

11. Круть А.А. Водоугольное топливо – альтернатива природному газу и жидким нефтепродуктам / А.А. Круть // Уголь Украины. – 2008. - № 10. – С. 10 – 13.
12. Кондырев Б.И. Перспективы применения технологии подземной газификации угля на месторождениях Дальнего Востока с получением газа - сырья для синтеза жидкого топлива / Б.И. Кондырев, А.В. Белов, И.В. Гребенюк // Уголь. – 2008. - № 10. – С. 36 – 37.
13. Попович И.Н. Состояние и перспективы развития угольной промышленности Украины / Уголь Украины, октябрь, 2013. – Киев. – С. 3-7.
14. Попович И.Н. Устойчивость развития угольной отрасли – приоритет государства / Науковий вісник НГУ, 2014. – Дніпропетровськ, ДВНЗ «НГУ». – № 2. – С. 30-35.

## ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ МЕТАНУ ТА ВАРІАЦІЯ СКЛАДОМ СИНТЕЗ-ГАЗУ ПРИ ПІДЗЕМНІЙ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

*Р.О. Дичковський, В.С. Фальшитинський, М.М. Табаченко, В.Г. Лозинський, П.Б. Саїк,  
Національний гірничий університет, Україна*

Розглянуті питання доцільності застосування свердловинної підземної газифікації вугілля для відпрацювання покинутих та забалансових запасів вугілля. Проведено дослідження використання теплового поля газогенератора та формування надлишкового тиску для максимального отримання газу метану, як кінцевого продукту газифікації. Запропоновано способи варіації складом, тиском та режимами подачі дуттьової суміші з метою зміни складу синтез-газу. Обґрунтовано технологічну схему газогенератора із додатковою свердловиною для подачі активаторів та каталізаторів процесу газифікації.

**Вступ.** Збитковість роботи багатьох вугільних підприємств, зниження безпеки виконання технологічних процесів гірничого виробництва, що призводить до травматизму та летальних випадків, вимагає перегляду ефективності існуючих механічних технологій відбивання вугілля від масиву й існування у наявному вигляді самих шахт. Сьогодні ведеться переорієнтація підприємств на системи: «шахта-лава», «газовугільна шахта» чи ін.; розробляються технології використання теплової енергії порід, перепадів температури вхідного і вихідного струменів повітря тощо. На жаль, дані перетворення лише вносять доповнення до існуючих способів отримання енергетичних джерел, руйнування, транспортування та переробки сировини.

До якісної зміни технологій видобування вугілля спонукають багато інших факторів. Основними серед них є: збільшення середньої глибини ведення гірничих робіт, зниження потужності пластів, наявність тектонічних та природних зон підвищеного гірського тиску, геодинамічних і динамічних проявів у масиві тощо. Однією із радикально нових технологій розробки та переробки вугілля є свердловинна підземна газифікація (СПГВ). Дана технологія полягає у бурінні похило-горизонтальних свердловин по вугільному пласту із з'єднанням їх між собою. Далі провадиться розпалювання вугілля та створюється керований вогневий вибій із збалансованим дотриманням окислювальної та відновної зон. Це дає можливість отримувати суміш горючих газів із подальшим їх використанням як джерела електричної енергії та хімічних продуктів.

У гірництві такий спосіб розробки вугільних родовищ за інноваційністю, безпекою праці, отриманням енергетичного продукту відноситься до категорії «високі технології (high technologies)».

Новітні схеми СПГВ дають можливість провадити розробку запасів на новому техніко-економічному рівні з виключенням забруднення навколишнього середовища при видобутку, комплексної переробки вугільних пластів на місці їх залягання з отриманням високотехнологічних продуктів у вигляді електричної, теплової енергії та хімічної сировини.

У Національному гірничому університеті на кафедрі підземної розробки родовищ розроблено технологічні концепції енергохімічного підприємства з видобутку і переробки пластів твердого палива з урахуванням геологічних та техногенних чинників у безпечному екологічно чистому циклі при утилізації й переробці димових газів, шламу і золоносу ТЕС, ТЕЦ та котельних [1, 2 та ін.].

Замкнутий цикл підземної газифікації вугілля дає можливість вирішити актуальну екологічну проблему утилізації, переробки димових газів та відходів енергетичних підприємств. Газ ПГВ не вимагає додаткової підготовки і використовується як енергоресурс для отримання теплової, електричної енергії на самій станції «Підземгаз» за допомогою поршневих агрегатів, паротурбінних або газотурбінних установок.

Промислова реалізація цієї технології доводить її рентабельність, тому сьогодні актуальним постає питання удосконалення технічних і технологічних рішень, а також визначення складу дуттьової суміші та вихідних продуктів.

