УДК 622.278

П.Б. Саїк
В.Г. Лозинський
В.С. Фальштинський
М.С. Демидов

ДО ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

В роботі представлені дослідження інтенсифікації процесу підземної газифікації вугілля шляхом визначення концентрації горючих генераторних газів (CO, H_2, CH_4) залежно від температури відновної зони реакційного каналу та швидкості газового потоку за його довжиною.

Встановлено, що об'єм вугілля, який газифікується, змінюється прямопропорційно кількості згорілого вуглецю та швидкості дуття. Підвищення інтенсивності газифікації відбувається за умови рівності концентрацій кисню та вуглецю у реакційному каналі підземного газогенератора. Швидкість газифікації зумовлюється інтенсивністю хімічних реакцій і безпосередньо залежить від інтенсивності підведення до вугільного масиву кисню й відведення продуктів газифікації.

Ключові слова: підземна газифікація, газогенератор, генераторний газ, інтенсифікація.

Вступ. Розвиток та впровадження альтернативних технологій отримання енергетичного газу є вкрай важливим процесом не лише в даний час, але й для перехідного періоду, коли промисловості органічного та неорганічного синтезу після вичерпання запасів природного газу й нафти доведеться звернутися до твердого палива [1 – 3]. Вдосконалення технології ПГВ є якісним стрибком у розвитку продуктивних сил, що дозволяє внести корінний перелом у розвиток енергетики, хімії, добувної та інших галузей промисловості.

Інвестиційні проекти виробництва газу підземної газифікації вугілля в сучасних умовах розглядаються у двох основних апробованих у промисловій практиці варіантах [4]. До першого відносяться підприємства ПГВ, продуктом яких є газ з теплотою спалювання понад 4,5 – 5,0 МДж/м^3 для виробництва теплової й електроенергії на ТЕС. До другого – енергохімічний комплекс «ПГВ-ТЕС», у схемі якого використовуються техніко-технологічні рішення, що збільшують ККД за рахунок парогазових установок і покращують екологічну чистоту комплексу шляхом переробки вихідних продуктів газифікації.

Актуальність проблеми. За останні роки проведена низка досліджень з удосконалення процесу ПГВ. Розроблені нові технологічні та конструкторсько-компоновані рішення з ведення процесу газифікації [5, 6], вдосконалено режими управління підземним газогенератором з виходом на ефективний режим [7, 8], визначені критерії придатності некондиційних вугільних пластів до газифікації [9, 10], тощо. Незважаючи на це, ККД процесу не перевищує 55 – 60%. Тому необхідно додатково проводити дослідження, що пов'язані з інтенсифікацією процесу газифікації, за рахунок хімічних і фізичних процесів, таких як: кількісні поєднання між константами швидкості хімічного процесу; швидкістю дуття; умовами підведення кисню до вугільної поверхні; коефіцієнтом дифузії; концентрацією кисню в дуттьовій суміші, яка подається в зону газифікації; шляхів підвищення концентрації горючих компонентів у вихідному газі та ін.

Метою даної статті є дослідження низки питань, що пов'язані з хімічними процесами у підземному газогенераторі, змодельованому у вугільному пласті.

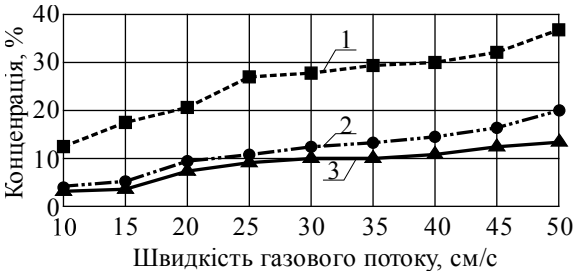
Методика проведення досліджень. Експериментальні дослідження проводились на лабораторній установці, запатентованій і розробленій у Державному ВНЗ «НГУ» [11]. У загальному вигляді установка складається з чотирьох основних елементів: випробувального стенда, дуттьової та газовідвідної систем, а також контрольно-вимірювальної апаратури. Центральною ланкою установки є випробувальний стенд – металевий ящик, зварений з листової сталі товщиною 5 мм. Стенд виконаний з однієї секції (2,5 × 2,0 × 2,2 м) з активною платформою, що призначена для відтворення кута залягання вугільного пласта. З фронтальної частини стенда знаходяться отвори для подачі дуття і відводу генераторного газу. Герметизація стенда забезпечується викорис-

танням з'ємної двоблокової кришки, обладнаної активними гніздами для реперів і термопар. Для зменшення втрат тепла стенд із середини ізольований жаростійкою цеглою.

