

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМІГРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПІДЗЕМНИХ ГАЗИФІКАЦІЇ ТА СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЛЯ

Хімічний склад підземних вод в над- і підвугільному водоносних горизонтах під час підземного горіння буровугільних покладів може суттєво змінюватись за рахунок забруднення продуктами та відходами термічної переробки вугілля. Аналіз характеру міграції речовин-контаніантів у підземних водах є одним з головних питань подальшого втілення технології ПГВ та ПСВ.

Ключові слова: підземна газифікація, підземне спалювання, геоміграційні процеси, геотехнічна система.

Химический состав подземных вод в над- и подугольных водоносных горизонтах во время подземного горения буровугельных отложений может существенно меняться за счет загрязнения продуктами и отходами термической переработки угля. Анализ характера миграции веществ-контаніантов в подземных водах является одним из главных вопросов дальнейшего внедрения технологий ПГУ и ПСУ.

Ключевые слова: подземная газификация, подземное сжигание, геомиграционные процессы, геотехническая система.

The chemical composition of subsoil water in the over- and subcoal deposits during underground combustion of brown coal can vary under coals thermal development product and pollution. Analysis of the substances-contaminants migratory in water is one of the main issues of further implementation of technologies UCG and UCC.

Key words: underground gasification, underground combustion, geomigratory processes, geotechnical system.

В процесі підземної газифікації і спалювання вугілля виділяються численні хімічні речовини, які в умовах водонасичених над- і підвугільного водоносних горизонтів здатні покидати зону підземного газогенератора і мігрувати в підземній гідросфері, забруднюючи її. Тому доцільно не допускати або обмежувати їх потрапляння у водоносні горизонти в період експлуатації підземного генератора і після його завершення. Але на етапі експлуатації загроза попадання речовин-забрудників залишається високою. В деякій мірі сприяти вирішенню цієї проблеми можливо прогнозуванням поширення забруднення від області підземного газогенератора.

З літературних даних відомий орієнтовний вміст речовин-забрудників в продуктах і відходах ПГВ і ПСВ (табл. 1), що дозволяє за допомогою методів математичного моделювання спрогнозувати міру і характер можливого хімічного забруднення підземних вод в околицях підземного газогенератора [1].

Для теоретичного опису геоміграційних процесів з урахуванням гідрохімічних перетворень необхідно використовувати методи термодинамічного моделювання. Такий підхід застосовується для моделювання контамінаційних процесів при розгляді умов природно-техногенного забруднення, джерела якого знаходяться у водовміщуючих породах і поступають у водозабори при змінах термодинамічної обстановки в підземних водах [3].

Вміст хімічних речовин в продуктах і відходах ПГВ і ПСВ [1, 2]

№	Назва речовини	Вміст в продуктах та відходах, мг/дм ³	ГДК, мг/дм ³
1	Аміак	1,9 – 3,0	2,0
2	Бензолні вуглеводні	1,0 – 2,2	0,5
3	Піридинові основи	0,04 – 0,68	0,2
4	Сірководень	0,03 – 0,32	0,003
5	Нафталін	0,0004 – 0,1	0,01
6	Ацетилен	0,000003 – 0,015	0,0015
7	Синильна кислота	0,000006 – 0,008	0,0035
8	Фенол	0,0013	0,001

При вивченні геоміграційних процесів визначальну роль грає масоперенос, який є процесом переміщення компонентів підземних вод (мігрантів). Значущість вивчення процесів масопереносу пов'язана з високою рухливістю водних розчинів в літосфері.

У фільтраційному потоці підземних вод найбільшу роль зазвичай грає конвективне перенесення, що відбувається гідравлічним шляхом разом з водою, що фільтрується. Одиничний масовий потік конвективного масопереносу j_k , що є кількістю мігранта, який проходить конвективним шляхом через одиначну площу потоку в одиначу часу, буде

$$j_k = C * V, \quad (1)$$

де j_k – потік конвективного масопереносу;

C – концентрація мігранта;

V – швидкість фільтрації, пов'язана з дійсною швидкістю течії u_0 співвідношенням $u_0 = V/n_0$, де n_0 – активна пористість породи.

Крім того, в процесах масопереносу беруть участь різні форми дисперсії, що обумовлюють розсіювання мігрантів в просторі. При цьому виділяються процеси мікродисперсії, здійснювані на молекулярному і внутрішньопоровому (внутрішньотріщинному) рівнях, і макродисперсії, здійснювані на рівнях агрегатів і блоків порід.

