

© П.Б. Саїк¹¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ПРИ ПІДЗЕМНІЙ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

© P. Saik¹¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SUBSTANTIATION INTO PARAMETERS FOR THE TECHNOLOGY OF CO₂ UTILIZATION IN UNDERGROUND COAL GASIFICATION

Мета. Обґрунтування параметрів технології утилізації вуглекислого газу у складі дуттьової суміші при підземній газифікації вугілля з подальшим встановленням енергетичних характеристик генераторного газу.

Методика досліджень. Дослідження процесу утилізації вуглекислого газу у складі дуттьової суміші проводились у лабораторних умовах на спеціально розробленій установці. Проведення досліджень включало виконання трьох послідовних етапів: подача повітряної суміші (O₂ – 21 %), суміші збагаченої киснем (O₂ – 35 %), повітряно-вуглекислотної суміші (CO₂ ≤ 30%). Теплоота згорання генераторного газу визначалась за правилом «адаптивності».

Результати дослідження. Обґрунтована можливість утилізації вуглекислого газу у складі дуттьової суміші при підземній газифікації вугілля. Визначено енергетичні характеристики генераторного газу залежно від типів подачі дуттьової суміші. Встановлено, що при подачі вуглекислого газу у складі дуттьової суміші максимальна його концентрація становить 22,3 %, при якій теплотворна здатність генераторного газу становить 6,32 МДж/м³.

Наукова новизна. Встановлено залежності зміни виходу вуглекислого газу та теплоти згорання генераторного газу від параметрів подачі дуттьової суміші з орієнтацією на технологію утилізації діоксиду вуглецю. Для визначення ефективності процесу газифікації запропонований коефіцієнт утилізації вуглекислого газу, який оцінюється його концентраціями у складі дуттьової суміші та генераторному газі, остання яка змінюється лінійно при граничних концентраціях подачі вуглекислого газу у складі дуттьової суміші не більше 22,3 %.

Практичне значення. Встановлені граничні параметри концентрації вуглекислого газу у складі дуттьової суміші при підземній газифікації вугілля, що дозволяють прогнозувати теплотворну здатність отриманого газу (LHV) та ефективність ведення процесу.

Ключові слова: підземна газифікація вугілля, вуглекислий газ, лабораторні дослідження, теплота згорання.

Вступ. Боротьба з викидами вуглекислого газу (CO₂) є однією з головних екологічних задач сучасності, оскільки CO₂ є одним з основних парникових газів, що сприяють зміні клімату. Підвищення концентрації CO₂ в атмосфері призводить до глобального потепління, що веде за собою танення полярних льодовиків та льодовикових щитів, що спричиняє підвищення рівня моря і загрожує прибережним районам, зміни режимів опадів, що призводить до частіших і більш інтенсивних повеней, посух та інших екстремальних погодних явищ [1, 2]. Найбільша частка викидів CO₂ припадає на енергетичний, транспортний та промисловий сектори. Енергетичний сектор є одним з найбільших джерел викидів CO₂,

оскільки велика частина електроенергії у світі виробляється з викопного палива, такого як вугілля, нафта і природний газ. Особливо шкідливі вугільні електростанції, які виділяють значну кількість CO_2 та інших забруднюючих речовин. Зростання кількості транспортних засобів та збільшення обсягів перевезень у всьому світі підсилюють цей ефект. Промисловий сектор включає різні галузі такі як виробництво сталі, цементу, хімічних речовин та інших матеріалів. Ці процеси вимагають великої кількості енергії, що зазвичай отримується з викопного палива. Детальні дані щодо викидів CO_2 наведено на рис. 1.

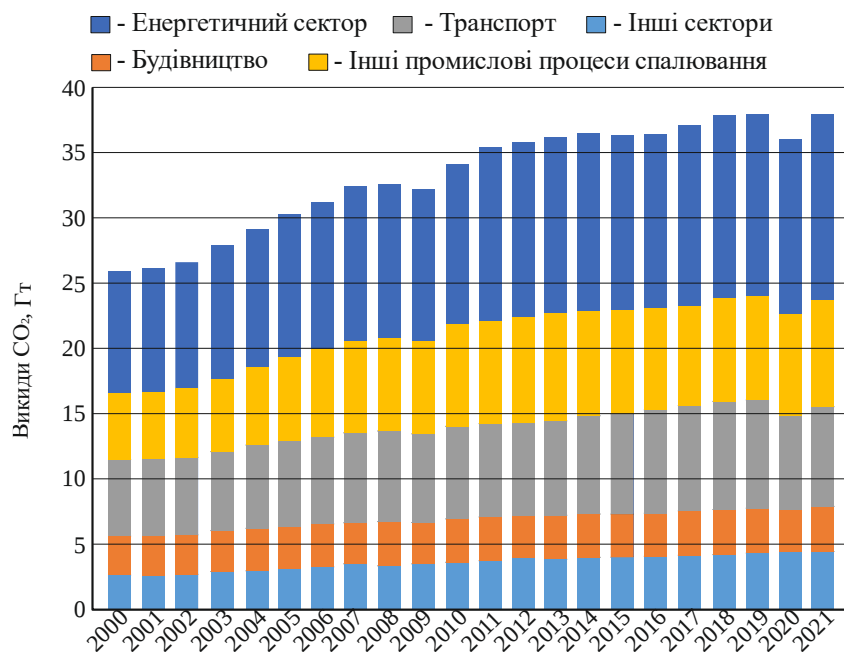


Рис. 1. Дані щодо викидів CO_2 з 2000 по 2021 роки [3]