Важливими складовими досліджень протікання підземної газифікації вугілля є визначення збалансованості фізико-хімічних процесів, пов'язаних зі зміною хімічного складу й якісних властивостей вугілля, а також конструктивних особливостей підземного газогенератора. Від взаємодії (збалансованості) системи «підземний газогенератор», швидкостей хімічних реакцій і фізичних процесів при вигазовуванні вугільного пласта залежатиме керованість, безпека і технологічність виробництва штучного газу [3].

На підставі параметрів матеріального і теплового балансу можна визначити чисельні значення коефіцієнтів корисної дії як окремих складових процесу газифікації, так і всієї установки у цілому. Ці параметри також слугують підставою для вибору технічного і технологічного забезпечення процесу газифікації, поверхневого комплексу очищення і переробки продуктів СПГВ, попередньої оцінки ефективності й економічності генератора.

**Якісні показники дуттьової суміші та генераторного газу.** Згідно критеріїв придатності, основними показниками, що визначають можливість застосування і дієвість роботи підземних геореакторів, є ступінь метаморфізму вугілля, потужність і кут падіння пласта, його якісні показники, метаноємність масиву і характеристики бічних порід.

Серед основних якісних показників вугільного пласта, що планується до розробки за допомогою підземної газифікації вугілля, у першу чергу, до аналізу приймаються: теплотворна здатність, ступінь карбонізації (відсоткова частка вуглецю (С), вміст вологи, зольність, вихід летких речовин, наявність сірки (S), фосфору (P), водню (H), азоту (N) та інших хімічних елементів. Виходячи із літологічної різниці, ентропії й ізотропії гірського масиву, розробляються заходи із керування процесами міграції газів. Відповідно слід враховувати гідроскопічність та газопроникність порід, наявність щільних глиняних прошарків у покрівлі пласта, п'яквативних і диз'юнктивних геологічних порушень в зоні газифікації; обвалюваність основної і стійкість безпосередньої покрівлі під дією високих температур, а також несучу здатність підшоши.

Оскільки у дисертаційній роботі при застосуванні технології підземної газифікації перевага надається кам'яновугільним пластам марки Д і Г, то необхідно більш детально розглянути саме ці лігніти. Особливу увагу слід приділити генезису утворення цих формацій. За цим параметром вугілля поділяється на підгрупи, виходячи із вмісту вітрени, що є носієм основних властивостей пласта і визначає однорідність, монолітність структури, та фізгену, що вказує на його недоморфізм і, як правило, містить багато мінеральних включень (табл. 1.) [4, 5].

**За показником відпору вітриніту ці вугільні пласти мають значення  $R = 0,5 - 2,2 \%$ . Теплота згоряння знаходиться в межах  $16 - 24$  Мдж/кг, вихід летких речовин –  $9 - 22 \%$ .**

Таблиця 1. Класифікація вугільних пластів, виходячи із генезису його утворення

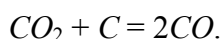
Класифікація вугілля		Марка вугілля		Генетична група	
Назва	Позначення	Назва	Позначення	Назва	Позначення
Довгополумене	Д	Довгополумене	Д	Довгополумене, вітринітове	ДВ
				Довгополумене, фюзенітове	ДФ
		Довгополумене газове	ДГ	Довгофакельне, газове вітринітове	ДГВ
				Довгополумене, газове фюзенітове	ДГФ
Газове	Г	Газове	Г	Газове вітринітове	ГВ
				Газове фюзенітове	ГФ
		Газове спікне	ГС	–	–

Склад горючих газів підземної газифікації вугілля залежить від якісного складу самого вугілля. Відповідно він змінюється у процесі газифікації. При детальному розгляді отриманих газів, як компоненти енергетичної сировини, слід відзначити, що загальна їх характеристика суттєво відрізняється від природного газу. Тому при підборі режимів газифікації, виборі типу дуттьової суміші слід орієнтуватися на кінцевий продукт і на конкретних споживачів отриманої сировини. Основним недоліком підземної газифікації вугілля є висока собівартість виконання підготовчих робіт та проблеми із керуванням процесом газифікації. Тому необхідним є комплексне використання енергетичної та хімічної сировини [2, 3].

Для проведення такого визначення взято до розгляду основні загальновідомі реакції отримання суміші горючих газів [3]. Отриманий у результаті роботи генератора газ розрізняють на два види: енергетичний і технічний. Основними горючими газами у процесі газифікації вугілля виступають чадний газ ( $CO$ ), водень ( $H_2$ ) і метан ( $CH_4$ ).

