

**ТЕХНОЛОГІЯ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ  
НЕКОНДИЦІЙНИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ  
ВОДЯНОЮ ПАРОЮ ТА ОКСИДОМ  
КАЛЬЦІЮ**

© 2011 Стефанік Ю.В., д.т.н.,  
Брик Д.В., к.т.н. (ІТТК НАНУ),  
Тенюк Т.О. (НУ «Львівська політехніка»)

*Запропоновано спосіб підземної газифікації вугільних пластів, що підвищує теплоту згоряння горючого газу і унеможливорює просідання земної поверхні у місці проведення процесу газифікації. У якості основних реагентів використовують перегріту водяну пару й оксид кальцію.*

*Розроблено метод для розрахунку реакційної зони процесу газифікації в умовах термодинамічної рівноваги.*

*The method of underground gasification of coal beds was proposed that raises the heat of combustion of fuel gas and eliminates the subsidence of the earth surface in the site of implementation of the gasification process. As the main reagents, the superheated water steam and calcium oxide are used.*

*The method was developed to calculate the reaction zone of the gasification process under conditions of thermodynamic equilibrium.*

Ключові слова: вугільний пласт, газифікація, діоксид кальцію, термодинамічна рівновага, математична модель.

В результаті підземної газифікації вугілля (ПГВ) у вугільних пластах утворюються порожнини за рахунок термічного перетворення вуглецю у горючий газ. В ці порожнини обвалюється покрівля вугільного пласта, що при невеликих глибинах залягання вугілля призводить до просідання ґрунту на поверхні. Чим більша потужність вугільного пласта, тим більший об'єм порожнин, а отже тим більші руйнування поверхні, що може призвести до серйозних техногенних наслідків. Щоб запобігти цьому негативному явищу пропонується технологія ПГВ, яка унеможливорює просідання поверхні ґрунту.

Традиційно процес підземної газифікації вугілля здійснюють через нагнітальні та видобувні свердловини [1], котрі обсажені колонами на термостійкому цементі до покрівлі вугільного пласта. В нагнітальну свердловину опускають теплоізольовані труби для збереження колони труб від термічних перенапружень при подачі в свердловину гарячих реагентів. У видобувну свердловину опускають до вибою (підшви пласта) звичайну колону труб для виведення продуктів реакції на поверхню. На вибоях обох свердловин встановлюють контрольні термопари.

В якості основного реагенту нами пропонується використовувати водяну пару. Використання здійснюють шляхом закачування в теплоізольовану трубу нагнітальної свердловини перегрітої пари з температурою не нижче від 380 °С з урахуванням максимальної приймальності свердловини. Перед запуском нагнітальної свердловини (при необхідності) підвищують її приймальність засобами спрямованого гідророзриву.

В процесі запуску нагнітальної свердловини нагрівають її привибійну зону потоком гарячої води або пари до температури  $\sim 380$  °С. Після цього знижують витрати гарячого реагенту і подають у свердловину через міжтрубний простір кисень або повітря. Після запалювання вугільного пласта в потоці кисню (повітря) поступово підвищують витрати водяної пари до проектного значення і шляхом регулювання витрат кисню (повітря) стабілізують робочу температуру в зоні реакції синтезу на рівні  $\sim 900$  °С, що контролюється як вибією термопарою, так і розрахунковим складом продуктів реакції [2].

Після доведення нагнітальної свердловини до проектного режиму роботи спостерігають за тиском нагнітання і у випадку його зниження (внаслідок вигорання вугілля в привибійній зоні) включають подачу вапна ( $\text{CaO}$ ) у потік кисню (повітря) в розрахунковій кіль-

кості. Потрапляючи в порожнину вигорілого вугілля ця домішка виконує низку корисних функцій, а саме:

– реагуючи з  $\text{CO}_2$  в пласті з виділенням тепла ( $\sim 172$  кДж/моль), частково компенсує ендотермічний ефект реакції і деяку частку теплопровідних втрат у підшву і покрівлю вугільного пласта;

– заповнює вироблені (вигорілі) порожнини в пласті утвореним карбонатом кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ), що запобігає просіданню поверхні;

– підтримує на заданому рівні режим роботи підземного газогенератора за рахунок звуження прохідних каналів та усунення байпасів;

– очищує отриманий газ за рахунок поглинання екологічно шкідливих домішок в продуктах реакції – наприклад, внаслідок вилучення з них сполук сірки (перехід в  $\text{CaSO}_3$ ).