На молекулярному рівні мікродисперсія обумовлюється, передусім, процесом молекулярної дифузії, яка створює потік мігранта, що описується законом Фіка

$$j_d = D_m \text{grad} C, \quad (2)$$

де j_d – одиначний масовий дифузійний потік (кількість речовини, дифундує через одиначну площу потоку в одиначу часу);

D_m – коефіцієнт молекулярної дифузії.

Коефіцієнт молекулярної дифузії характеризує звивистість шляхів фільтрації в пористому середовищі, причому, за дослідними даними, для незцементованих пісків дорівнює 0,5–0,7, а для зцементованих 0,25–0,5.

За даними лабораторних досліджень значення коефіцієнта дифузії для глинистих порід мають порядок 10^{-5} м²/добу. В той же час величина D_m може істотно зменшуватися при ущільненні порід, а при неповному водонасиченні величина D_m істотно залежить від вологості.

Закон Фіка у формулі (2) справедливий для ізотермічних процесів і при незалежній дифузії компонентів розчину. Інакше виникають складніші явища не ізотермічної багатокомпонентної дифузії.

Подовження гідродисперсії (за напрямом потоку) описується законом Фіка, в якому D_m замінюється на коефіцієнт подовжньої гідродисперсії, залежної від швидкості фільтрації. За результатами лабораторних дослідів для однорідних пісків виходить лінійна залежність D_l від V

$$D_l = D_m + \delta_l V. \quad (3)$$

Узагальнення експериментальних даних вказує на можливість використання для піщано-гравійних порід порушеної будови залежності (3).

При неоднорідному потоці перенесення виникає також поперечна гідродисперсія, яка створює поперечний потік мігранта, що також визначається законом Фіка, в якому D_m замінюється на коефіцієнт поперечної дисперсії D_m . Задовільну їх апроксимацію можна представити як

$$D_t = D_m + \delta_t V, \quad (4)$$

де δ_t – параметр поперечної гідродисперсії, що має для дрібнозернистих пісків характерні значення $\delta_t = 0,06 - 0,2$ мм.

У гомогенному середовищі модель перенесення включає опис конвективного перенесення і мікродисперсії. У моделі конвективного перенесення використовується схема поршневого витіснення, в якій приймається, що усі частки води рухаються в кожному перерізі з однаковою швидкістю. Знайдемо в такій постановці вираження для швидкості переміщення межі розділу (фронт витіснення) розчинів мігрантів, що розділяють області з концентраціями у воді C і C_0 , за умови миттєвого настання сорбційної рівноваги (тобто, без урахування кінетики сорбції), складаючи балансове рівняння мігранта в нескінченному малому елементі струму dl , який проходить межу розділу розчинів мігранта за час dt :

$$U = \frac{dl}{dt} = \frac{Q}{\omega} \left(n_0 + \frac{N - N_0}{C - C_0} \right)^{-1}, \quad (5)$$

де Q – дебіт потоку на токовій лінії;

N і N_0 – вміст сорбованого мігранта в одиничному об'ємі породи;

C і C_0 – концентрації розчинів;

ω – площа поперечного перерізу токової лінії.

Рішення рівняння (5) отримується інтеграцією по напрямках траєкторій течій, які повинні заздалегідь будуватись на основі геофільтраційних розрахунків, що проводяться в загальному випадку з використанням методів чисельного моделювання.

При накладенні конвективного і дисперсійного перенесення сумарний одиничний масовий потік j_m буде

$$j_m = j_k + j_d, \quad (6)$$

де j_k визначається з (1), а j_d для мікродисперсії визначається вираженням (2), де у фільтраційному потоці D_m замінюється на коефіцієнт гідродисперсії D_l .

Теоретичний опис такого процесу проведемо для одновимірного переносу у фільтраційному потоці зі швидкістю фільтрації V у напрямі l при записі (7) у формі

$$j_m = C * V = D_l \frac{\partial C}{\partial l}. \quad (7)$$

Балансове рівняння для нейтрального мігранта в нескінченно малому елементі завдовжки ∂l і одиничній площі поперечного перерізу:

$$\frac{\partial j_m}{\partial l} + n_0 \frac{\partial C}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

де n_0 – активна пористість породи.