*Отримання газу водню ( $H_2$ ) при підземній газифікації.* Фактично у цьому випадку не ведеться процес газифікації, а іде його спалювання (технологія підземного спалювання вугілля) і використання отриманого тепла для розкладу води на складові хімічні елементи – водень і кисень. Газ водень, як окремий хімічний елемент, є досить нестійким. Загальновідомо, що він вступає у реакцію із металами та іншими хімічними сполуками, тому виникають проблеми із його зберіганням та транспортуванням. Крім цього, газ легко піддається детонації, тому він є вкрай вибухонебезпечним. Температура запалювання складає від 400 – 600 °С. Світові енергетичні компанії розглядають його як одне з енергетичних джерел уже найближчим часом. Недарма передові виробники автомобілів, такі як Дженерал Моторс, Форд, Мерседес та ін., зосереджують свою увагу на отримання двигунів, що використовуватимуть як паливо рідкий водень. Вважається, що наступного року з'являться перші автомобілі на наших дорогах, які використовуватимуть саму цю енергетичну сировину.

*Орієнтація підземної газифікації вугілля на отримання чадного газу ( $CO$ ).* Чадний газ утворюється при неповному згорянні вугілля, органіки або сполук, що містять вуглець, при нестачі кисню. Такий же процес відбувається під час підземної газифікації вугілля, при взаємодії діоксиду вуглецю ( $CO_2$ ) з розжареним вугіллям у відновній зоні реакційного каналу газогенератора. Ця реакція має вигляд:



Відомо, що протікання реакції можливо в обох напрямках. При температурі нижче 400°C рівновага майже повністю зміщується вліво, а при 1000°C – вправо [2]. Важливими є його теплотворні властивості як енергетичної сировини. Він спалахує при 700°C і горить характерним голубуватим полум'ям з утворенням вуглекислого газу:



При цьому виділяється значна кількість тепла (135 ккал або 565 кДж). Його добре застосовувати у суміші з іншими газами у техніці як газоподібне паливо (доменні газы, генераторний газ, водяний газ тощо).

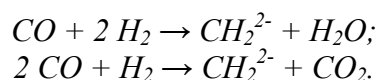
Крім цього, при високій температурі монооксид вуглецю проявляє відновні властивості, завдяки чому він широко використовується в металургії для отримання чистих металів з їх оксидів. Такі реакції характерні при отриманні заліза, свинцю, нікелю, молібдену тощо. При підвищеній температурі та тиску чадний газ вступає з багатьма металами у реакцію з утворенням карбонілів металів (наприклад, Ni(CO)<sub>4</sub>, Cr(CO)<sub>6</sub>, Fe(CO)<sub>5</sub> і т.д.).

Даний газ не розчиняється у воді і майже не вступає з нею в хімічну взаємодію. Він також належить до несолетворних оксидів. Слід зазначити, що цей газ є отруйним, причому його отруйні здатності проявляються при незначних концентраціях. Він є небезпечним при концентрації 0,01 %, а при підвищенні вмісту до 0,3 % може призвести до летального наслідку протягом декількох хвилин.

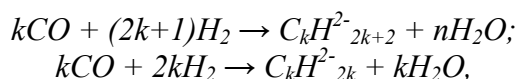
*Орієнтація підземної газифікації на отримання газу метану (CH<sub>4</sub>).* Метан – перший вуглеводень гомологічного ряду. Цей газ є найбільш стійким до хімічної дії. Як і інші алканами він вступає у реакції заміщення (галогенування, сульфохлорування, сульфоокислення, нітрування та ін.), але володіє меншою реакційною здатністю.

Реакція метану із парами води, що протікає при каталізаторі Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> за температури 800 – 900°C чи без нього – 1400 – 1600°C, утворює синтез-газ. Цей газ є співвідношенням чадного газу і водню CO : H<sub>2</sub> у співвідношенні 1:1 до 1:3. Основними областями застосування є синтез метанолу, вуглеводнів, інших продуктів, а також при синтезі за принципом Фішера – Тропша. Даний процес є основним при отриманні рідких вуглеводнів (гідрогенізація вугілля). Дана реакція протікає у присутності каталізатора (як правило, кобальт і залізо), в якій монооксид вуглецю і водень перетворюються у синтетичне паливо або мастильні речовини.

Даний процес – це перетворення синтез газу, і описується він наступними хімічними реакціями:



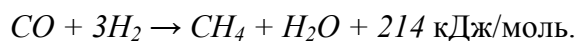
У загальному вигляді ці реакції матимуть вигляд:



де  $k$  – кількість молей, задіяних у відновній олігомеризації чадного газу.

Дані реакції є відносно екологічно чистими, оскільки в їх результаті утворюється нестабільний радикал та водяна пара чи вуглекислий газ. Діоксид вуглецю на відміну від монооксиду є відносно нейтральним та неотруйним газом.