Контроль за якісним складом генераторного газу проводився за допомогою газоаналізаторів ВХ-170 та Casboard-3200L. Витрата дуттьової суміші та вихід кількості генераторного газу контролювався за допомогою витратомірів ІРВІС-К300, що обладнані перетворювачами сигналу. Перед процесом моделювання підземного газогенератора попередньо були встановлені геометричні, механічні та кінематичні масштабні коефіцієнти, що забезпечують умови подібності щодо натурних досліджень [12].

Як еквівалентний матеріал використовувався породовугільний масив Донецького басейну Соленівської ділянки. Глибина залягання пласта c_6^1 – 75 – 135 м. Безпосередня покрівля представлена піщаниками, сірими сланцями з прошарками глинистого сланцю міцністю f = 3 – 4 і потужністю 3,2 м. Основна покрівля, потужністю 6 м, представлена піскуватим сланцем міцністю f = 5 – 8 [13, 14].

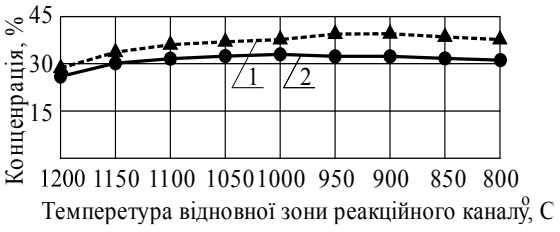
Результати досліджень. У процесі проведення досліджень в канал підземного газогенератора подавалось повітряне дуття. Його витрати варіювались від 28,7 до 42,5 см/с. Склад продуктів горіння залежно від швидкості газу та температури вугілля наведений на Рис. 1 та Рис. 2. Похибка спостережень складала 4 – 6%. Газ після охолодження поступав на газоаналізатор.



1 – CO; 2 – H_2; 3 – CH_4

Рис. 1. Концентрація горючих газів від швидкості газового потоку.

З аналізу графіків 1, 2, 3 (Рис. 1) видно, що при швидкостях руху газового потоку до 50 см/с збільшується склад горючих газів. Це пов'язано з дифузією кисню по стінках каналу підземного газогенератора при ізотермічному перебігу газу через канал і наявності хімічних реакцій на стінках вугілля.



1 – 42,5 см/с; 2 – 28,7 см/с

Рис. 2. Графік зміни концентрації горючих газів (CO, H_2, CH_4) від температури відновної зони реакційного каналу та швидкості газового потоку

Швидкість хімічного процесу на стінках вугілля в реакційному каналі визначається наступним виразом [15]:

$$U = k \cdot \alpha , \qquad (1)$$

де U – питома швидкість горіння кисню (кількість кисню, що згоряє за одиницю часу на одиниці поверхні);

k – концентрація кисню на поверхні вуглецю, %;

α – константа швидкості реакції.

Склад продуктів горіння залежить від гідродинамічного режиму газу [11]. Для аналізу характеристики якості складу газу, який утворився в каналі підземного газогенератора використовуємо співвідношення:

$$\gamma = \frac{\mathrm{CO}}{\mathrm{CO} + \mathrm{CO}_2}, \qquad (2)$$

де CO и CO_2 – концентрації монооксиду вуглецю та діоксиду вуглецю в об'ємних відсотках.

Співвідношення (2) показує, яка частина згорілого вуглецю йде на утворення CO. При γ = 1 утворюється тільки CO.

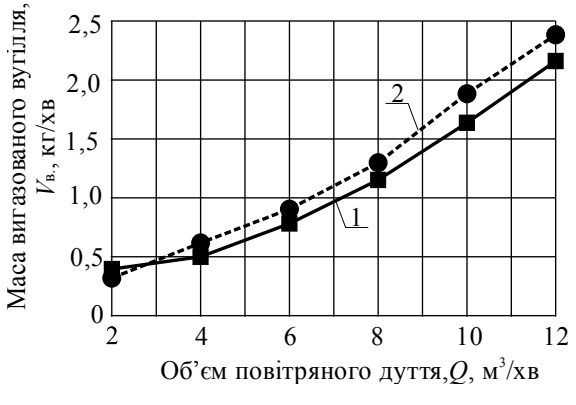
Дослідження із визначення концентрації складових продуктів горіння при невеликих швидкостях газу (ламінарний рух газу) показали, що у генераторному газі складовим компонентом є CO_2 ($\gamma \le 0{,}15$). Концентрація CO є залишком первинної реакції CO, яка утворюється в окислювальній зоні. При вторинній реакції CO буде утворюватися у відновній зоні за участю діоксиду вуглецю та вуглецю при температурі стінок каналу газогенератора 800 – 1200°С. Безперечним є те, що кількість CO та показник γ буде зростати по довжині каналу.

