

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Саїка Павла Богдановича на тему: «Наукові основи підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин

Відгук складено на основі вивчення дисертаційної роботи та її реферату, а також опублікованих здобувачем результатів досліджень та матеріалів, що свідчать про реалізацію та впровадження результатів досліджень.

1. Обґрунтування актуальності обраної теми досліджень та зв'язок з науковими програмами, планами і темами

На сьогодні, попри глобальну тенденцію до декарбонізації, вугілля залишається одним із ключових джерел енергетичних ресурсів, зокрема для України, яка прагне зміцнити енергетичну незалежність в умовах зростаючих геополітичних та економічних викликів. Вітчизняна вугільна промисловість нині перебуває в критичному стані через втрату продуктивних площ, погіршення гірничо-геологічних умов та зношеність технічної бази. Окрім техніко-економічних проблем, одним із найгостріших питань є значний екологічний вплив, спричинений традиційними методами видобутку вугілля, що супроводжується деградацією природного середовища та викидами парникових газів, передусім CO₂.

У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження «чистих вугільних технологій», серед яких провідне місце займає підземна газифікація вугілля з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі. Такий підхід не лише дозволяє ефективно освоювати вугільні ресурси у складних гірничо-геологічних умовах, але й мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище. Крім того, технологія сприяє досягненню міжнародних кліматичних цілей і створює перспективи для модернізації гірничодобувної галузі, підвищення її економічної стійкості та екологічної відповідальності.

Таким чином, з огляду на сучасні виклики в енергетичному секторі та необхідність впровадження та розвитку екологічно безпечних технологій відпрацювання запасів вугілля, актуальною науковою проблемою є оптимізація процесів видобутку вугілля технологією свердловинної підземної газифікації з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі. Розв'язання цієї проблеми передбачає встановлення закономірностей зміни параметрів формування активних зон підземного газогенератора та ефективного поглинання CO₂, що уможливує розробку інтегрованої системи керування процесом газифікації. Запропонований підхід здатен стати основою для комплексної трансформації вугільної промисловості, сприяти відновленню економічної активності, створенню нових робочих місць та залученню інвестицій у розвиток гірничодобувних регіонів

Дисертаційна робота виконана відповідно до держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України за період 2016 – 2025 рр.: ГП-487 «Наукове

обґрунтування та розробка енергоефективних маловідходних технологій видобування вуглеводневої та мінеральної сировини», ГП-489 «Наукові основи формування єдиної системи збереження та генерації енергії об'єктів паливно-енергетичного комплексу України», ГП-500 «Синтез, оптимізація та параметризація інноваційних технологій освоєння ресурсів газовугільних родовищ», ГП-503 «Геотехнологічні основи формування енергохімічних комплексів вугледобувних регіонів», ГП-511 «Науково-практичні засади структурних трансформацій вугледобувних підприємств на основі інноваційних технологій раціонального природокористування», ГП-512 «Когазифікація вуглецевмісної сировини при вигазовуванні надтонких вугільних пластів з орієнтацією на отримання водню», ГП-515 «Обґрунтування технологічних рішень екологічнобезпечного освоєння мінеральних ресурсів в умовах відбудови країни у воєнний і післявоєнний періоди, ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля», де здобувач був керівником, відповідальним та основним виконавцем. Також за результатами роботи укладено Ліцензійний договір № 12 ПЛ за патентом на корисну модель UA №156354 «Спосіб утилізації діоксиду вуглецю».

Дисертаційна робота відповідає Стратегії розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року (Вугільна промисловість) та Паризькій кліматичній угоді в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC).

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна

Наукові положення, а також теоретичні й прикладні результати, викладені у дисертації, є змістовними та обґрунтованими, що підтверджується комплексним аналізом, систематизацією й узагальненням результатів досліджень, виконаних у контексті завдань щодо технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу.

Наукові положення, що захищаються у дисертації:

1. Довжина окислювальної зони підземного газогенератора ($l_{ок.з.}$) змінюється за експоненціальною залежністю від тривалості процесу газифікації (t) та потужності вугільного пласта (m) і сягає свого критичного значення на проміжку 10,12 – 10,45 м, що свідчить про вихід процесу газифікації за межу ефективності його застосування. Це дає змогу спрогнозувати параметри посування фронту вогневого вибою для забезпечення стабільної та ефективної роботи підземного газогенератора при формуванні вигазованого простору газогенератора.