Протікання цих реакцій є нестабільним. Отримані радикали CH<sub>2</sub><sup>2-</sup> вимагають перетворення. Подальше насичення воднем веде до створення замітника газу метану CH<sub>4</sub>. Така реакція протікає зі значним тепловим ефектом і отримала назву гідрування оксиду вуглецю до газу метану:



Можливість протікання таких реакцій підтверджено на поверхневих газогенераторах, коли у подальшому перетворенні як кінцевий продукт виступають метаноли чи інше рідке паливо, а газ метан виступає побічним продуктом [2, 6]. Склад продуктів синтезу вуглеводнів за масовою долею  $\mu(n)$  з вуглистом номером  $n$  з  $CO$  та  $H_2$  за молекулярною масою описується виразом:

$$\mu(n) = n(1 - \alpha)^2 \alpha^{n-1},$$

коефіцієнт збалансованості протікання хімічних реакцій із фізичними швидкостями  $\alpha$  визначатиметься:

$$\alpha = k_1 / (k_1 + k_2),$$

де  $k_1$ ,  $k_2$  – емпіричні константи, що відповідно залежать від швидкості протікання реакції та фізичного обриву ланцюга хімічної реакції.

Дані перетворення отримали назву реакції Андерсона-Шульца-Флорі (розподіл ASF). Величина коефіцієнта  $\alpha$  знижується зі зростанням температури та збільшується при підвищенні тиску. Відповідно стабілізація цього коефіцієнта провадиться взаємною варіацією температури та тиску. Тестові дослідження переконливо доводять, що перший вуглеводень ряду метан ( $n = 1$ ) завжди присутній у більшій кількості, ніж це передбачено за ASF реакцією. Це пояснюється тим, що цей газ утворюється незалежно під час протікання реакції прямого гідрування [6, 7].

Серед згаданих каталізаторів (рутений ( $Ru$ ), кобальт ( $Co$ ), залізо ( $Fe$ ) та нікель ( $Ni$ )) найбільш доступним і дешевим на теренах України є залізо. Саме на його використання орієнтують свої дослідження автори роботи. Причому планується застосування двостадійної каталізації: у відновній зоні геореактора (пилова суміш заліза) та на виході із газовипускної свердловини (залізний каталізатор барабанного типу).

Досить відомими є тестові дослідження та промислова апробація супутнього отримання газу метану при гідрогенізації вугілля за допомогою різних каталізаторів, включно із  $Fe$ -каталізаторами. Ці роботи виконувалися в рамках температурних режимів 190 – 350 °C, у значних межах зміни тиску (від 1 до 30 Атм) [5, 6]. Автори даної роботи провадить дослідження у температурному полі двох рівнів: 1500 – 1700 °C (запуск системи) та 900 – 1200 °C (робочий режим). Доведення системи до робочого режиму й утримання його у температурних межах 900 – 1200 °C здійснюється шляхом пульсуючої подачі в зону газифікації води у низькодисперсному скрапленому стані.

**Встановлення матеріально-теплого балансу процесу газифікації.** Основою забезпечення процесу підземної газифікації хімічних реакцій отримання генераторного газу і фізичних швидкостей протікання реакцій окрім матеріально – теплового балансу є підтримка відповідного тиску у геореакторі (мінімальні показники знаходяться на рівні 3 – 6 Атм). Саме цей параметр призводить до відсутності полум'я під землею і до покращення якості отриманих енергетичних газів. Робота промислових станцій підземної газифікації ґрунтується на цьому принципі. Однак така умова призводить до «задування» газів у масив, їх реагування із хімічними елементами та сполуками, що містяться у ньому. Особливо негативні наслідки має реагування складових газифікації чи їх розчинення у воді та її забруднення, у першу чергу бензолними сполуками. Міграція підземних вод по водоносних горизонтах призводить до перетікання зараженої чи забрудненої води на великі відстані. В умовах неглибоких запасів чи легкопроникних порід можливе розповсюдження газів на значні площі і проривання на поверхню. Як відомо, чадний газ ( $CO$ ) є отруйним навіть при незначних концентраціях і тому є недопустимим попадання його у місця життєдіяльності живих організмів. Також дуже складно забезпечити герметичність газогенератора при вигазовуванні залишкових запасів та ціликів вугілля безпосередньо з мережі існуючих гірничих виробок. Саме з цієї причини початкові дослідження параметрів підземної газифікації планується провадити при тиску у геореакторі на рівні 1,1 – 1,5 Атм, з подальшим його підвищенням для максимального отримання газу метану за умови застосування заліза як каталізатора. Причому нижня межа на виході реакційного каналу

може бути знижена і бути меншою за 1 Атм. При застосуванні димовідсосів у газогенераторі виникає розрідження. Відсмоктування газів провадиться для цього, щоб не допустити виникання вищезазначених негативних наслідків підземної газифікації. Такий процес знаходиться на межі підземного спалювання та підземної газифікації. Оскільки у роботі не передбачується використання теплоти, як кінцевого продукту, а виконуються дослідження із удосконалення складу газів, як енергетичної сировини, то автори роботи оперуватимуть саме другим поняттям. Для забезпечення технологічності процесу слід забезпечити комплексність і системність нагнітання дуттьової суміші і відводу генераторних газів.