При температурах у реакційному каналі ниже 900°С і при наявності швидкостей газового потоку понад 25 см/с вихід СО знижується на 25 – 46%.

Виходячи з аналізу гідродинамічних характеристик на газоутворення, можна стверджувати, що монооксид вуглецю був продуктом первинної реакції кисню з вугіллям. Це доводить, що поява значної кількості монооксиду вуглецю за умови, коли швидкість газу в каналі настільки велика, час контакту кисню з монооксидом вуглецю недостатній для протікання горіння СО.

При ламінарному режимі дуття відсоток використаного кисню (при постійній довжині каналу) різко падає зі збільшенням швидкості дуття. При турбулентному режимі дуття цей відсоток виявляється майже незалежним від швидкості дуття. Це означає, що довжина каналу, при якій без залишку згорає весь кисень, залежить від швидкості газу. При ламінарному потоці в міру підвищення швидкості довжина окислювальної зони повинна безперервно збільшуватися. Для області «турбулентного горіння» характерною є стабільність довжини окислювальної зони. Звідси також можна зробити висновок про зростання інтенсивності горіння у зв'язку з переходом до турбулентного режиму дуття.

Результати за даними дослідженнями наведено на Рис. 3. Характер кривих газифікації вугілля в ламінарному режимі з переходом на турбулентний змінюється прямопропорційно кількості згорілого вуглецю від швидкості дуття.



1 – 20°С; 2 – 160°С

Рис. 3. Графік зміни маси вигазованого вугілля від об'єму подачі повітряного дуття, при його змінній температурі.

Необхідно відзначити, що при досягненні швидкостей газу в каналі понад 12 м³/хв, підвищення інтенсивності горіння не відбувається. Підвищення інтенсивності можливе лише тоді, коли кількість вуглецю, що здатна вступити в реакцію з киснем, буде рівна кількості кисню.

Швидкість газифікації зумовлюється інтенсивністю хімічних реакцій і безпосередньо залежить від інтенсивності підведення до вугільного масиву кисню й відведення продуктів газифікації. Контакт кисню з вугіллям відбувається порівняно повільно, шляхом дифузії.

Під впливом високої температури, яка зазвичай встановлюється при газифікації (1100 – 1200°С), швидкість горіння визначається, головним чином, інтенсивністю дифузії кисню до реакційної поверхні вугільного пласта. Якщо швидкість руху повітря на поверхні вогневого вибою збільшити до сотень метрів на секунду, то процес газифікації буде відбуватися з більшою інтенсивністю. Швидкість горіння збільшується також з підвищенням температури, тиску та зі збільшенням концентрації кисню.

Склад газу ПГВ визначається не лише елементним складом твердого палива та видом дуття, що подається в підземний газогенератор, а й співвідношенням між довжинами окислювальної та відновної зон і середньої температури газової фази в межах кожної з цих зон.

У окислювальній зоні відбувається горіння вуглецю та кисню, які є у дуттьовій суміші, що подається в підземний газогенератор за первинними реакціями (q – теплова енергія, що утворюється в процесі реакцій):

$$C + O_2 = CO_2 + q \quad (3)$$

$$2C + O_2 = 2CO + q \quad (4)$$

$$C + H_2O = CO + H_2 + q \quad (5)$$

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - q \quad (6)$$

Газоподібні продукти, що утворилися в результаті первинних реакцій, вступають, у свою чергу, в реакції з вуглецем палива, киснем, водяною парою та між собою:

$$C + CO_2 = 2CO_2 \pm q \quad (7)$$

$$C + 2H_2 = CH_4 \pm q \quad (8)$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2 + q \quad (9)$$

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O + q \quad (10)$$

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + q \quad (11)$$

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 \pm q \quad (12)$$

$$2CO + 2H_2 = CH_4 + CO_2 \pm q \quad (13)$$

$$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O + q \quad (14)$$

Реакції (3) і (4) – основні джерела теплоти, яка витрачається при взаємодії вуглецю з водяною парою (5) і (6). Отже, при підвищених температурах можна очікувати збільшення виходу продуктів, що утворюються за реакціями (5), (8), (12), (13).