Аналіз наведених даних вказує на постійне підвищення викидів CO_2 , що, пояснюється стрімким розвитком науково-технічного прогресу. Зменшення кількості викидів CO_2 у 2020 році обумовлена пандемією COVID-19, яка зумовила зменшення транспортної активності та зниження промислового виробництва [4, 5].

Сьогодні потрібно змінювати тенденції щодо видобутку вугілля, як енергетичної сировини, оскільки вугілля є одним з найбільших джерел викидів вуглекислого газу (CO_2), які сприяють зміні клімату. Основою такою зміни може стати технологія підземної газифікації вугілля [6].

Підземна газифікація вугілля (ПГВ) вважається однією з найперспективніших технологій, яка забезпечує отримання енергії з вугільних пластів без необхідності їх фізичного видобутку на поверхню [7, 8]. Цей процес, що передбачає термохімічне розкладання вугілля у його природному середовищі є альтернативою традиційним методам видобутку вугілля, які часто супроводжуються значними екологічними наслідками та ризиками як для довкілля, так і для працівників, що заняті на підземних гірничих роботах. Технологічно процес підземної газифікації полягає в створенні системи експлуатаційних свердловин безпосередньо до площини вугільного пласта, через які в подальшому подаються дуттьові

суміші, які у своєму складі мають відповідні реагенти, наприклад O_2 , CO_2 , пар. Ці реагенти, вступаючи в хімічну взаємодію з вугіллям, ініціюють його окислення, в результаті чого утворюються горючі гази, такі як водень (H_2), метан (CH_4), монооксид вуглецю (CO) та баластні гази: азот (N_2), вуглекислий газ (CO_2) [9–11]. Отримані гази відводяться на поверхню і можуть бути використані для генерації електричної енергії у газових турбінах або як сировина у хімічній промисловості [12, 13].

Основною перевагою ПГВ є зменшення кількості шкідливих викидів у атмосферу порівняно з традиційним спалюванням вугілля, оскільки значна частина шкідливих речовин залишається під землею. Підземна газифікація вугілля хоча і є більш екологічним методом видобутку енергії, проте генерація вуглекислого газу все ще залишається серйозною екологічною проблемою. Утилізація CO_2 стає ключовою частиною технологічного процесу, що дозволяє мінімізувати негативний вплив на клімат. Так в процесі підземної газифікації вугілля ми маємо змогу утилізувати вуглекислий газ шляхом його подачі у складі дуттьової суміші чи проводити його захоронення у техногенно створених порожнинах підземного газогенератора.

Таким чином **метою даної роботи** є обґрунтування параметрів технології утилізації вуглекислого газу у складі дуттьової суміші при підземній газифікації вугілля з подальшим визначенням енергетичних характеристик генераторного газу. Вирішення поставленої мети передбачало виконання наступних завдань: провести аналіз механізму і хімізму взаємодії вуглецю палива з киснем; дослідити показники виходу генераторного газу при подачі повітряного дуття (O_2 – 21 %) та дуття збагаченого киснем (O_2 – 35%); визначити оптимальні концентрації CO_2 у складі дуттьової суміші при максимальній теплотворній здатності генераторного газу.

Методика проведення досліджень. Дослідження процесу утилізації вуглекислого газу у складі дуттьової суміші проводились на спеціально розробленій установці у три послідовні етапи. На першому етапі досліджень до площини змодельованого вогневого вибою подавали повітряну суміш (O_2 – 21 %), на другому – суміш збагачену киснем (O_2 – 35 %), на третьому – вуглекислий газ (CO_2). За кожним із етапів досліджень визначали якісні та кількісні параметри отримання генераторного газу.