2. Тиск подачі дуттьової суміші (P) при газифікації вугільних пластів потужністю від 0,6 до 1,2 м описується експоненціальною залежністю від тривалості процесу газифікації (t), який встановлює геометричні параметри вигазованого простору від швидкості посування вогневого вибою в окислювальній та відновлювальній зонах підземного газогенератора, що дає змогу визначити режими подачі дуттьової суміші для оптимізації енергетичних витрат на її подачу.

3. Концентрація діоксиду вуглецю в генераторному газі ($\eta_{CO_2}^2$) змінюється лінійно за граничних концентрацій подачі вуглекислого газу в складі не більше 22,3%, що є критерієм формування коефіцієнта утилізації вуглекислого газу (k_{CO_2}), який визначається його концентраціями у складі дуттьової суміші ($\eta_{CO_2}^1$). Це дає можливість спрогнозувати теплотворну здатність отриманого газу (LHV) та ефективність ведення процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією діоксиду вуглецю.

4. Ефективний час подачі повітряно-вуглекислотного дуття (t) до площини підземного газогенератора характеризується лінійною залежністю від потужності вугільного пласта (m) та показників виходу вуглекислого газу ($\eta_{CO_2}^2$) у кількості 25% як граничне значення, що в результаті прогнозує тривалість роботи підземного газогенератора, направленого на утилізацію вуглекислого газу (68,83 – 85,87%), з максимальним значенням теплотворної здатності отриманого газу на рівні 6,3 – 6,6 МДж/м³.

Наукова новизна отриманих результатів чітко й коректно сформульована, має належне обґрунтування та полягає, зокрема, у наступному:

1. Вперше:

– розроблено та протестовано математичну модель теплообміну середовища в системі «вугілля – генераторний газ» при підземній газифікації з урахуванням умов Стефана на межі фазового переходу;

– розроблено та протестовано на авторській лабораторній установці математичну модель розповсюдження температурного поля в гірському масиві навколо підземного газогенератора залежно від тривалості процесу газифікації вугілля;

– встановлено залежності зміни критичних довжин окислювальної зони підземного газогенератора від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта з урахуванням теплотворної здатності генераторного газу;

– встановлено залежності зміни тиску подачі дуттьової суміші до окислювальної зони вогневого вибою з урахуванням параметрів формування вигазованого простору від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта;

– встановлено залежності зміни міцності зразків гірської породи залежно від температури вогневого вибою за його зонами хімічних реакцій для гірничо-геологічних умов ДП «Львіввугілля» та ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»;

– запропоновано коефіцієнт утилізації вуглекислого газу (k_{CO_2}) при підземній газифікації вугілля, що оцінюється його концентраціями у складі дуттьової суміші та генераторному газі;

– встановлено залежності тривалості процесу газифікації вугілля при подачі повітряно-вуглекислотного дуття (CO_2 – 22,3%) від потужності вугільного пласта та критичних показників CO_2 у генераторному газі;

– встановлено залежності зміни теплотворної здатності генераторного газу від способів подачі дуттьової суміші до площини підземного газогенератора.

2. *Отримала подальший розвиток* концепція утилізації вуглекислого газу у складі дуттьової суміші та техногенному середовищі підземного газогенератора на базі технології підземної газифікації вугілля для забезпечення принципів сталого розвитку вугледобувних регіонів.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується використанням апробованих методів теоретичних і лабораторних досліджень, застосуванням основних положень теорії теплообміну, принципів математичної статистики, достатнім обсягом виконаних експериментів і високою достовірністю результатів теоретичних та лабораторних досліджень (збіжність отриманих результатів становить 78 – 92 %). Відповідність результатів лабораторних досліджень забезпечувалася кінцевими експериментальними даними, отриманими при відтворенні процесів газифікації на спеціальному сертифікованому обладнанні.

3. Практичне значення отриманих результатів досліджень

1. У дисертації розроблено низку методик, зокрема з визначення довжини переміщення межі фазового переходу середовища «вугілля – генераторний газ», прогнозу ефективності газифікації вуглецевмісної сировини, дослідження впливу температури на міцнісні характеристики гірського масиву та формування порожнин вигазованого простору підземного газогенератора.

2. Запропоновано методики дослідження процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу у складі дуттьової суміші та надано рекомендації щодо оптимізації режимів її подачі.

3. Обґрунтовано параметри керування процесом підземної газифікації з утилізацією вуглекислого газу, розроблено відповідну технологію, захищену патентами України, а також створено онлайн-інструментарій для дослідження цих процесів у реальному часі.