Автори ставлять за мету дослідити склад, температурний режим дуттьової суміші і способи її подачі у геореактор із орієнтацією на отримання заміни природного газу, а також визначення умов зміни співвідношення складових синтез газу для подальшого отримання різної хімічної сировини. У першу чергу це стосується створення рідких палив, таких як метанол та бензин. Відповідно, у роботі здійснюється пошук режимів роботи геореактора із максимальним отриманням метану, а також варіації співвідношення чадного газу і водню при застосуванні технологій підземної газифікації без підвищеного тиску, а лише варіацією температурою і складом дуттьової суміші. Наступною умовою досліджень є забезпечення максимальної технологічності протікання хімічних реакцій і фізичних швидкостей посування вхідної та вихідної сумішей.

Дані роботи планується виконати на спеціальній стендовій установці з імітацією гірничо-геологічних умов реальної шахти з наступною перевіркою отриманих результатів безпосередньо на підземному газогенераторі.

Режим роботи – поточний, з реверсною подачею дуттьової суміші з окремою нефіксованою віткою подачі каталізаторів та реагентів у відновну зону газогенератора. Спосіб подачі суміші – імпульсно-пульсуючий. Імпульсно-пульсуюча подача суміші в область газифікації забезпечується спеціальною системою керування на основі комп'ютерних програмних пакетів. Технологія газифікації у натурних умовах – вертикально-похило-горизонтальними свердловинами, для проведення досліджень на стендовій установці – «свердловина – геореактор».

Для аналізу кількісних та якісних показників технології газифікації із визначенням складу дуттьової суміші та вихідних газів застосуємо наступний математичний алгоритм, та покладену на комп'ютерну програму авторським колективом, до якого входять автори даних досліджень.

Розрахунок матеріально-теплового балансу СПГВ являє собою вельми важку задачу. Це обумовлено тим, що результати процесу залежать від значної кількості величин-змінних, до яких відносяться характеристики вугільного пласта, склад газової суміші, що використовується у процесі СПГВ, організаційні та гірничо-геологічні умови. Газова суміш, що давала задовільні результати на одному пласті, може не відповідати умовам при розробці іншого пласта з іншими характеристиками. Така ситуація спостерігається також для умов одного вугільного пласта, але при зміні гірничо-геологічної ситуації (приплив води, зміна потужності і т. д.). У такому разі треба виконувати повторний розрахунок матеріально-теплового балансу СПГВ, у деяких випадках по декілька разів поспіль задля забезпечення задовільних результатів. Для полегшення процесу визначення матеріально-теплового балансу СПГВ було розроблено програмне забезпечення. Його апробація для розглядуваних гірничо-геологічних умов довела дієвість його застосування [2, 3].

**Результати тестових та шахтних експериментальних досліджень.** Перевірка результатів моделювання проводилася на двох стендових установках, що були виконані для умов шахт Західного Донбасу, Соленівського родовища (Україна)а Нижньо-Сілезького промислового регіону (Польща), та на експериментальній шахті «Барбара» (Міколув, Польща) [3].

Для умов Західного Донбасу та Соленівського родовища (Україна) використовувалася авторська стендова установка, що була виконана на замовлення Національного гірничого університету НПП «Нафтомаш». Частково ці роботи виконувалися у рамках реалізації спільних міжнародних науково-дослідних проектів. Значна частина отриманих результатів увійшла до звітної документації проектів на замовлення Головного інституту гірництва,

компанії ДТЕК та ПрАТ «Донецьксталь» — «Металургійний завод». Усереднені значення параметрів процесу газифікації вугільного пласта на експериментальній стендовій установці для конкретних гірничо-геологічних умов однієї з ділянок газифікації, наведено у табл. 2. Зміна складу генераторних газів під час проведення експерименту, відповідно - у табл. 3

Як видно із наведених табл. 3 та 4, орієнтація підземної газифікації вугілля на отримання газу метану як енергетичної сировини є досить складним процесом і його ефективність не завжди підтверджується економічною доцільністю. Тому окремо були проведені дослідження активації процесу за допомогою каталізатора *Fe*. Основні принципи зміни концентрації метану у такому випадку наведено у роботі [3], результати тестових досліджень наведено на рис. 1. Більш важливим є визначення складових елементів синтезу газу із подальшим отриманням хімічної сировини і рідких паливних та мастильних джерел, а також іншої продукції.