**Розрахунковий рівноважний компонентний склад горючого газу, що синтезується в підземних умовах при надлишку вуглецю під впливом двох молів водяної пари з додаваннями  $n_x$  молів кисню і  $n_y$  молів вапна при температурі 1110 К**

№ п/п	Тиск, Р, МПа	Кількість молів			Компонентний склад газу в мольних частках					Загальна кількість молів, $\bar{N}$	Примітка
		кисню, $n_x$ , моль	вапна, $n_y$ , моль	вуглецю в складі газової фази, $n_c$	$\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$		
1	0,1	0,975	0,475	2,810	0,390	0,019	0,006	0,558	0,027	4,755	Кількість добавок $n_x$ і $n_y$ підібрано за умовами бутування вигорілого простору кальцитом і сумарної екзотермічності процесу в межах 15-17 ккал.
2	1,5	0,561	0,301	1,780	0,329	0,142	0,061	0,328	0,139	3,367	
3	4,0	0,423	0,253	1,499	0,265	0,215	0,107	0,230	0,183	2,884	
4	8,0	0,352	0,232	1,373	0,216	0,263	0,141	0,173	0,207	2,631	
5	12,0	0,324	0,224	1,323	0,187	0,288	0,159	0,146	0,220	2,520	
6	20,0	0,295	0,215	1,275	0,154	0,316	0,181	0,116	0,233	2,406	
7	36,0	0,685	0,209	1,234	0,122	0,342	0,202	0,089	0,245	2,302	

У випадку підвищення тиску нагнітання (вище проектної норми) подачу CaO тимчасово припиняють до відповідного зниження тиску нагнітання.

Надлишок перегрітої водяної пари в продуктах реакції потрапляє в холодні зони пласта і там конденсується, утворюючи гарячу зону конденсату, котра швидко переміщується попереду зони реакції зі швидкістю в декілька раз більшою від швидкості пересування зони реакції. Тому у видобувній свердловині гарячі продукти реакції з температурою, що відповідає тиску насиченої пари води, з'являються значно раніше повного вироблення пласта. Ці продукти виводяться з видобувної свердловини в гарячому вигляді і на поверхні їх фізичне тепло утилізується в протитоковому теплообміннику, а одержані холодні продукти розділяються за фазами в сепараторах. Нагріта гарячими продуктами протитокова вода поступає в парогенератор, а холодний конденсат – в комору-відстійник, який включається в роботу після відстоювання в замкнутій цикл процесу. У випадку високої температури (більше від 250 °С) продуктів реакції, що виходять з видобувної свердловини, для їх охолодження в затрубний простір подають необхідну кількість холодної води [3].

Запуск нагнітальної свердловини починається з розпалювання вугільного пласта відомими способами з наступним нагнітанням кисню (повітря) і перегрітої пари з надкритичною температурою (не нижче від 380 °С). Витрати реагентів доводять до проектних значень і контролюють температуру на вибої свердловини термо-парою. Температура в зоні синтезу встановлюється на рівні 850-950 °С і контролюється за складом газів, що виходять на поверхню за проектним протитиском.

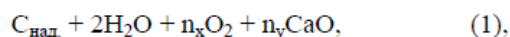
Якщо тиск нагнітання знизився, що свідчить про вигорання вугілля у привибійній зоні свердловини, включається подача сухого пилу CaO в потік кисню (повітря) в розрахунковій кількості. Перетворюючись у пласті в карбонат кальцію за схемою  $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$  (з

перегрітою парою CaO не реагує), нерозчинний кальцит осідає у вигорілих пустотах пласта. У випадку загрози закупорювання проходів реагенту в пласті, що відстежується за ростом тиску нагнітання, тимчасово припиняють подачу CaO і режим роботи нагнітальної свердловини відновлюється. При низькому тиску в нагнітальній свердловині потрібно після припинення подачі CaO тимчасово підняти тиск нагнітання до граничного значення розкриття тріщин.

Ще одним позитивним чинником крім заповнення пустот є те, що реакція утворення кальциту з оксидів є екзотермічною, що компенсує теплові втрати в пласті і сприяє переходу ендотермічної реакції синтезу в екзотермічну. Вапно з'єднується в пласті не тільки з діоксидом вуглецю, але й з оксидами сірки SO<sub>2</sub> і SO<sub>3</sub>, утворюючи при цьому гіпси. Це практично очищає продукти реакції від сірки. Вугільний пил частково вимивається з продуктів реакції гарячою водою. Таким чином, з видобувної свердловини на поверхню виходять екологічно чисті цільові гази.

Для визначення кількості вапна, що подається на вибій нагнітальної свердловини в процесі підземної газифікації вугільного пласта, розглянемо стехіометричну суміш вихідних реагентів та продуктів реакції синтезу в умовах термодинамічної рівноваги, оскільки при високих температурах і відносно низьких значеннях тиску процес ППВ можна розглядати як квазірівноважний.

Вихідні реагенти:

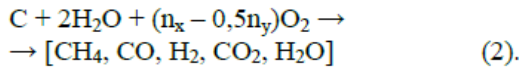


де вуглець в пласті  $C_{\text{над}}$  є в надлишку (далі просто C);  $n_x$  – кількість молів O<sub>2</sub>;  $n_y$  – кількість молів CaO.