4. Оцінка змісту роботи та повнота викладу положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 286 найменувань, 4 додатки на 30 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 342 сторінки, у тому числі 94 рисунка та 16 таблиць.

Дисертаційна робота характеризується логічною структурою, а її текст викладено чітко, коректно та грамотно, із застосуванням фахової науково-технічної термінології.

У *вступі* дисертації обґрунтовано актуальність обраної тематики, висвітлено зв'язок дослідження з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету, ідею й завдання роботи, окреслено об'єкт, предмет і методи дослідження. Також представлено основні наукові положення, розкрито наукову новизну й практичну значущість отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, охарактеризовано апробацію результатів та структуру дисертації.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено комплексному дослідженню технології підземної газифікації вугілля як інноваційного напрямку трансформації вугільної промисловості України, з урахуванням сучасних глобальних трендів у сфері видобутку вугілля, оцінки ефективності її функціонування та потреб забезпечення кліматичної нейтральності гірничодобувних регіонів.

У другому розділі дисертації обґрунтовано методичні підходи і методи, що застосовувалися для вивчення технології підземної газифікації вугілля з супутньою утилізацією вуглекислого газу. Особливу увагу зосереджено на авторських лабораторних установках, які забезпечують можливість моделювання як процесу підземної газифікації, так і утилізації вуглекислого газу в контрольованих умовах.

У третьому розділі представлено результати розробки математичних моделей теплообміну у площині вогневого вибою підземного газогенератора та процесу прогріву гірського масиву під час підземної газифікації вугілля. Застосування цих моделей дозволяє прогнозувати швидкість просування вогневого вибою, а також визначати параметри розподілу температурного поля в породах покрівлі газифікованого вугільного пласта. Також наведено результати лабораторних досліджень, що покладено в основу встановлення збіжності отриманих результатів.

Четвертий розділ присвячений дослідженню параметрів оптимізації технології свердловинної підземної газифікації вугілля. Основну увагу приділено дослідженню формування активних зон підземного газогенератора та розробці підходів до керування технологічним процесом із урахуванням просування фронту вогневого вибою. Розкрито вплив температурного режиму на динаміку зміни активних зон та обґрунтовано його вирішальну роль у забезпеченні ефективності та стабільності процесу газифікації. Отримані результати створюють наукове підґрунтя для підвищення керованості й ефективності підземної газифікації.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи здійснено наукове обґрунтування параметрів технології утилізації вуглекислого газу в процесі підземної газифікації вугілля. Матеріали розділу відображають встановлення закономірностей зміни концентрації CO_2 у генераторному газі залежно від вмісту CO_2 у дуттьовій суміші, дослідження розподілу зон утилізації CO_2 навколо підземного газогенератора, що дало змогу визначити оптимальні просторові та термодинамічні умови для ефективного реалізації цієї технології.

Шостий розділ дисертаційної роботи висвітлює розроблені способи керування процесом підземної газифікації вугілля та утилізації вуглекислого газу з урахуванням встановлених показників їх економічної доцільності. Особливу увагу приділено практичним аспектам реалізації технології, зокрема різним варіантам підведення дуттьових сумішей. Розглянуто дві технологічні схеми: подачу дуття через експлуатаційну свердловину та подачу через керований трубопровід із фокусованою точкою введення дуття. У результаті проведених досліджень отримано дані, що демонструють залежність концентрації горючих

компонентів генераторного газу від обраного способу подачі дуттьової суміші, що підтверджено відповідними експериментальними результатами.

Зміст дисертаційної роботи відповідає її назві, а отримані наукові й практичні результати щодо технології газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого безумовно відносяться до спеціальності 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин.

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 64 наукових працях, у тому числі: 19 статей у журналах, що індексуються наукометричними базами даних Scopus і Web of Science Core Collection, з яких 5 відносяться до квантилів Q1, Q2; 7 статей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються наукометричними базами даних Scopus і WoS; 9 статей у періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України; 3 монографії, видані вітчизняними видавництвами; частина розділу монографії, видана міжнародним видавництвом; 10 патентів України на винаходи та корисні моделі; 15 тез доповідей у матеріалах всеукраїнських і міжнародних конференцій. Кількість наукових праць здобувача, у яких опубліковано результати роботи відповідає встановленим вимогам МОН України.