За розрахунковими даними вміст монооксиду вуглецю у продуктах газифікації з підвищенням температури постійно збільшується: при 600°С становить 6 – 7%; 800°С – 24 – 26%; 1000°С – 50%; а вміст діоксиду вуглецю знижується, відповідно – 35 –38%; 23 – 25% і 10%.

Таким чином, при ламінарному русі газів та швидкості дуття від 0,2 до 40 л/с згоряння CO і CO_2, відбувається, головним чином, поблизу поверхні вугілля і в об'ємному просторі підземного газогенератора.

Додатково було проведено дослідження відновної зони підземного газогенератора, де відбувається вторинна (зворотна) реакція (тобто реакція відновлення CO_2 вуглецем в температурі в межах 800 – 1100°С).

Найважливішою вторинною реакцією газифікації є гетерогенна реакція відновлення CO_2 в CO (7). У процесі газифікації твердого палива ця реакція в значній мірі визначає якість отриманого газу, яка протікає при високих температурах (вище 800°С). Ця ендотермічна реакція протікає у відновлювальній зоні підземного газогенератора.

В інтервалі температур 940 – 1000°С рівновага повністю зміщується вправо і в утвореному газі зростає концентрація CO, а вміст CO_2 знижується. При більш низьких температурах (400 – 500°С) рівновага зміщується навпаки вліво і при цьому CO_2 збільшується, а CO – зменшується. Процеси (8) і (12) екзотермічні, тому з підвищенням температури газифікації вихід отриманих газів знижується.

Необхідно відмітити, що реакції (6) і (7) у звичайних умовах газифікації мають ефект самозаторможення в результаті сильної неізотермічності процесу. Результати стендових експериментів з дослідження неізотермічних реакцій газифікації показують, що в основу методу підземної газифікації вугілля покладено принцип компенсації ендотермічного ефекту реакцій вуглецю з CO_2 і H_2O тільки за рахунок фізичного тепла газового потоку, що надходить з окислювальної зони [11].

У вогневий вибій разом з дуттям (повітрям) надходить азот – інертний газ, що не приймає участі в газифікації, тому абсолютна кількість його залишається незмінною. Оскільки газу виділяється більше (приблизно в 2 рази), ніж подається дуття, концентрація азоту в суміші знижується приблизно до 52 – 54%. Це тягне за собою зниження парціального тиску газів CO та CO_2 і створює умови, що сприяють відновленню CO_2 і H_2O.

Як було зазначено раніше, основними зонами газифікації вугілля є окислювальна та відновна. Зональність процесу газифікації вугільних пластів за результатами лабораторних досліджень детально представлена у роботі [16].

Аналіз наведених даних показав, що на відстані 30 м весь кисень прореагував, а концентрація CO_2 коливається у межах 10 – 14%. Вміст діоксиду вуглецю знижується – він відновлюється у монооксид вуглецю ($CO_2 + C = 2CO$), зміст якого систематично зростає. Таке збільшення обумовлене також реакцією взаємодії водяної пари з розжареним вуглецем, що одночасно призводить до відповідного збільшення вмісту водню ($H_2O + C = H_2 + CO$).

Крім цього, в канал газифікації з масиву вугілля надходить метан і пари води. У відновній зоні з поверхнею вугілля реагує вже не кисень дуття, а продукти газифікації, що утворилися в окислювальній зоні. На цій ділянці відбуваються ендотермічні реакції, пов'язані з відновленням CO_2 в CO.

Таким чином, у підземному газогенераторі вугільний пласт активно горить на порівняно невеликій ділянці завдовжки до 12 м від нагнітальної свердловини (окислювальна зона). На другій частині каналу (права його частина) утворюється відновна зона за довжиною 14 – 30 м. По довжині всього каналу газифікації утворюється суміш газів (CO, H_2, CH_4, CO_2, O_2, N_2). Нижча теплота згоряння отриманого газу становить 4 – 6 МДж/м^3. Температура газу в окислювальній зоні складає 1000 – 1200°С, а у відновній – 600 – 800°С і має тенденцію до зниження.