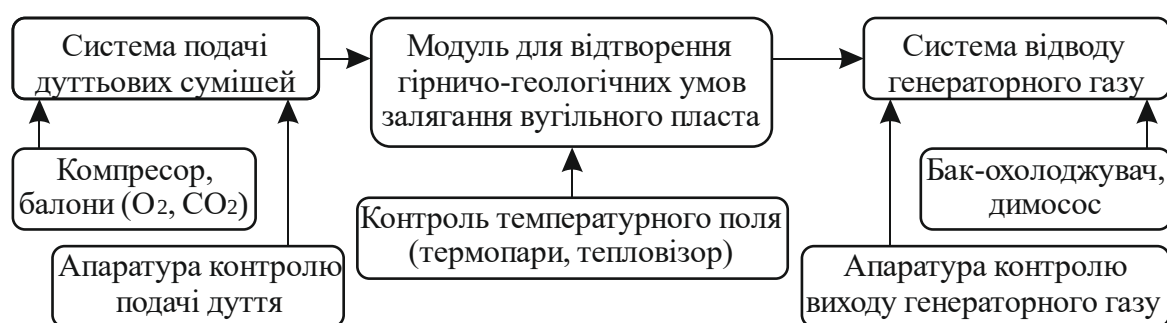


Рис. 2. Схема зв'язку основних вузлів лабораторної установки з дослідження процесів газифікації

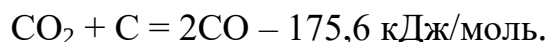
Лабораторна установки складається з трьох основних систем (див. рис.2): I – система модельованого газогенератора, що включає стенд, у якому проводиться моделювання породо-вугільного масиву; II – система подачі дуттьових сумішей (повітряний компресор, балони з киснем та вуглекислим газом, контрольно-вимірювальна апаратура); III – система відводу генераторного газу (бак-охолоджувач, димосос, контрольно-вимірювальна апаратура).

Важливою частиною установки є стенд газифікації де відбувається відтворення гірничо-геологічних умов залягання вугільного пласта. Установка дозволяє моделювати процес підземної газифікації вугілля на поверхні в штучному вугільному пласті з розмірами за падінням 1,0 та простяганням 1,2. З фронтальної частини є отвори для подачі дуття і відводу генераторного газу.

Формування моделі породовугільного масиву передбачало моделювання вугільного пласта та надвугільної товщі. Як еквівалентний матеріал використовувались куски вугілля розміром $200 \times 150 \times 100$ мм, що за якісним складом відповідали досліджуваній ділянці та параметрах вугільного пласта ($W_r = 5,8 \%$, $W_a = 6,9 \%$, $A_c = 12,0 \%$, $S_d = 1,6 \%$, $V_{daf} = 24,2 \%$, $C_{daf} = 80,3 \%$, $H_{daf} = 5,5 \%$, $O_{daf} = 7,2 \%$, $N_r = 5,0 \%$, $Q_r = 23,4$ МДж/кг, $\gamma = 1,24$ т/м³). У пласті залишався простір для імітації нагнітальної та газовідвідної свердловин діаметром $d = 0,08$ м та реакційного каналу. Реакційний канал формувався із кусків вугілля фракцією до 0,07 м, імітуючи гідророзрив пласта між дуттьовою та газовідвідною свердловинами.

Під час кожного етапу дослідження заміряли концентрації горючих газів CO, H₂, CH₄ та баластного газу CO₂ у вихідній суміші. Тиск подачі дуттьової суміші був у межах 0,15–0,4 МПа.

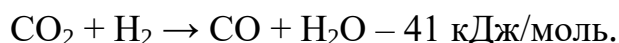
Результати досліджень. При подачі діоксиду вуглецю (CO₂) у окислювальну зону вогневого вибою підземного газогенератора проходить реакція його взаємодії з вуглецем (C), що описується хімічним рівнянням:



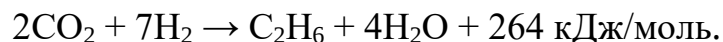
Дана реакція є ендотермічною, тобто для її протікання необхідне постачання тепла, яке забезпечується за рахунок інших окислювальних реакцій у вогневому вибої. CO₂ є окисником в реакції, а її швидкість протікання залежить від загального тиску в вогневому вибої. При пониженні тиску рівновага зміщується вправо. Також, враховуючи, що при газифікації вугілля паралельно і послідовно можуть відбуватися інші реакції з утворенням водню, метану та сірководню, то наступні реакції за участю діоксиду вуглецю можуть мати місце:



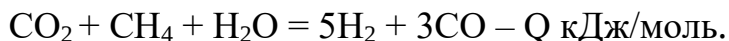
Реакція є екзотермічною і зазвичай проходить при температурах від 200 до 550°C в присутності каталізатору, яким можуть виступати компоненти, що містяться в породі (залізо, нікель, алюміній та ін.). Також може відбуватися наступна реакція:



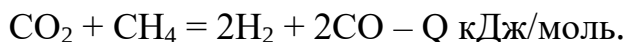
Крім метану та води у продуктах також можна знайти вищі насичені вуглеводні. Найстабільнішим вуглеводнем є етан і він утворюється згідно з реакцією:



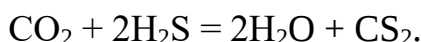
В присутності парів води, реакція вуглекислого газу і метану має вигляд:



Без наявності води будуть утворюватися ті ж самі продукти за наявності мінеральних каталізаторів, без яких реакція не відбувається:



Враховуючи присутність у вугіллі сірки, то при нагріванні вона утворює сірководень, який може взаємодіяти з діоксидом вуглецю за реакцією:



Ця реакція може вимагати певних температурних, тискових та каталітичних умов. Чи буде ця реакція ендотермічною чи екзотермічною залежить від її умов. Газифікація являє собою складне поєднання гомогенних і гетерогенних реакцій. Можливе послідовне і паралельне протікання зазначених реакцій разом з іншими без участі CO_2 . Механізм цих процесів складний і залежить від багатьох факторів [14–16].