5. Значення роботи для науки та практики та суспільства

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей протікання термохімічних процесів газифікації вугілля та їхнього взаємозв'язку з параметрами утилізації CO₂ у складі дуттьової суміші та техногенному просторі підземного газогенератора, що в сукупності формує наукові основи ефективного впровадження технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу.

Практичне значення одержаних результатів у встановленні раціональних параметрів технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу, що покладено в розробку методик і рекомендації з ефективного керування процесами газифікації вугілля та утилізації вуглекислого газу: «Рекомендації з оптимізації режимів подачі дуттьових сумішей при газифікації вугілля», «Методика визначення параметрів формування порожнин вигазованого простору підземного газогенератора», «Методика прогнозу ефективності процесу газифікації вуглецевмісної сировини з утилізацією вуглекислого газу».

Очікуваний економічний ефект при впровадженні технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу (інноваційний варіант) дає змогу отримати дохід від реалізації генераторного газу від 76,15 до 152,30 млн грн. При газифікації вугільних пластів потужністю від 0,64 м гірниче підприємство починає отримувати дохід за утилізацію CO₂, і вже при потужності вугільних пластів від 0,8 до 1,2 м він становить 97,05 – 294,0 тис. грн з одного газогенератора.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

В результаті детального ознайомлення із дисертаційною роботою та зі звітом з перевірки запозичень встановлено, що порушень академічної доброчесності не було виявлено. При цитуванні інших вчених зроблено відповідні посилання.

7. Дискусійні положення та зауваження по роботі:

1. У першому розділі дисертаційної роботи п.1.3 здобувачем проведений детальний огляд досліджень з технології підземної газифікації вугілля. Автор роботи зазначає, що основними горючим газами є метан (CH_4), водень (H_2) та чадний газ (CO). Проте на рис. 1.7 наведено дані за газами H_2 та CO , а вже у п.1.4 відображені дані щодо зміни концентрації горючих газів та баластного (CO_2) у генераторному газі на основі аналізу результатів промислових та пілотних досліджень. Для більш наглядної картини щодо даних горючих газів та подальшої оцінки теплотворної здатності генераторного газу необхідно було б систематизувати зазначені вище показники.

2. Здобувачем розроблена методика дослідження зміни площі вигазованого простору при підземній газифікації вугілля, в основу якої закладено детальну графічну візуалізацію, що демонструє динаміку зміни фронту посування вогневого вибою за його координатами (x , y). Проте автором не достатньо розкрито механізм визначення положення вогневого від тривалості газифікації.

3. Автором роботи ро описано математичний алгоритм щодо визначення коефіцієнта β , що характеризує пропорційність між довжиною переміщення межі фазового переходу «вугілля – газ» від часу t газифікації. Разом з тим, у роботі не наведено значень відповідного коефіцієнта, які б характеризували швидкість просування вогневого вибою за умов змінної потужності вугільного пласта.

4. На рис. 4.13 та 4.14 наведено залежності зміни площі вигазованого простору та тиску подачі дуттьової суміші від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта за досліджуваними точками. Проте не зовсім є зрозумілим за яким принципом задавалися параметри відповідної вибірки.

5. На рис. 6.3 наведено дані щодо концентрації горючих генераторних газів впродовж проведення експериментів від способу подачі дуттьових сумішей. При тому не зазначено як змінюється концентрація вуглекислого газу в генераторному газі.

8. Загальний висновок щодо дисертаційної роботи

Вважаю, що наведені вище зауваження носять несуттєвий, уточнювальний характер та жодним чином не знижують загального рівня наукової та практичної цінності дисертаційної роботи, не впливають на її логічну цілісність, обґрунтованість висновків та високу позитивну оцінку дослідження в цілому. Робота є завершеним науково-дослідним дослідженням, її основні положення, рекомендації та висновки є науково-обґрунтованими, достовірними та актуальними як у теоретичному, так і практичному планах.

Дисертація відповідає пп.7 та 9 «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року

№1197, «Вимогам до оформлення дисертації», затвердженим наказом МОН України від 12.01. 2017 року №40.

За вирішення актуальною наукової проблеми щодо оптимізації процесів видобутку вугілля підземною газифікацією з попутною утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі, що ґрунтується на закономірностях зміни параметрів формування активних зон підземного газогенератора та утилізації вуглекислого газу, що в сукупності формує наукові основи ефективного впровадження технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу **Саїк Павло Богданович** заслуговує на присудження ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри цивільної безпеки
Луцького національного
технічного університету

Сергій ПОДКОПАЄВ



Відгук отриманий
5.05.2025



спецрада Д 08.080.03