З аналізу експериментальних досліджень і міркувань можна зробити висновок, що для збільшення виходу горючих компонентів у відновній зоні необхідно підвищити температуру стінок вугілля в каналі. Тому ПГВ у природних умовах авторами роботи

пропонується організувати на принципово новому технологічному рівні. Для цього необхідно вдатися до періодичної зміни напрямку руху дуття і газу – реверсування газодуттьовими сумішами [17].

Зі збільшенням температури газифікації прискорюється реакція відновлення $CO_2 + C = 2CO$ приблизно в наступному співвідношенні: якщо при 850°С прийняти швидкість за одиницю, то вже при 1000°С інтенсивність відновлення зростає в 20 – 22 рази, при 1200°С – у 150 – 170 раз, а при 1500°С – у 1600 раз.

Процес відновлення діоксиду вуглецю залежить не лише від температури, але й від часу контакту CO_2 з реакційної поверхнею вугілля. Так, а при температурі 850 – 900°С рівновагу реакції $CO_2 + C = 2CO$ встановлюється через 35 – 65 хв контакту, при температурі 1000°С на рівновагу необхідно 2 – 3 хв, понад 1000°С – секунди.

При температурі понад 1100°С вміст монооксиду вуглецю у газі збільшується до 90 – 95% через 10 – 20 с завдяки контакту діоксиду вуглецю з розжареним вугіллям. Теоретичний склад газу на повітряному дутті при температурі 1000 – 1100°С складає: CO – 34 – 65,3%; CO_2 – 0,1%.

В результаті реверсування досягається підтримання оптимальної температури у відновній зоні газогенератора, що сприяє ефективним та сприятливим фізико-хімічним умовам протікання процесу газифікації вугілля, відбувається вирівнювання фронту вогневих робіт і рівномірність газифікації вугільного пласта [17].

Реверсна комбінація газодуттьових потоків (спочатку дуття подається в газогенератор по дуттьовій свердловині, гази що утворилися виводяться на поверхню по газовідвідній свердловині, а далі проводиться зміна функцій свердловин: дуття подається по газовідвідній, а гази – по дуттьовій свердловині) дозволяє перетворювати окислювальну зону у відновну і навпаки.

Реверсування газодуттьових потоків дозволяє збільшити швидкість газового потоку в каналі газифікації, що забезпечує сприятливі умови для відводу монооксиду вуглецю (CO) від реакційної поверхні, і за рахунок чого зростають відновні реакції й значно зменшується процес допалювання CO. Однак, при великих швидкостях газового потоку і нетермічності процесу ефективність підземної газифікації знижується за рахунок швидкого охолодження реакційної поверхні. Цей недолік легко нейтралізується попереднім підігрівом дуття на поверхні шляхом утилізації фізичного тепла газів, що виходять з підземного газогенератора. При досить високій сумарній швидкості потоку концентрація CO на стінках каналу газифікації знизиться настільки, що гальмівною дією монооксиду вуглецю в цих умовах можна знехтувати.

Термодинамічний аналіз реакцій, що протікають у відновній зоні, показує, що при високій температурі (1100 – 1300°С) під час реверсування газодуттьових потоків діоксид вуглецю (CO_2) і водяна пара (H_2O) практично можуть повністю перетворюватися в монооксид вуглецю (CO) і водень (H_2).

Висновки. Інтенсифікація реакцій відновлення при газифікації вугілля можлива при додатковому підведенні тепла у відновну зону підземного газогенератора шляхом реверсування газодуттьових потоків.

Швидкість газифікації зумовлюється інтенсивністю хімічних реакцій і безпосередньо залежить від інтенсивності підведення до вугільного масиву кисню і відведення продуктів газифікації.

Відновлення CO_2 і H_2O в умовах, близьких до рівноваги, дозволить інтенсифікувати процес газифікації та збільшити продуктивність газогенератора в 3 – 4 рази, а теплотворну здатність газу підвищити у 5 – 8 разів, забезпечивши тим самим отримання газу ПГВ як замінника природного газу.

Список літератури

1. Сай Е.С. Утилизация шахтного метана и его транспортирование в газогидратном состоянии / Е.С. Сай, К.А. Ганушевич // Розробка родовищ. – 2014. – 8(3). – С. 299-307.

2. Bondarenko V. An overview and prospectives of practical application of the biomass gasification technology in Ukraine / V. Bondarenko, V. Lozynskyi, K. Sai, K. Anikushyna // Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. – 2015. – P. 27-32.