Швидкість протікання гетерогенних реакцій між газами і вуглецем твердого палива залежить як від швидкості самої хімічної взаємодії (від кінетики хімічних реакцій), так і від швидкості перенесення реагуючих газів до поверхні вуглецю за допомогою молекулярної або турбулентної дифузії. За температур 700–800°C процес газифікації гальмується переважно хімічною реакцією, а за температур вище 900°C – переважно дифузією. У реальних умовах сумарний процес газифікації протікає в проміжній області. Механізм і хімізм взаємодії вуглецю палива з киснем можна представити схемою нижче, що наведено на рис. 3.

Кількість вуглецю, що реагує за одиницю часу, залежить від температури і концентрації газоподібного реагенту біля твердої поверхні. Під час взаємодії, наприклад, вуглецю палива з окисником біля твердої поверхні концентрація окисника знижується за рахунок витрачання на реакцію. Внаслідок цього виникає різниця концентрацій окисника в газовому просторі й утворюється дифузійний потік окисника до поверхні вугілля. У разі сталого процесу цей дифузійний потік «повертає» витрати окисника на реакцію з вуглецем.

Процес, що протікає в дифузійній ділянці вогневого вибою, може бути інтенсифікований збільшенням лінійної швидкості дуття, яка визначає, наскільки швидко газова фаза переміщується до площини вибою. Цей параметр має критичне значення для забезпечення ефективного масообміну, теплопередачі, та для контролю хімічних реакцій.

Процес дифузії окисника до вуглецевої поверхні ускладнюється явищем догорання окису вуглецю, що утворився. Догорання CO чинить сповільнюювану дію на проникнення окисника до вугільної поверхні. Аналогічне явище спостерігається під час реагування водяної пари з вуглецем в окислювальній зоні вогневого вибою завдяки догоранню водню, що утворився.