Таблиця 2. Параметри процесу газифікації вугільного пласта на експериментальній стендовій установці

Час	Тиск дуття, МПа	Вихід генераторного газу, м <sup>3</sup> /год	Посування точки дуття, см	Максимальна температура, °С/№ термопари
Розпал пласта і пропалення реакційного каналу				
12:00	0,20	107,2	0	33 / 1
12:30	0,24	105,5	0	812 / 1
13:00	0,28	109,3	0	556 / 1
13:30	0,32	108,2	0	582 / 1
14:00	0,14	112,1	0	602 / 1
14:30	0,20	110,7	0,02	618 / 1
15:00	0,31	116,4	0,02	621 / 1
15:30	0,31	115,5		624 / 1
Газифікація на повітряному дутті				
16:00	0,25	117,2	0,02	628 / 1
16:30	0,25	119,8	0,02	704 / 2
17:00	0,25	119,4	0,02	718 / 2
Газифікація на дутті, збагаченому O <sub>2</sub> – 25 %, пост-реверсний режим				
17:30	0,25	128,6	0,03	732 / 2
18:00	0,25	128,4	0,03	758 / 2
18:30	0,25	129,3	0,03	801 / 2
Газифікація на дутті, збагаченому O <sub>2</sub> – 30 % і пара – 20 %				
19:00	0,25	132,7	0,04	884 / 2
19:30	0,25	136,8	0,04	> 1000 / 2
20:00	0,25	130,5	0,04	> 1000 / 2
Газифікація на дутті, збагаченому O <sub>2</sub> – 27 % і пара – 15 %				
20:30	0,25	125,3	0,03	998 / 2
21:00	0,25	127,2	0,03	973 / 2
21:30	0,25	136,8	0,03	977 / 2
Газифікація на дутті, збагаченому O <sub>2</sub> – 25 %, і пара – 12 % (імпульсний режим)				
22:00	0,18	128,4	0,02	968 / 2
22:30	0,18	124,2	0,02	943 / 2
23:00	0,13	119,3	0,02	945 / 2
Газифікація на пароповітряному дутті O <sub>2</sub> – 21 %, і пара – 10 % (імпульсний режим)				
23:30	0,13	120,0	0,01	926 / 2
0:00	0,13	117,1	0,01	844 / 2
0:30	0,13	115,2	0,01	755 / 2

Таблиця 3. Склад генераторних газів під час проведення експерименту за часом виконання вимірів

Тип дуття	Час, год	Компоненти генераторного газу							Нижня межа теплоти сгоряння газу, МДж
		CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> +CO+H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
Розпал	12:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97	78,08	20,95	0,00
	12:30	0,12	0,08	0,00	0,02	1,85	77,80	20,15	0,00
	13:00	0,64	0,82	0,45	1,91	1,84	76,30	19,95	0,38
	13:30	0,75	1,25	0,86	2,86	4,14	77,20	15,80	0,52
	14:00	0,98	1,60	1,15	3,73	6,67	77,30	12,30	0,68
	14:30	1,37	2,87	1,84	6,08	9,08	76,90	7,94	1,06
	15:00	1,40	3,23	2,12	6,75	10,51	77,12	5,62	1,14
	15:30	1,46	3,56	2,20	7,22	11,48	77,03	4,27	1,22
Повітряне дуття	16:00	1,58	3,83	2,33	7,75	11,40	76,98	3,87	1,31
	16:30	2,36	5,65	4,72	12,73	8,53	76,50	2,24	2,08
	17:00	3,45	6,18	5,23	14,86	6,62	76,50	2,02	2,59
Дуття, збагачене O <sub>2</sub> – 25 %, пост-реверсний режим	17:30	4,83	8,88	6,17	19,88	3,25	74,43	2,44	3,54
	18:00	5,02	8,46	7,96	21,44	1,02	74,25	3,29	3,74
	18:30	5,05	8,14	8,58	21,77	0,91	74,19	3,13	3,78
Дуття, збагачене O <sub>2</sub> – 30 % і пара 20 %	19:00	5,13	7,38	10,58	23,08	0,54	73,16	3,22	3,93
	19:30	6,50	6,43	10,12	23,05	0,90	72,94	3,11	4,25
	20:00	6,87	5,75	9,85	22,47	1,27	73,40	2,86	4,27
Дуття, збагачене O <sub>2</sub> – 27 % і пара 15 %	20:30	7,17	4,92	9,46	21,54	1,01	74,12	3,33	4,23
	21:00	6,40	5,35	7,35	19,10	2,32	74,21	4,37	3,78
	21:30	5,25	6,89	6,80	18,94	2,45	74,33	4,28	3,50
Дуття, збагачене (імпульсний режим) O <sub>2</sub> – 25 % і пара 12 %	22:00	4,08	7,29	5,33	16,71	3,07	75,87	4,35	2,97
	22:30	3,25	6,56	5,12	14,93	5,68	75,19	4,20	2,56
	23:00	2,78	6,10	5,02	13,90	6,70	75,25	4,15	2,32
Пароповітряне дуття (імпульсний режим) O <sub>2</sub> – 21 %, пара 10 %	23:30	1,21	4,25	4,21	9,67	9,51	76,23	4,59	1,43
	0:00	1,18	4,14	3,82	9,14	9,73	76,79	4,34	1,36
	0:30	0,86	3,12	2,75	6,73	11,71	77,15	4,41	1,00

Відомо, що синтезований газ визначається співвідношенням водню і чадного газу у вихідній суміші підземного газогенератора.