3. Лозинський, В.Г. Аналіз сучасного стану і перспективи промислового застосування свердловинної підземної газифікації вугілля в Україні / В.Г. Лозинський, П.Б. Саїк, О.В. Паваленко, Кошка Д.О. // Школа подземной разработки: материалы IV междунар. науч.-практ. конф. – Д: НГУ, 2010. – С. 351-363.

4. Рубан А.Д. Подземная газификация угля – новый этап технологического и инвестиционного развития / А.Д. Рубан // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №2. – С. 288-300.

5. Лозинський В.Г. Інтенсифікація процесу свердловинної підземної газифікації вугілля малопотужних вугільних пластів / В.Г. Лозинський, П.Б. Саїк // Нау-

кова весна: матеріали III Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених. – Д.: НГУ, 2012. – С. 39-40.

6. Proshunin Y.E. Underground gasification of coal and lignite. Coke and Chemistry / Y.E. Proshunin, A.M. Poturilov. – 2016. – 59(10). – P. 370-379.

7. Wiatowski M. Analysis and characteristics of tars collected during a pilot-scale underground coal gasification (UCG) trial / M. Wiatowski, K. Kapusta, K. Stańczyk // Fuel. – 2017. – No. 208. – P. 595-601.

8. Nieć M. Evaluation of coal resources for underground gasification in Poland. Selection of possible UCG sites / M. Nieć, E. Sermet, J. Chećko, J. Górecki // Fuel. – 2017. – No. 208. – P. 193-202.

9. Falshtynskyi V. Substantiating parameters of stratification cavities formation in the roof rocks during underground coal gasification / V. Falshtynskyi, V. Lozynskyi, P. Saik, R. Dychkovskyi, M. Tabachenko // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – 10(1). – P. 16-24.

10. Khadse A. Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India / A. Khadse, M. Qayyumi, S. Mahajani, P. Aghalayam // Energy. – 2007. – 32(11). – P. 2061-2071.

11. Фальштинський В.С. Дослідження адаптаційних процесів системи «породо-вугільний масив – підземний газогенератор» на стендовій установці / В.С. Фальштинський, Р.О. Дичковський, В.Г. Лозинський, П.Б. Саїк // Науковий Вісник Національного Гірничого Університету. – 2011. – (37). – С. 65-69.

12. Економічні й екологічні аспекти комплексної генерації та утилізації енергії в умовах урбанізованих та промислових територій [Г.Г. Півняк, О.С. Бешта, П.І Пілов та ін.]. – Д.: НГУ, 2013. – 176 с.

13. Кузьменко А.М. Обоснование целесообразности тонкого измельчения вяжущего материала при закладочных работах /А.М. Кузьменко, М.В. Петлёваный // Розробка родовищ. – 2015. – 9(2). – С. 183-190.

14. Petlovanyi M. Influence of configuration chambers on the formation of stress in multi-modulus mass / M. Petlovanyi // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – 10(2). – P. 48-54.

15. Засульский А.Н. Интенсивность горения огневого забоя при применении технологии подземного сжигания угля / А.Н. Засульский, М.Д. Константиниди // Прогрессивные технологические схемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – С. 40-46.

16. Saik P.B. Revisiting the underground gasification of coal reserves from contiguous seams / P.B. Saik, R.O. Dychkovskyi, V.G. Lozynskyi, Z.R. Malanchuk, Ye.Z. Malanchuk // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2016. – (6). – P. 60-66.

17. Саїк П.Б. До питання збереження рівномірності посування вогневого вибою / П.Б. Саїк, В.С. Фальштинський, Р.О. Дичковський, В.Г. Лозинський // Розробка родовищ. – 2015. – 9(4). – С. 487-492.

References

1. Sai K.S., Ganushevych K.A. (2014), "Utilization of mine methane and their transportation in gas hydrates state", ["Utilizatsiya shakhtnogo metana i ego transportirovanie v gazogidratnom sostoyanii"], *Mining of Minerals Deposits*, Vol. 8, Is. 3, pp. 299-307 (in Russian).

2. Bondarenko V., Lozynskyi V., Sai K., Anikushyna K. (2015), "An overview and prospectives of practical application of the biomass gasification technology in Ukraine", *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, pp. 27-32 (in English).