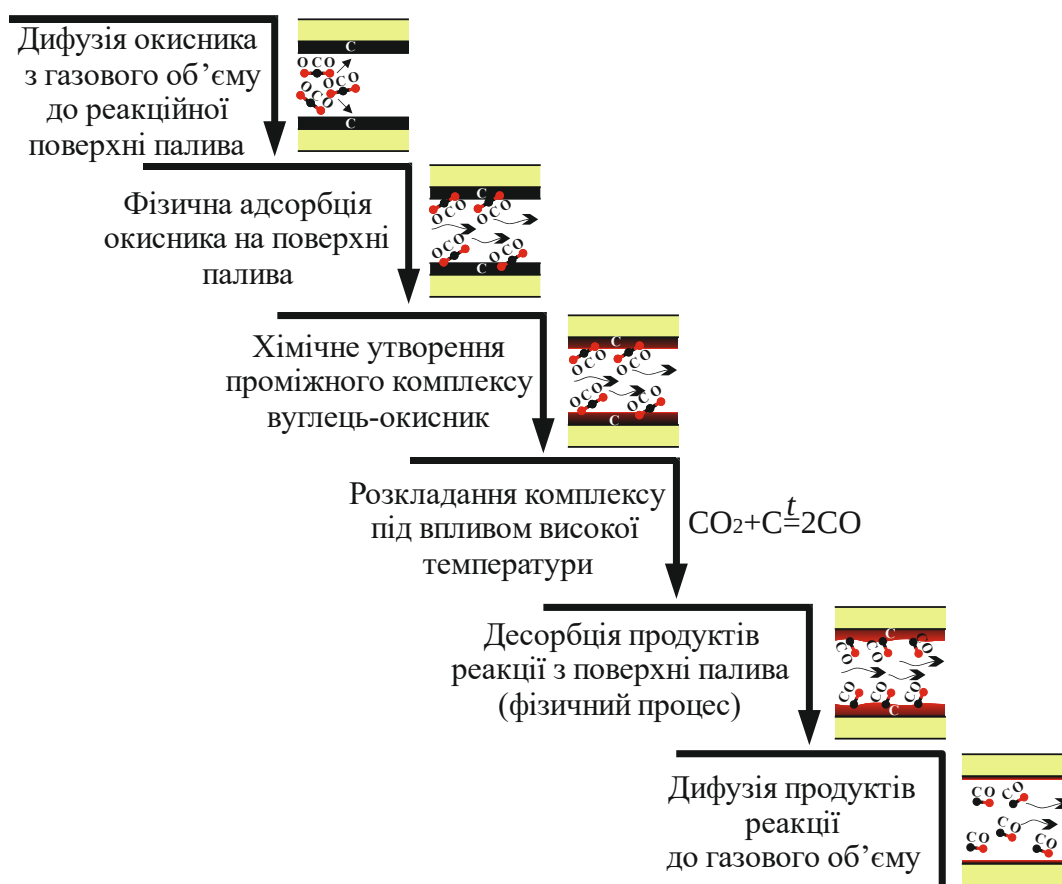


Рис. 3. Механізм і хімізм взаємодії вуглецю палива з киснем

Слід зазначити, що механізм і кінетика реакції $\text{H}_2\text{O} + \text{C}$ так само, як і реакції $\text{O}_2 + \text{C}$ і $\text{CO}_2 + \text{C}$, є незрозумілими [17, 18] і залежать від матеріалу, що піддається газифікації [19–21]. Це ускладнює можливість оцінки ступеню оптимізації даних реакцій. Тому важливим є проведення лабораторних досліджень, що дозволяють оцінити ступінь впливу баластного генераторного газу (діоксиду вуглецю) на якісні та кількісні параметри виходу генераторного газу.

Проведеними лабораторними дослідженнями визначено якісні та кількісні параметри виходу генераторного газу при газифікації вугілля. Усереднені показники щодо концентрації горючих та баластних газів наведено у табл.

Таблиця

Усереднені якісні параметри виходу генераторного газу

Тип дуття	Концентрація газів, %					Теплота згорання генераторного газу, МДж/м³
	горючі			баластні		
	CH ₄	CO	H ₂	N ₂	CO ₂	
Повітряне	6,12	14,42	17,95	42,66	18,85	6,00
Дуття збагачене киснем (35 %)	8,25	23,64	22,82	34,15	11,14	8,35

Згідно з даними табл. середній вихід горючих генераторних газів становить 38,49 % при подачі повітряного дуття та 53,71 % при подачі дуття збагаченого

киснем. Теплотворна здатність генераторного газу, що розраховувалась за «правилом адитивності» становить відповідно 5,91 та 8,35 МДж/м³. Вихід генераторного газу становить 3,34 – 4,46 м³/кг вугілля. Враховуючи значення концентрації баластного газу CO₂ у 18,85 % та 11,14 % середній вихід його становить 0,37 – 0,84 м³/кг вугілля. За умови газифікації вугілля, що зосереджено у стовпі газифікації довжиною у 600 м (довжина вогневого вибою – 30 м, потужність вугільного пласта – 0,8 м, густина вугілля 1,24 т/м³) вихід вуглекислого газу становить 1,99 – 3,67 млн 6,61 – 11,25 тис м³. Таким чином, подальшими дослідження оцінена можливість утилізації вуглекислого газу у змодельованій області підземного газогенератора. Вуглекислий газ, що знаходився у балонах, подавали по дуттьовій свердловині. Отримані дані щодо концентрацій генераторного газу наведено на рис. 4.

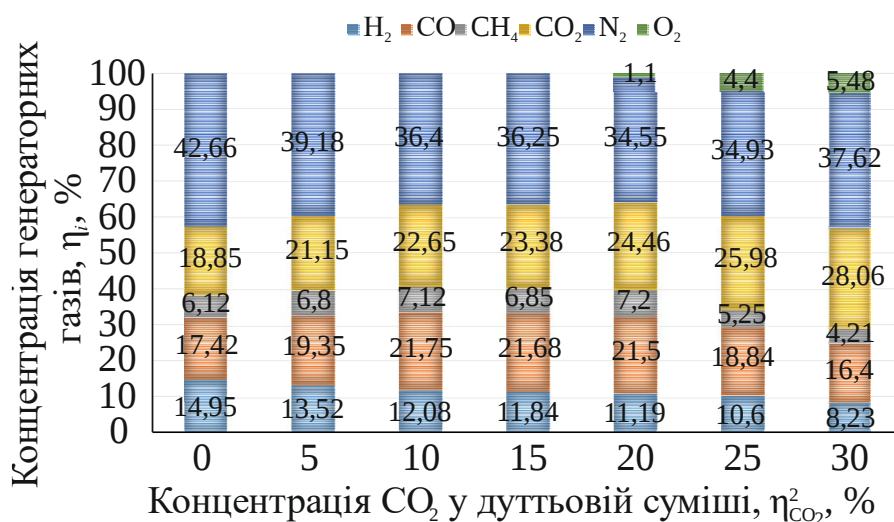
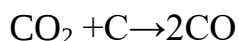


