) и подземное сжигание угля (ПСУ), объединяющие разработку полезных ископаемых с их одновременной подземной переработкой в едином технологическом процессе, могут решить эти проблемы. Одним из способов усовершенствования разработки может быть использование промежуточного теплоносителя – подземных вод.

Ключевые слова: уголь, подземная газификация, подземное сжигание, подземные воды.

The problems of coal excavation and environment protection are priority for Ukraine. Underground coal gasification (UCG) and underground coal incineration (UCI) are combining excavation with simultaneous underground processing in entire technological process, capable to solve this problem. Using an intermediate heat carrier - ground water may optimising of these processes.

Key words: coal, underground coal gasification, underground coal incineration, ground water.

Процеси ПГВ і ПСВ є складними для вивчення і відтворення основних технологічних ланок роботи підземних генераторів і підвищення ефективності процесу може досягатись шляхом зниження втрат теплової енергії і збільшення активності і стійкості горіння вугілля.

Зв'язок між горінням вугілля, навколишніми породами і підземними водами дозволяє стверджувати про їх взаємний вплив і утворення єдиного теплофізичного комплексу, компоненти якого активно взаємодіють і формують загальне теплове поле (рис. 1) [6].

Інтерес представляють підземні води області термічного впливу підземних теплогенераторів, які мають високі теплові параметри і рухливість, що дає можливість використати їх як проміжний теплоносій. Для його відбирання необхідні засоби концентрації і передачі на поверхню. Перенесення енергії підземними водами знімає необхідність відбору продуктів газифікації і їх транспортування, і дозволяє перейти до технологічно більш простої схеми - підземне спалювання. Шляхом математичного моделювання проведений аналіз термо- і гідрогазодинамічних процесів підземного горіння вугілля. Теплова енергія підземного генератора переноситься конвективно-дифузійним газовим потоком і підземними водами. Для оцінки впливу горіння і охолодження підземного генератора використані теплофізичні закономірності, засновані на законі теплопровідності Фур'є у вигляді рівняння[1]

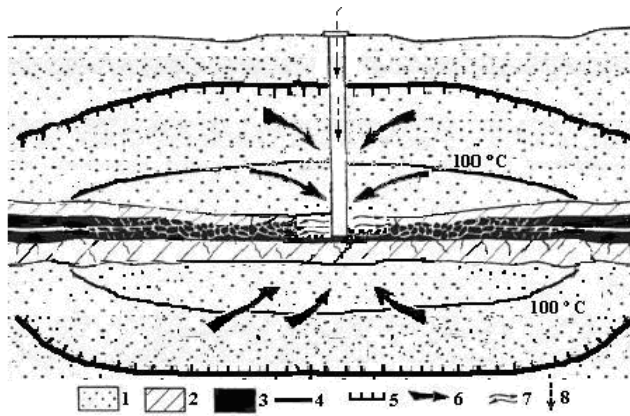


Рис.1. Термодинамічна схема підземного генератора: 1 – піски; 2 – глини; 3 – вугілля; 4 – ізотерма 100 °С; 5 – зона теплового впливу генератора; 6 – рух підземних вод; 7 – газовий потік в пласті; 8 – дуття.

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T,$$

де a – коефіцієнт температуропровідності; T – температура; ∇^2 – оператор Лапласа.

В результаті отримана картина зміни температури в часі. В середовищі, близькому до однорідного, прогрівання порід доходить до 30-ти метрів, процес охолодження (≈ 3 роки) в багато разів перевищує період експлуатації (≈ 6 місяців), а на розігрівання генератора практично не впливає зниження температури паралельного зупиненого генератора.

При моделюванні двохкомпонентної системи (водонасичені гірські породи) використовувалося рівняння конвективно-дифузійного теплопереносу

$$(2) \quad c_n \frac{\partial T}{\partial t} + c_e v \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

де c_n і c_e – коефіцієнт об'ємної теплоємності породи і води; v – швидкість фільтрації води; λ – коефіцієнт теплопровідності.

В цьому випадку радіус дії одиночного генератора знижується до 10 м, швидкість охолодження стає набагато вищою, а початковий тепловий режим практично відновлюється через шість місяців. Область прогрівання навколишніх порід в цілому не перевищує перших метрів (в середньому 5...7 м) (рис. 2). Також був оцінений вплив швидкості фільтрації води в діапазоні від нуля до 15 м/доб. Збільшення швидкості фільтрації, з одного боку, знижує інтенсивність розігрівання генератора, а з іншого, прискорює його охолодження [5].