3. Lozynskyi V.H., Saik P.B., Pavalenko O.V., Koshka D.O. (2010), "Analysis of the current state and prospects of industrial application of well underground gasification of coal in Ukraine", ["Analiz suchasnoho stanu i perspektyvy promyslovoho zastosuvannia sverdlovynnoi pidzemnoi hazyfikatsii vuhillia v Ukraini"], *Shkola podzemnoy razrabotki: materialy IV mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, D: NGU, pp. 351-363 (in Ukrainian).

4. Ruban A.D. (2007), "Underground gasification of coal - a new stage of technological and investment development", ["Podzemnaya gazifikatsiya uglya – novyy etap tekhnologicheskogo i investitsionnogo razvitiya"], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, No. 2, pp. 288-300 (in Russian).

5. Lozynskyi V.H., Saik P.B. (2012), "Intensification of the process of well underground coal gasification of low-power coal seams", ["Intensyfikatsiia protsesu sverdlovynnoi pidzemnoi hazyfikatsii vuhillia malopotuzhnykh vuhilnykh plastiv"], *Naukova vesna: materialy III Vseukr. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh*, D.: NHU, pp. 39-40 (in Ukrainian).

6. Proshunin Y.E., Poturilov A.M. (2016), "Underground gasification of coal and lignite", *Coke and Chemistry*, Vol. 59, Is. 10, pp. 370-379 (in English).

7. Wiatowski M., Kapusta K., Stańczyk K. (2017), "Analysis and characteristics of tars collected during a pilot-scale underground coal gasification (UCG) trial", *Fuel*, No. 208, pp. 595-601 (in English).

8. Nieć M., Sermet E., Chećko J., Górecki J. (2017), "Evaluation of coal resources for underground gasification in Poland. Selection of possible UCG sites", *Fuel*, No. 208, pp. 193-202 (in English).

9. Falshtynskyi V., Lozynskyi V., Saik P., Dychkovskyi R., Tabachenko M. (2016), "Substantiating parameters of stratification cavities formation in the roof rocks during underground coal gasification", *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 10, Is. 1, pp. 16-24 (in English).

10. Khadse A., Qayyumi M., Mahajani S., Aghalayam P. (2007), "Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India", *Energy*, Vol. 32, Is. 11, pp. 2061-2071 (in English).

11. Falshtynskyi V.S., Dychkovskyi R.O., Lozynskyi V.G., Saik P.B. (2011), "Research an adaptation process of the system "rock and coal massif – underground gasgenerator" on stand setting", ["Doslidzhennia adaptatsiinykh protsesiv systemy "porodo-vuhilnyi masyv – pidzemnyi hazohenerator" na stendovii ustanovtsi"], *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, No. 37, pp. 65-69 (in Ukrainian).

12. Pivniak H.H., Beshta O.S., Pilov P.I. (2013), "*Economic and environmental aspects of integrated generation and utilization of energy in urban and industrial areas*", ["Ekonomichni i ekolohichni aspekty kompleksnoi heneratsii ta utylizatsii enerhii v umovakh urbanizovanykh ta promyslovykh terytorii"], D.: NHU, 176 p (in Ukrainian).

13. Kuzmenko O.M., Petlovanyi M.V. (2015), "Substantiation the expediency of fine gridding of cementing material during backfill works", ["Obosnovanie tselesoobraznosti tonkogo izmel'cheniya vyazhushchego materiala pri zakladochnykh rabotakh"], *Mining of Minerals Deposits*, Vol. 9, Is. 2, pp. 183-190 (in Russian).

14. Petlovanyi M. (2016), "Influence of configuration chambers on the formation of stress in multi-modulus

mass", *Mining of Mineral Deposits*, Vol 10, Is. 2, pp. 48-54 (in English).

15. Zasul'skiy A.N., Konstantinidi M.D. (1990), "Intensity of burning of a fire-face face at application of technology of underground combustion of coal", ["Intensivnost' goreniya ognevogo zaboya pri primenenii tekhnologii podzemnogo szhiganiya uglya"], *Progressivnye tekhnologicheskie skhemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, pp. 40-46 (in Russian).

16. Saik P.B., Dychkovskyi R.O., Lozynskyi V.G., Malanchuk Z.R., Malanchuk Ye.Z. (2016), "Revisiting the underground gasification of coal reserves from contiguous seams", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 6, pp. 60-66 (in English).