Підставляючи в (8) вираження (7) для j_m , отримаємо диференціальне рівняння одновимірного конвективно-дисперсійного перенесення

$$n_0 \frac{\partial c}{\partial t} + V \frac{\partial c}{\partial l} = D_l \frac{\partial^2 c}{\partial l^2}. \quad (9)$$

Перетворивши (9), і вводячи в нього інтегральне перетворення по Лапласу-Карсону $\bar{C} = L(c)$

$$n_0 p (\bar{C} - C_0) + V \frac{\partial \bar{C}}{\partial l} = D_l \frac{d^2 \bar{C}}{dl^2}, \quad (10)$$

де p – параметр перетворення.

Рішення (10) за умови $\bar{C} = C_0$ на межі $l = 0$ напівобмеженого потоку має вигляд

$$\frac{\bar{C} - C_0}{C^0 - C_0} = e^{-al}, \quad a = \sqrt{\left(\frac{V}{2D_l}\right)^2 + \frac{n_0 p}{D_l}} - \frac{V}{2D_l}. \quad (11)$$

Перехід від (11) до оригіналу при $C^0 = \text{const}$ дає

$$\bar{C} = \frac{C - C_0}{C^0 - C_0} = 0,5(\text{erfc}\xi + e^\eta \text{erfc}\xi^*), \quad (12a)$$

$$\xi = \frac{n_0 l - Vt}{2\sqrt{n_0 D_l t}}, \quad \xi^* = \frac{n_0 l + Vt}{2\sqrt{n_0 D_l t}}, \quad \eta = \frac{Vl}{D_l}. \quad (12b)$$

Розрахунки по (12) показують, що через деякий час після початку процесу формуються три основні міграційні зони: витісняючого мігранта (з відносною концентрацією $\bar{C} = 1$), перехідна ($1 > \bar{C} > 0$) і початкового вмісту мігранта $\bar{C} = 0$. Другий член рівняння (12a) виявляється дуже малим, і тоді ним можна знехтувати і користуватися спрощеним вираженням для відносної концентрації

$$\bar{C} = 0,5 \text{erfc}\xi. \quad (13)$$

З аналізу рішення фундаментальної задачі можна отримати уявлення про особливості прояву конвективної і дисперсійної форм переносу. З (13) виходить, що на фронті поршневого витіснення, визначуваному тільки конвективним переносом, де $l = l_0 = \frac{Vt}{n_0}$, положення фронту поршневого витіснення відповідає середині перехідної зони з середньою концентрацією між тим розчином, що витісняє, і тим, що витісняється.

Для опису поперечної макродисперсії доцільне використання моделі «просіювання» дрібних часток через сітку великих зерен, що «фільтрують». На такій моделі для точкової подачі дрібних часток встановлений розподіл їх концентрації в пласкому потоці

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\frac{2\pi x}{d}}} \exp\left(-\frac{y^2}{2xd}\right), \quad (14a)$$

де C_0 – вихідна концентрація;

x і y – координати за напрямом просіювання (фільтрації) і перпендикулярно до нього;

d – діаметр зерен, що фільтрують, відповідний розміру блоків.

Зіставимо з (14а) вираження, отримане рішенням задачі конвективно-дисперсійного перенесення, що дає розподіл концентрації в потоці, що рухається зі швидкістю V без подовжньої дисперсії, але з поперечною, такою, що характеризується коефіцієнтом D_m , при дії на початку координат джерела постійної інтенсивності $P = V \cdot d \cdot C_0$. Таке рішення дає для концентрації мігранта вираження

$$c = \frac{P}{2\sqrt{\pi D_y x V}} \exp\left(-\frac{Vy^2}{4D_y x}\right), \quad (14б)$$

де $D_y = D_m$ – коефіцієнт поперечної дисперсії (за напрямом y).