Рис. 4. Дані щодо зміни концентрації газів у генераторному газі від кількості CO₂ у дуттьовій суміші

Аналіз даних рис. 4 вказує, що прослідковується тенденція зменшення концентрації горючих газів та підвищення концентрації баластних зі збільшенням вуглекислого газу у дуттьовій суміші. Потрібно зазначити, що концентрація CO є залишком первинної реакції, яка утворюється в окислювальній зоні. При цьому в окислювальній зоні вуглець реагує з киснем, утворюючи вуглекислий газ (CO₂) і монооксид вуглецю (CO). При вторинній реакції CO буде утворюватися у відновній зоні вогневого вибою, де відбувається взаємодія діоксиду вуглецю (CO₂) з вуглецем (C) при високих температурах. Ця реакція відбувається при температурах стінок каналу газогенератора в діапазоні від 800 до 1050°C:



Зростання температури сприяє проходженню цієї реакції, збільшуючи концентрацію CO у газовій суміші. Таким чином, кількість CO зростає по довжині каналу газогенератора. Це пояснюється тим, що на виході з відновної зони концентрація CO значно збільшується за рахунок вторинної реакції. Також варто зазначити, що на кількість утвореного CO впливають такі фактори, як склад

вихідного палива, швидкість подачі окисника, а також термодинамічні умови в різних зонах підземного газогенератора. Тому управління параметрами процесу є критично важливим для оптимізації виходу синтез-газу з високою концентрацією CO.

На рис. 5 наведено дані щодо зміни теплотворної здатності генераторного газу та концентрації CO₂ у ньому від концентрації CO₂ у дуттьовій суміші.

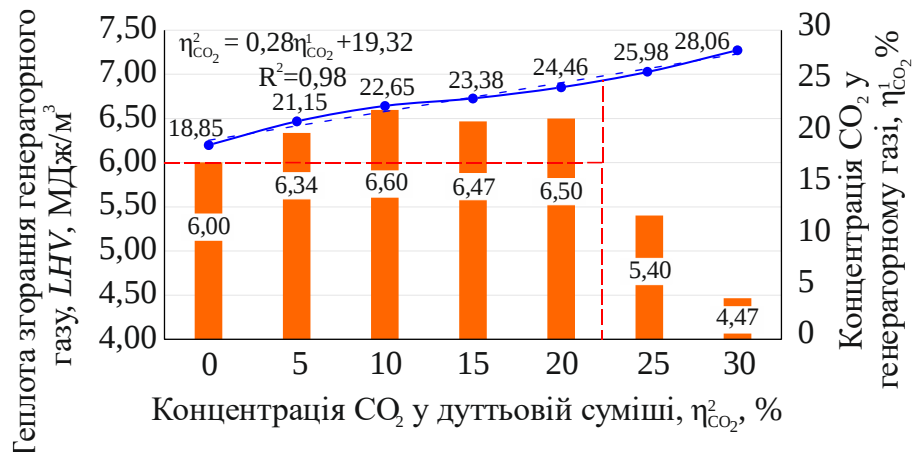


Рис. 5. Зміна теплотворної здатності генераторного газу та концентрації CO₂ у ньому від концентрації CO₂ у дуттьовій суміші

Аналіз наведених даних на рис. 5 вказує, що прослідковується тенденція до підвищення концентрації CO₂, яка описується лінійною залежністю виду

$$\eta_{CO_2}^2 = 0,28\eta_{CO_2}^1 + 19,32, \%,$$

де $\eta_{CO_2}^1$ – концентрація CO₂ у дуттьовій суміші, %; $\eta_{CO_2}^2$ – концентрація CO₂ у генераторному газі, %.

Водночас, в межах концентрації CO₂ від 0 до 22,3%, середня теплота згорання генераторного газу становить 6,32 МДж/м³. Однак, коли концентрація CO₂ в дуттьовій суміші перевищує 22,3 %, спостерігається різке зниження теплоти згорання. Зокрема, при концентрації CO₂ у 25 % теплота згорання скорочується до 5,4 МДж/м³, а при досягненні 30 % - знижується до 4,47 МДж/м³. Це вказує на значний вплив вмісту вуглекислого газу на енергетичні характеристики газу. Водночас, вміст CO₂ у складі генераторного газу за умов подачі повітряного дуття (де концентрація CO становить 0 %) на 7,13 % та 9,21 % більший, що підкреслює зміну хімічного складу газу залежності від умов його формування. Таким чином, аналіз даних з рис. 5 свідчить, що при подачі CO₂ у складі дуттьової суміші у кількості 18,85%, залишок неутілізованого газу становить 5,25%. З огляду на ці дані здобувачем було оцінено кількісні показники утилізованого генераторного газу на прикладі газифікації вугільного стовпа з розмірами у 600 м (довжина вогневого вибою – 30 м, потужність вугільного пласта – 0,8 м, густина вугілля 1,24 т/м³). Витрати дуттьової повітряно-вуглекислотної суміші необхідної для газифікації одного кг вугілля становлять 6,89 – 7,39 м³. Згідно з чим кількісні

показники суміші становлять: 1,44 м³/кг вугілля (O₂), 1,54 м³/кг вугілля (CO₂), 3,86 м³/кг вугілля (N₂) – 1,55 м³/кг вугілля (O₂), 1,65 м³/кг вугілля (CO₂), 4,19 м³/кг вугілля (N₂). Отже, при газифікації запасів вугілля у 17,87 млн кг необхідно подати 123,12 – 132,06 млн м³ дуття, де частка CO₂ становить 27,4 – 29,45 млн м³.