Отримання заміни природного газу у вигляді максимальної кількості газу метану дає можливість застосування пароводневого дуття. Проте максимальна концентрація цього газу у вихідній суміші з газогенератора була досягнута на рівні 15 – 20 %. Звичайно, це дуже суттєвий успіх, однак наявність інших горючих газів, причому з суттєвою відмінністю швидкості протікання реакції, вимагає до їх виділення й окремого використання.

Подальше збільшення частки метану у вихідній суміші провадиться шляхом застосування каталізаторів у вигляді металів VIII групи періодичної системи Д.О. Менделєєва. У першу чергу це стосується заліза і нікелю. Авторським колективом [3] було теоретично обґрунтовано цей процес і запропоновано нову технологічну схему технологічного застосування СПГВ (рис. 2).



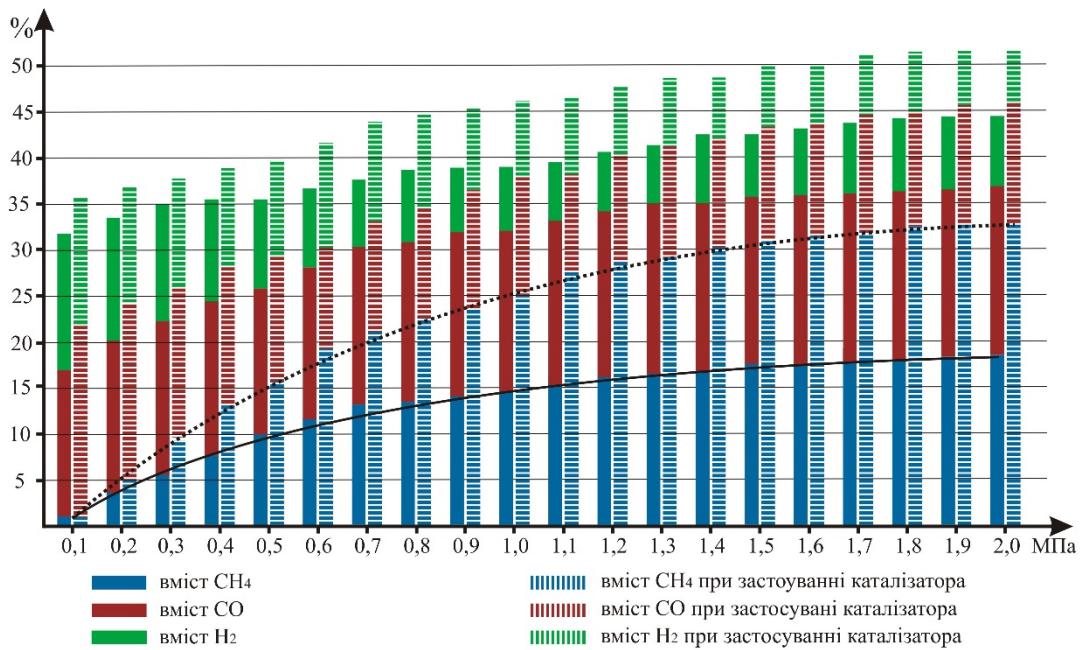


Рис. 1. Графік зміни вмісту горючих газів у вигідному струмені геореактора: а – без каталізатора; б – із застосуванням заліза як каталізатора

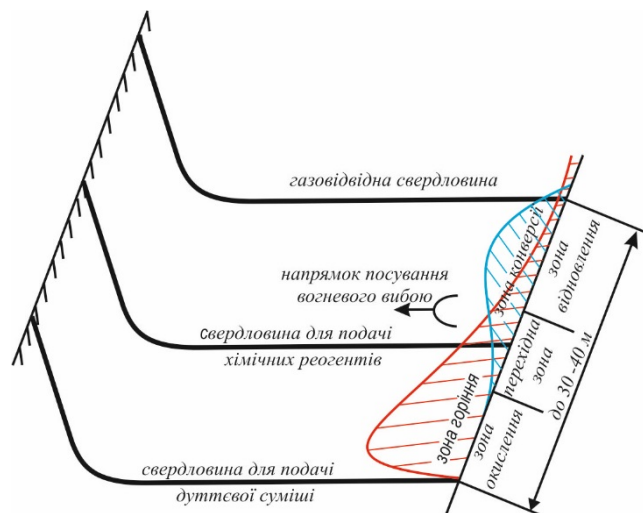


Рис. 2. Технологічна схема СПГВ із додатковою свердловиною для подачі хімічних каталізаторів