В продуктах реакції варто очікувати наступні хімічні сполуки: CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O,  $n_y\text{CaCO}_3$ .

У вихідних реагентах кількість O<sub>2</sub> дорівнює  $1 + n_x$ . Але в газовій фазі домішка CaO

знижує кількість молів кисню  $O_2$ , тому вона становить  $1 + n_x - 0,5n_y$  і склад газової фази треба розраховувати за наступною стехіометричною схемою:



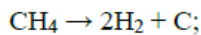
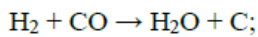
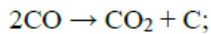
На основі законів рівноважної термодинаміки складаємо систему незалежних рівнянь.

Рівняння нормування мольних часток:

$$\sum_i \gamma_i \equiv 1 \quad (3),$$

рівняння збереження кількості молекул водню:

$$\bar{N} (2\gamma_{CH_4} + \gamma_{H_2} + \gamma_{H_2O}) = 2 \quad (4),$$



$$\gamma_{CO}^2 = K_{T_1}^0 \gamma_{CO_2} / P \quad (6);$$

$$\gamma_{H_2O} = K_{T_2}^0 \gamma_{CO} \gamma_{H_2} \cdot P \quad (7);$$

$$\gamma_{CH_4} = K_{T_3}^0 \gamma_{H_2}^2 \cdot P \quad (8);$$

де  $K_T^0$  – стандартні значення констант рівноваги утворення сполук для вказаних зліва хімічних реакцій (6) – (8) при заданій температурі  $T$ ;

$P$  – загальний тиск в зоні синтезу.

Далі обчислюємо склад газової фази і визначаємо кількість молів  $n_y$ , необхідну для бутування вигорілого простору у вугільному пласті за формулою:

$$n_y = \frac{\bar{N}(\gamma_{CO} + \gamma_{CO_2} + \gamma_{CH_4})}{\frac{M_{CaCO_3} \cdot \rho_C}{M_C \cdot \rho_{CaCO_3}}} - 1 \quad (9),$$

де  $M$  і  $\rho$  – відповідно значення молекулярної ваги і густини  $CaCO_3$  і вуглецю.

В таблиці наведено розрахунковий компонентний склад горючого газу, що синтезується в підземних умовах при надлишку кисню дією двох молів водяного пару з добавкою  $n_x$  молів кисню і  $n_y$  молів вапна при температурі 1100 К і значеннях тиску від 0,1 до 36,0 МПа.

рівняння збереження кількості молекул кисню:

$$\bar{N}(\gamma_{CO_2} + 0,5\gamma_{CO} + 0,5\gamma_{H_2O}) = 1 + n_x - 0,5n_y \quad (5).$$

де  $\gamma_i$  – рівноважна мольна частка в газовій фазі компонента, позначеного індексом  $i$ ;

$\bar{N}$  – загальна кількість молів у газовій фазі.

Виключаючи з рівнянь (4) і (5) значення  $\bar{N}$ , отримуємо два незалежних рівняння, з яких визначаються дві невідомі мольні частки компонентів  $CO$  і  $H_2$ . Решта розраховуються за табличними константами хімічної рівноваги згідно з відомими стехіометричними реакціями, а саме:

Використовуючи наведені в таблиці розрахункові дані процесу підземної газифікації вугілля в різних термодинамічних умовах можна вирахувати наступні параметри:

- екзотермічність процесу;
- теплоту згорання газу;
- питомий об'єм отриманого газу;
- питомі витрати кисню;
- питома повернення води;
- максимальний енергетичний коефіцієнт корисної дії.

На основі отриманих розрахункових технологічних характеристик виробництва синтез-газу з вугілля в підземних умовах за схемою, що унеможливорює просідання поверхні ґрунту, можна у майбутньому дати детальну техніко-економічну оцінку процесу підземної газифікації некондиційного вугілля для впровадження його у практику на вугільних родовищах України.

## Бібліографічний список

1. Стефаник Ю.В. Геотехнология некондиционных твердых топлив / Стефаник Юрий Васильевич. – Киев: Наукова думка, 1990. – 266 с.

2. Стефаник Ю.В. Теоретичне визначення термодинамічних параметрів геотехнологічних процесів у вугіллі за складом отримуваних на поверхні газів / Стефаник Ю.В.,

Брик Д.В. // Углехимический журнал. – 2008. – № 3-4. – С. 18-22.

3. Пат. 4481 Україна. Спосіб підземної газифікації вугілля / Чекалюк Е.Б., Брик Д.В., Гвоздевич О.В. [та ін.] // Бюл. – 1994. – № 6-2. – С. 2.

Рукопис надійшов до редакції 18.01.2011