В результаті проведених досліджень встановлено показники коефіцієнта утилізації вуглекислого газу, який визначається за такою формулою:

$$k_{CO_2} = \left| 1 - \frac{\eta_{CO_2}^1}{\eta_{CO_2}^2} \right|,$$

де $\eta_{CO_2}^1$ – концентрація CO₂ у дуттьовій суміші, %; $\eta_{CO_2}^2$ – концентрація CO₂ у генераторному газі, %. Аналіз результатів проведених аналітичних розрахунків відповідно до запропонованої формули, вказує, що умовою ефективної утилізації вуглекислого газу є наближення коефіцієнта утилізації до 0. Отже, встановлено, що коефіцієнт утилізації вуглекислого газу (k_{CO_2}) при підземній газифікації вугілля оцінюється його концентраціями у складі дуттьової суміші ($\eta_{CO_2}^1$) та генераторному газі ($\eta_{CO_2}^2$), остання яка змінюється лінійно при граничних концентраціях подачі вуглекислого газу у складі дуттьової суміші не більше 22,3 %. Урахування цієї залежності дає можливість спрогнозувати теплотворну здатність отриманого газу (LHV) та ефективність ведення процесу підземної газифікації вугілля з наступною утилізацією вуглекислого газу.

Висновки. Впровадження технології підземної газифікації вугілля може стати ефективним кроком у зменшенні викидів CO₂ та покращенні екологічної ситуації, забезпечуючи при цьому стабільне енергопостачання та економічну вигоду. Втім, впровадження даної технології на практиці вимагає значних інвестицій у дослідження та розробку, а також створення належних регулятивних рамок, що забезпечуватимуть екологічну безпеку та ефективність цього процесу.

Ключовими аспектами для подальшого розвитку ПГВ є оптимізація технологічних параметрів управління процесами підземної газифікації та підвищення ефективності утилізації вуглекислого газу, що забезпечить ефективність та довгострокову стійкість процесу підземної газифікації вугілля.

Встановлено, що зі збільшенням вмісту вуглекислого газу у дуттьовій суміші спостерігається тенденція до зменшення концентрації горючих газів та підвищення концентрації баластних газів. Концентрація CO є залишком первинної реакції, яка відбувається в окислювальній зоні, де вуглець реагує з киснем, утворюючи CO₂ і CO. Подача дуття, збагаченого киснем, підвищує теплотворну здатність генераторного газу, але з меншими показниками виходу CO₂.

Вдячність. Представлені результати отримано в рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля» (проект №0123U101757) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Перелік посилань