Наявність в області впливу генератора речовин в газоподібному і рідкому станах та їх бінарної композиції, вимагає, щоб опис динаміки враховував закономірності руху кожної з фаз (т. з. «задача Стефана»). За відстанню від вогнища виділяються три зони: газоподібна, двохфазна зона конденсації (перехідна

зона) і зона рідкої фази. Межі перехідної зони визначаються температурами початку T_p і кінця T_k конденсації. Теплота фазового перетворення E виділяється в об'ємі двохфазної зони і може бути обчислена з введенням функції джерела теплоти $q(T)$ в рівняння теплопровідності на інтервалі температур $T_p \dots T_k$ [1]

$$\rho(T) c_{\text{ef}}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad } T) + q(T), \quad (3)$$

де ρ - щільність; c_{ef} - ефективна теплоємність, яка дорівнює $c_{\text{ef}}(T) = c_0(T) - E \frac{\partial \psi}{\partial \tau}$,

$$\psi = \frac{V_\delta}{V_i} = \frac{c_2 - c_0}{c_2 - c_p} = \psi(T),$$

де V_p і V_o - об'єми рідкої і двохфазної зон; c_2 , c_0 , c_p - теплоємність газоподібної, перехідної та рідкої фаз.

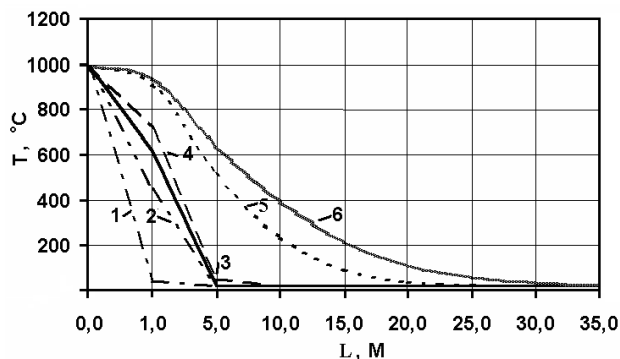


Рис. 2. Зміна температури (T) за відстанню від вогнища (L) з урахуванням впливу фільтрації підземних вод і без нього: 1 і 2 - період горіння один місяць, з водою і без, відповідно; 3 і 4 - період горіння два місяці, з водою і без, відповідно; 5 і 6 - період горіння шість місяців, з водою і без, відповідно.

Розрахунки були проведені для температурного діапазону T_p - 374,15 °C (критична температура), T_k - 100 °C при ентальпії фазового переходу 1930 КДж/кг (відповідно температурі 200 °C), на термін експлуатації генератора 6 місяців [2]. Результати розрахунків представили зміну в часі характеру теплового поля навколо генератора і порівнянні з експериментальними даними (рис. 3). Ділянки збільшення крутини кривих відповідають перехідній зоні конденсації. Порівняння температурного режиму окремо для водяної пари, бінарної рідини і води, з результуючою кривою, що враховує перехід між цими фазами, показує уточнення отриманих результатів, від розрахованих за традиційними методиками [5, 7].

При дослідженні газової фази розглядалась динаміка дуття, що подається в теплогенератор, а також відбирання енергетичного або технологічного газу і водяної пари. Рух газу у вугільному пласті в одному напрямку описується рівнянням [8]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 x} = \frac{m}{nkP_0 \sigma(t)} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (4)$$

де P – тиск газу на момент часу t ; P_0 – початковий тиск; m – пористість; n – показник політропи; k – проникність середовища,

$$\sigma(t) = \frac{P}{P_0} + \left(1 - \frac{P}{P_0}\right) e^{-\frac{\mu m}{n+1}t},$$

де μ - в'язкість газу; ζ – постійна, що характеризує умови руху газу в пласті.