17. Saik P., Falshtynskyi V., Dychkovskyi R., Lozynskyi V. (2015), "Revisiting the preservation of uniformity advance of combustible face", ["Do pytannia zberezhennia rivnomirnosti posuvannia vohnevoho vyboiu"], *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 9, Is. 4, pp. 487-492 (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 05.10.2017
Рецензент д-р. техн. наук, В.К. Костенко.

Саїк Павло Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри підземної розробки родовищ, ДВНЗ «Національний гірничий університет» (пр. Яворницького 19, Дніпро, 49005, Україна)
E-mail: saik.nmu@gmail.com
Лозинський Василь Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри підземної розробки родовищ, ДВНЗ «Національний гірничий університет» (пр. Яворницького 19, Дніпро, 49005, Україна)
E-mail: lvg.nmu@gmail.com
Фальштинський Володимир Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри підземної розробки родовищ, ДВНЗ «Національний гірничий університет» (пр. Яворницького 19, Дніпро, 49005, Україна)
E-mail: falshtynskyi.nmu@gmail.com
Демидов Максим Сергійович – старший науковий співробітник кафедри підземної розробки родовищ, ДВНЗ «Національний гірничий університет» (пр. Яворницького 19, Дніпро, 49005, Україна)
E-mail: aniloks@i.ua

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

Аннотация. В работе представлены исследования интенсификации процесса подземной газификации угля путем определения концентрации горючих генераторных газов (CO, H_2, CH_4) в зависимости от температуры восстановительной зоны реакционного канала и скорости газового потока по его длине.

Установлено, что объем угля, который газифицируется, меняется прямопропорционально количеству сгоревшего углерода и скорости дутья. Повышение интенсивности газификации происходит при условии равенства концентраций кислорода и углерода в реакционном канале подземного газогенератора. Скорость газификации обусловлена интенсивностью химических реакций и непосредственно зависит от интенсивности подведения к угольному массиву кислорода и отведения продуктов газификации.

Ключевые слова: подземная газификация, газогенератор, генераторный газ, интенсификация.

Саик Павел Богданович – кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки месторождений, ГВУЗ «Национальный горный университет» (пр. Яворницкого 19, Днепр, 49005, Украина)
E-mail: saik.nmu@gmail.com
Лозинский Василий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки месторождений, ГВУЗ «Национальный горный университет» (пр. Яворницкого 19, Днепр, 49005, Украина)
E-mail: lvg.nmu@gmail.com
Фальштынский Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подземной разработки месторождений, ГВУЗ «Национальный горный университет» (пр. Яворницкого 19, Днепр, 49005, Украина)
E-mail: falshtynskyi.nmu@gmail.com
Демидов Максим Сергеевич – старший научный сотрудник кафедры подземной разработки месторождений, ГВУЗ «Национальный горный университет» (пр. Яворницкого 19, Днепр, 49005, Украина)
E-mail: aniloks@i.ua

REVISITING THE RESEARCH OF COAL GASIFICATION PROCES

Abstract. The paper presents the last studies of the underground coal gasification process intensification by determining the concentration of combustible producer gases (CO, H_2, CH_4), depending on the temperature of reducing zone in the reaction channel and the gas flow velocity along its length.

It was established that the volume of coal that is gasified in-situ varies directly in proportion to the amount of burnt coal and blast velocity. The intensification of the synergy of gasification is enhanced provided that the concentrations of oxygen and carbon are equal in the reaction channel of the underground gasifier. The rate of gasification is due to the intensity of chemical reactions and directly depends on the intensity of the supply to the coal mass of oxygen and gasification products extraction. Established values make it possible to determine the output of underground gasifier on stable operation regime.

Obtained results of experimental studies with sufficient precision for application can be used to determine working parameters of underground gasifier and provide to expand the field of application of an underground coal gasification technology

Keywords: underground coal gasification, gasifier, producer gas, intensification.

Pavlo Saik – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, SHEI "National Mining University" (19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine)

E-mail: saik.nmu@gmail.com

Vasyl Lozynskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, SHEI "National Mining University" (19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine)

E-mail: lvg.nmu@gmail.com

Volodymyr Falshtynskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Underground Mining Department, SHEI "National Mining University" (19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine)

E-mail: falshtynskyi.nmu@gmail.com

Maksym Demydov – Scientific Researcher of the Underground Mining Department, SHEI "National Mining University" (19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine)

E-mail: aniloks@i.ua