1. Levin, F. S. (2023). *Global Warming: Truth and Consequences*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-27023-9>
2. Levin, F. S. (2023). Contemporary repercussions of global warming. *Global Warming: Truth and Consequences*, 43–71. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27023-9_2
3. European Commission: Joint Research Centre, Crippa, M., Guizzardi, D., Banja, M., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Pagani F., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., & Vignati, E. (2022). *CO₂ emissions of all world countries : JRC/IEA/PBL 2022 report*, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/07904>
4. Heiets, I., & Xie, Y. (2021). The Impact of the COVID-19 Pandemic on the Aviation Industry. *Journal of Aviation*, 5(2), 111–126. <https://doi.org/10.30518/jav.933296>
5. Заха, Д., Мовчан, В., Кравчук, В., Кірхнер, Р., & Полушкін, Г. (2020). *Економічний вплив пандемії Covid-19 на Україну* Аналітичне дослідження. https://rpr.org.ua/wp-content/uploads/2020/05/GET_UKR_PS_01_2020_ua.pdf
6. Saik, P., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., & Ovcharenko, A. (2024). Achieving climate neutrality in coal mining regions through the underground coal gasification. *E3S Web of Conferences*, 526, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601004>
7. Saik, P., Lozynskiy, V., Anisimov, O., Akimov, O., Kozhantov, A., & Mamaykin, O. (2023). Managing the process of underground coal gasification. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*, (6), 25–30. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/025>
8. Lavis, S., & Mostade, M. (2023). Underground coal gasification. *The Coal Handbook*, 323–337. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824328-2.00010-8>
9. Lozynskiy, V. (2023). Critical review of methods for intensifying the gas generation process in the reaction channel during underground coal gasification (UCG). *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 67–85. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.067>
10. Saik, P., & Berdnyk, M. (2022). Mathematical model and methods for solving heat-transfer problem during underground coal gasification. *Mining of Mineral Deposits*, 16(2), 87–94. <https://doi.org/10.33271/mining16.02.087>
11. Bazaluk, O., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Saik, P., Dychkovskiy, R., & Cabana, E. (2021). Experimental Studies of the Effect of Design and Technological Solutions on the Intensification of an Underground Coal Gasification Process. *Energies*, 14(14), 4369. <https://doi.org/10.3390/en14144369>
12. Falshtynskiy, V. S., Dychkovskiy, R. O., Saik, P. B., Lozynskiy, V. H., & Caceres, C. E. (2017). Formation of thermal fields by the energy-chemical complex of coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 36–42.
13. Saik, P., Falshtynskiy, V., Lozynskiy, V., Dychkovskiy, R., Berdnyk, M., & Cabana, E. (2023). Substantiating the operating parameters for an underground gas generator as a basic segment of the mining energy-chemical complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012021>
14. Khan, M.M., Mmbaga, J.P., Shirazi, A.S., Trivedi, J., Liu, Q., & Gupta, R. (2015). Modelling Underground Coal Gasification-A Review. *Energies*, (8), 12603–12668. <https://doi.org/10.3390/en8112331>
15. Mohammadi, A., & Anukam, A. (2023). The Technical Challenges of the Gasification Technologies Currently in Use and Ways of Optimizing Them: A Review. *Latest Research on Energy Recovery*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102593>
16. Zhao, B., Dong, X., Chen, Y., Chen, S., Chen, Z., Peng, Y., Liu, Y., & Jiang, X. (2022). Experimental Investigation on the Pore Structure Evolution of Coal in Underground Coal Gasification Process. *ACS Omega*, 7(13), 11252–11263. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00157>
17. Lobo, L. S., & Carabineiro, S. A. C. (2016). Kinetics and mechanism of catalytic carbon gasification. *Fuel*, 183, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.115>

18. Zhu, Z., Lu, G. Q. (Max), Finnerty, J., & Yang, R. T. (2003). Electronic structure methods applied to gas–carbon reactions. *Carbon*, 41(4), 635–658. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(02\)00380-9](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(02)00380-9)
19. Diao, R., Zhu, X., Wang, C., & Zhu, X. (2020). Synergistic effect of physicochemical properties and reaction temperature on gasification reactivity of walnut shell chars. *Energy Conversion and Management*, 204, 112313. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112313>
20. Luo, Q., Bai, Y., Wei, J., Song, X., Lv, P., Wang, J.-F., Su, W., Lu, G., & Yu, G. (2022). Insights into the Oxygen-Containing Groups Transformation During Coal Char Gasification in H₂O/CO₂ Atmosphere by Using Reaxff Reactive Force Field. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4313207>
21. Kariznovi, M., Nourozieh, H., Abedi, J., & Chen, Z. (2013). Simulation study and kinetic parameter estimation of underground coal gasification in Alberta reservoirs. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(3), 464–476. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.11.008>

ABSTRACT

Purpose. To justify the parameters of the CO₂ utilization technology as part of the blown mixture during underground coal gasification and subsequently determine the energy characteristics of the producer gas.

Methods. The investigation of the CO₂ utilization process within the blown mixture was conducted under laboratory conditions using a specially designed test setting. The research was carried out in three sequential stages: the supply of an air mixture (O₂ – 21%), an oxygen-enriched mixture (O₂ – 35%), and an air with carbon dioxide mixture (CO₂ ≤ 30%). The calorific value of the producer gas was determined according to the “adaptivity” rule.

Results. The study substantiated the feasibility of utilizing CO₂ within the blown mixture during underground coal gasification. Energy characteristics of the producer gas were determined based on the different methods of feeding the blown mixture. It was established that when CO₂ is supplied as part of the blown mixture, its maximum concentration reaches 22.3%, at which the calorific value of the producer gas is 6.32 MJ/m³.

Originality. The dependencies of CO₂ output and the calorific value of the producer gas on the parameters of the blown mixture feeding were established with a focus on CO₂ utilization technology. A CO₂ utilization coefficient was proposed to assess the efficiency of the gasification process; this coefficient is evaluated based on the CO₂ concentrations in the blown mixture and in the producer gas, with the latter varying linearly at the limiting CO₂ concentration in the blown mixture of no more than 22.3%.

Practical implication. The study established the limiting parameters for CO₂ concentration in the blown mixture during underground coal gasification, which enable the prediction of the lower heating value (LHV) of the produced gas and the overall process efficiency.

Keywords: underground coal gasification, carbon dioxide, laboratory experiments, calorific value.