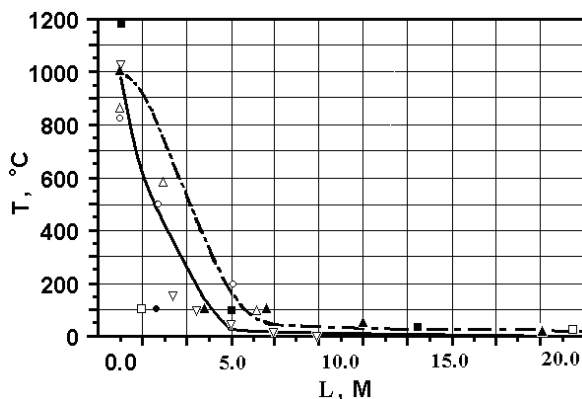


Рис. 3. Порівняння отриманих залежностей з експериментальними даними за: ▲ и □ – О. І. Силін – Бекчурінім для водоносного шару і порід; ● - Інститута фізики Землі; ○ – Є. О. Погребицьким; ■ – Н. В. Єфремочкиним; ▽ - І. Д. Дергуновим; ▲ - О. О. Меняйловим; розрахункові криві за часом горіння — - 3 місяця, - - - 6 місяців.

Газодинамічний режим підземного генератора і радіус зони впливу дуття були розраховані при різному тиску (0,2...2,4 МПа) та різних значеннях проникності середовища (пористість 0,2...0,5; коефіцієнт фільтрації 1,0...15,0 м/доб) на термін експлуатації 6 місяців (рис. 4).

Через 6 місяців після початку експлуатації при втратах тиску та об'єму газу в пласті, які не перевищують 10 %, зона впливу від дуття розповсюдиться не більше ніж на 7 м (на середину терміну до 5...6 м). Радіус цієї зони практично співпадає з радіусом теплового впливу газогенератора. Таким чином, можна стверджувати, що підземні води знаходяться під впливом тиску дуття, що нагнітається, і характер їх стану визначається газодинамічним режимом генератора, а зміною тиску дуття і відбору газу можна в певних межах регулювати водний режим підземного генератора [4].

Моделювання газо-, гідро- і термодинамічного режимів дозволило встановити взаємозв'язок їх параметрів і визначає можливість їх взаєморегулювання. Проведений аналіз балансу вод, що беруть участь в процесі підземного горіння вугілля, дозволив отримати залежність між кількістю вільних вод і вологістю дуття, що дозволяє гнучко регулювати процес.

Як правило, при ПСВ відбирається тепло горіння вугілля, а енергія, що витрачається на прогрівання вміщуючих порід і навколишніх водоносних горизонтів, не використовується [3]. Оточуючі генератор нагріті підземні води є

теплоносієм і їх необхідно вивести на поверхню і забезпечити перетворення в зручний для передачі і розподілу спосіб.

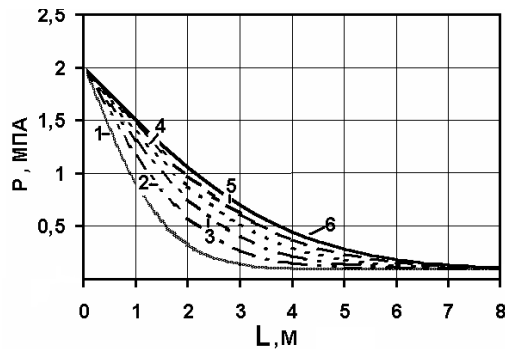


Рис. 4. Зміна тиску газу (P) в пласті на різних відстанях (L) від місця дуття у часі: 1...6 для термінів горіння 1, 2, 3, 4, 5, 6 місяців, відповідно.

Відбір теплоносія може здійснюватися свердловинами, а по мірі формування вигорілого каналу його гідродинамічна роль стає визначальною. Необхідно забезпечити відбір вже прогрітої води і підтік холодних вод до генератора з подальшим їх нагрівом. Дуття віджимає прогріту води до області відкачування. По мірі відкачування, нагріту води змінюються більш холодними, які прогріваються відносно швидко.

Охолодження підземного генератора відбувається природним шляхом після вигорання товщі. В цей час спостерігається поступове охолодження. Інтенсивність звуження термічної зони за результатами моделювання менше ніж розширення при нагріві. При охолодженні вогнища горіння роль нагрівача поступово переходить до навколишніх порід і вод. При повному охолодженні генератора підземні води ще є джерелом тепла. Межа розподілу теплих і холодних вод, досягнувши термічної зони, призводить до падіння температури, що відповідає завершенню експлуатації даної ділянки підземного генератора.