Подача у перехідну зону каталізаторів у вигляді подрібненого порошку заліза призводить до зміни протікання реакції зі збільшенням виділення газу метану. Дані залежності можна записати у вигляді наступних формул:

$$\eta_{CH_4} = 13,55 \ln(P) + 4,343 \text{ при достовірності } R^2 = 0,956 \text{ – без застосування каталізаторів;}$$

$\eta_{CH_4} = 21,46 \ln(P) + 1,931 \text{ при достовірності } R^2 = 0,975 \text{ – із застосуванням заліза як каталізатора.}$

Це дає можливість зробити наступний висновок. Концентрація газу метану ( $\eta_{CH_4}$ ) у вихідній суміші геореактора при застосуванні технології підземної газифікації вугілля для відпрацювання тонких та надтонких пластів із робочим температурним режимом роботи  $T = 900 - 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , застосуванням заліза як каталізатора та пульсуючого пароповітряного дуття визначається логарифмічною залежністю від робочого тиску суміші ( $P$ ) у відновній зоні реактора.

Дана залежність дає можливість орієнтувати роботу газогенератора на отримання заміни газу метану, що дозволяє використовувати його аналогічно газу метану.

Зона конверсії дає можливість провести орієнтацію генераторного газу на отримання газу

метану з мінімальною варіацією складом, режимами і способами подачі дуттьової суміші у вогневий вибій.

Застосування додаткової свердловини для окремих хімічних каталізаторів і реагентів дає можливість збільшити довжину реакційного каналу до 40 м, проте наявність додаткової свердловини призводить до збільшення на третину вартості розкривних та підготовчих робіт.

На жаль, даний процес досить складно відтворити на лабораторних чи стендових установках, оскільки такі дослідження необхідно провадити саме з орієнтацією на застосування окремих свердловин, що достатньо збільшує вартість проведення експерименту. Тому автори вважають, що доцільним є подальший розклад газу метану на складові синтез газу і подальшого його перетворення на рідкі палива, мастила чи хімічну речовину.

**Висновок.** Свердловинна підземна газифікація є однією із перспективних якісно нових радикальних технологій видобування вугілля. У даній роботі доцільність її застосування підтверджена для відпрацювання забалансових та залишених локальних запасів у тонких та вельми тонких пластах з орієнтацією отримання газу метану та синтез газу. Межі застосування технології визначаються виходячи із керування фізико-хімічними реакціями, усестороннього обґрунтування технологічних параметрів, режимів подачі дуттьової суміші та встановлення матеріально-теплого балансу.

Для зниження швидкості протікання реакцій процесу газифікації пропонується застосувати вуглекислий газ ( $CO_2$ ), а для аварійної зупинки газогенератора варто застосовувати газ азот, причому у початковий момент його вміст у дуттьовій суміші може досягати до 100%. Зміна співвідношення газу водню до чадного газу, що є складовими синтезованого газу, забезпечується шляхом пульсуючої подачі дуттьової суміші з підвищенням температури до  $1700^\circ C$  у геореакторі та зниженням її до температури  $900^\circ C$  й утриманням її на цьому продуктивному рівні за рахунок подачі у геореактор пароводяної суміші змінної температури.

Це дає можливість провадити процес підземної газифікації вугілля із орієнтацією на необхідний склад синтез газу для подальшого його використання, у першу чергу, як сировини хімічного виробництва.

Складність керування протіканням процесу підземної газифікації при орієнтації на окремий енергетичний газ вирішується застосуванням додаткових дуттьових свердловин з подачею необхідних каталізаторів і реагентів. Цей процес отримав назву подача дуття з нефіксованої точки.

#### Перелік літератури

1. Фальштинський В.С. Удосконалення технології свердловинної підземної газифікації вугілля: монографія / В.С. Фальштинський. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – 131 с.
2. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля: монография / под общ. ред. О.В. Колоколова. – Д.: НГА Украины, 2000. – 281 с.
3. Дичковський Р.О. Наукові засади синтезу технологій видобування вугілля у слабометаморфізованих породах. / Р.О. Дичковський – Д. НГУ, 2013. – 262 с.
4. Бик С.І. Мінеральні компоненти у вугіллі Львівсько-Волинського басейну / С.І. Бик, В.І. Узіюк // Науковий вісник НГА України. – 2000. – №3. – С. 29 – 30.
5. Савчук В.С. Влияние вещественно-петрографического состава углей Львовско-Волинского бассейна на изменчивость величины отражения витринита / В.С. Савчук // Науковий вісник НГА України. – 2000. – № 4. – С. 41 – 42.
6. Химия и переработка угля / под ред. д-ра х. н., проф. В.Г. Липовича. – М.: Химия, 1988. – 336 с.
7. Химическая технология твёрдых горючих ископаемых: учебн. для вузов / под ред. Г. Н. Макарова и Г.Д. Харламповича. – М.: Химия, 1986. – 496 с.