Зіставляючи рівняння (14а) і (14б), можна бачити їх ідентичність, причому вони тотожно співпадають, якщо уявити, що

$$D_T = \delta_T V, \quad \delta_T = \frac{d}{2}. \quad (15)$$

Вважаючи форму блоків кубічною і ідентифікуючи діаметр зерен з розміром блоку (для супісків і суглинків – 0,1 м, для пісків – 1 – 10 м), можна зв'язати величину з коефіцієнтом дифузійного масопереносу. Приймаючи для блоків кубічної форми $f_d = 36$, виходить співвідношення

$$\delta_T = \sqrt[3]{\frac{D_m}{\alpha_d}}. \quad (16)$$

За наведеними методиками були проведені розрахунки горизонтальної та вертикальної міграції компонентів-контаніантів (див. табл. 1). Параметри розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку [1, 4]

№	Назва параметру	Надвугільний горизонт	Підвугільний горизонт
1	Коефіцієнт фільтрації, K_{ϕ} , м/добу	3-6	6-12
2	Активна пористість, n , ч.о.	0,175	
3	Гradient потоку I , ч.о.	0,014	
4	Довжина шляху фільтрації, L , м	5000	
5	Період часу, t , діб	182,5	
6	Діаметр зерен, що фільтрують, d , м	10	

Для проведення розрахунку коефіцієнта гідродисперсії існує чимало методів, але для даного випадку вихідні дані дозволяють використати метод Авер'янова

$$D = \frac{vL}{2 \ln \frac{C_0}{C_0}}, \quad (17)$$

де V – швидкість руху підземних вод, яка обчислюється $V = \frac{K_{\phi} I}{n}$.

Для оцінки горизонтального масопереносу були використані (12а), (12б) і (17). Результати розрахунків представлені на рис. 1. Суттєва різниця між результатами у надвугільному та у підвугільному водоносному горизонтах пов'язана з відмінністю фільтраційних параметрів. Найбільший радіус забруднення спостерігається в аміаку, хоча різниця між вихідною та гранично допустимою концентраціями одна з найменших. Тоді як різниця концентрацій сірководню найбільша, а радіус забруднення один з найменших. Отже, ступінь забруднення не залежить від різниці концентрацій і для кожного контаніанта повинна визначатися

окремо, а встановлення істинних закономірностей розповсюдження забруднення в горизонтальному напрямі потребує додаткового дослідження.

Для оцінки вертикального масопереносу були використані (4.14а), (4.14б) та (4.15). Розрахунки показали ідентичність характеру забруднення від усіх речовин. В обох водоносних горизонтах забруднення буде розповсюджуватись аналогічно для всіх контамінантів. Найбільше забруднення буде від сірководню і складатиме 57 м у розрізі, а найменше (2,5 м) – від аміаку та фенолу. Така закономірність чітко відображає взаємозв'язок між різницею концентрацій та радіусом вертикального забруднення.



Рис. 1. Діаграма розповсюдження забруднення від різних контамінантів у горизонтальному напрямі

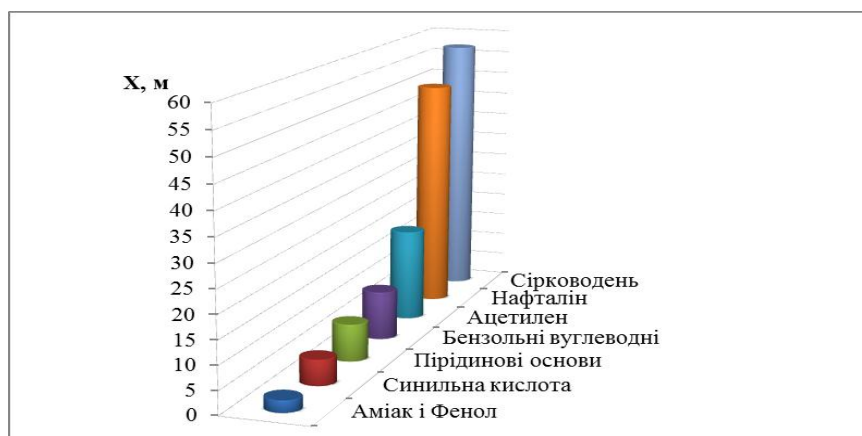


Рис. 2. Діаграма вертикального розповсюдження речовин-контамінантів

Бібліографічні посилання

1. **Колоколов О. В.** 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.

2. Федеральные санитарные правила, нормы и гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – М.: Минздрав России, 1998. – 73 с.

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

4. **Радзивил А. Я.** Днепровский буроугольный бассейн / А. Я. Радзивил, С. А. Гуридов, М. А. Самарин и др. – К.: Наук. думка, 1987. – 328 с., ил., табл.

Надійшла до редколегії 21.04.2014 р..