Знаходження оптимальних сіток свердловин, дебітів і знижень, які при якнайменших витратах забезпечать роботу енергомодуля і подачу кондиційного теплоносія, було основним завданням моделювання течії теплоносія з метою управління цим процесом. Розрахунок зводився до визначення кількості води, яка може бути прийнята водозбірним каналом відомого розміру. Чинники, що виявляються з часом - зміна водного балансу за рахунок вертикального перетікання, зниження тиску, взаємовплив вертикальної і горизонтальної складових водовідбору - оцінюються розрахунком комбінованого водовідбору, яким є запропонована схема (рис. 5).

Розрахунки були проведені для різної відстані між ділянками ПСВ (20, 30 і 40 м) та довжини водоприймальної частини (50 і 60 м) в різних гідрогеологічних умовах (коефіцієнт фільтрації 3, 6 і 9 м/доб). Результати показали, що продуктивність водовідбору коливається в широкому діапазоні (93,3...354,4 м³/доб) і залежить головним чином від фільтраційних властивостей порід і менше від просторової схеми водозабору.

Встановлено, що при малих коефіцієнтах фільтрації продуктивність водозбірних каналів буде домінувати і вертикальні надходження перехоплюватимуться. При високих параметрах фільтрації канал не здатний відбирати висхідні напірні води і може спостерігатися передчасний прорив

холодного потоку в термічну зону. У цьому випадку вертикальні свердловини перехоплюватимуть надмірний водопріток.

Таким чином, можливо розв'язання питань підземної розробки вугільних родовищ у складних гідрогеологічних умовах та перейти до проектування компактних і екологічних енергоустановок для районів підвищеного техногенного впливу.

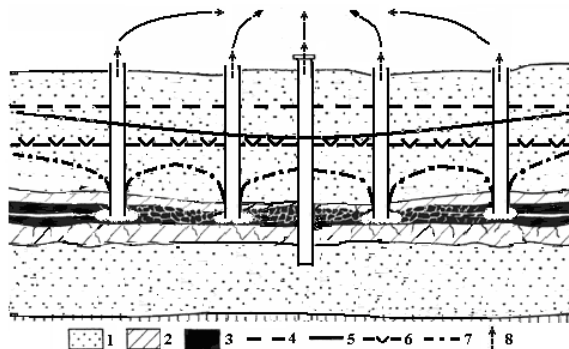


Рис. 5. Схема комбінованого відбору теплоносія вертикальними свердловинами і горизонтальними водозбірними каналами: 1- піски; 2 - глини; 3 - вугілля; 4 - початковий рівень підземних вод надвугільного горизонту; 5 – теж, при відборі теплоносія; 6 - початковий п'єзометричний рівень підвугільного горизонту; 7 – теж, при відборі теплоносія; 8 - рух теплоносія на поверхню.

Библиографические ссылки

1. Беляев Н. М., Рядно А. А. Математические методы теплопроводности: Учебное пособие / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – К.: Вища школа, 1992. – 415 с.: ил.
2. Жолудев С. В. Влияние фазовых превращений подземных вод на тепловой режим газогенератора / С. В. Жолудев // Уголь Украины. – 2005. - №4. – с. 31 – 33.
3. Жолудев С. В. Возможность использования подземных вод термической зоны подземного газогенератора в качестве теплоносителя теплогенерирующих установок / С. В. Жолудев // Вісник Дніпропетровського університету. Серія геологія, географія. Вип. 6. – 2004. - №8. – с. 31 – 34.
4. Жолудев С. В. Расчет газодинамического режима подземного генератора / С. В. Жолудев // Уголь Украины. – 2004. - №11. – с. 33 – 34.
5. Жолудев С. В. Расчет теплового режима газогенератора при подземной газификации углей / С. В. Жолудев // Вісник Дніпропетровського університету. Серія геологія, географія. Вип. 5. – 2003. - №7. – с. 11 – 20.
6. Силин-Бекчурин А.И., Богородицкий К.Ф., Кононов В.И. Роль подземных вод и других природных факторов в процессе подземной газификации углей / Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П.Саваренского, т. XXIII. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1960. – 126 с.
7. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля / О. В. Колоколов, Н. М. Табаченко, А. М. Ейшинский и др. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281 с.: ил, табл.
8. Уравнения в частных производных математической физики: Учебное пособие для мех.– мат. фак. ун – тов. / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов – М.: Высшая школа, 1970. – 712 с., ил.

Надійшла до редколегії 23.01.11