

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

САЇК Павло Богданович



УДК 622.012.2:622.278.004.82

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ
ВУГІЛЛЯ З УТИЛІЗАЦІЄЮ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ**

Спеціальність 05.15.02 – Підземна розробка родовищ корисних копалин

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

Офіційні опоненти:

чл.-кор. НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (м. Дніпро)

**Круковський
Олександр
Петрович**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри цивільної безпеки Луцького національного технічного університету (м. Луцьк)

**Подкопась
Сергій
Вікторович**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гірничої справи Товариства з обмеженою відповідальністю «Технічний університет «Метінвест політехніка» (м. Запоріжжя)

**Сахно
Іван
Георгійович**

Захист відбудеться 16 травня 2025 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.03 із захисту дисертацій при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19).

Реферат розісланий 15 квітня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.03
кандидат технічних наук, доцент



М.В. Петльований

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вугілля залишається і в найближчій перспективі продовжуватиме бути одним з основних і стабільних джерел енергії. Сьогодні вугільна промисловість України стикається з серйозними викликами, зумовленими втратою продуктивних вугільних площ через воєнні дії, погіршенням гірничо-геологічних умов залягання вугільних пластів і використанням застарілого обладнання. Однією з ключових проблем, пов'язаних із видобутком вугілля, є значний негативний вплив на навколишнє середовище. Технології механізованого видобутку вугілля спричиняють серйозні екологічні проблеми, включно з деградацією земель, забрудненням водних ресурсів і атмосферного повітря, утворенням великих обсягів відходів тощо. Видобуток і подальша переробка вугілля пов'язана зі значними викидами парникових газів, зокрема, вуглекислого газу (CO₂). З огляду на актуальні глобальні виклики, пов'язані не тільки з кліматичними змінами та необхідністю скорочення викидів парникових газів, а й необхідністю перспективного освоєння вугільних ресурсів задля забезпечення енергонезалежності країни, важливим є розвиток і впровадження в життєвий цикл гірничодобувних підприємств «чистих вугільних технологій» (clean coal technology).

На території вугільних підприємств базою таких технологій може стати підземна газифікація вугілля з попутною утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі, що є важливим кроком у розвитку сталих та екологічно безпечних технологій у гірничодобувній галузі. Цей підхід має потенціал не тільки підвищити ефективність видобутку вугілля, а й суттєво зменшити негативний вплив гірничодобувної діяльності на навколишнє середовище. Впровадження підземної газифікації вугілля з попутною утилізацією вуглекислого газу сприятиме досягненню міжнародних кліматичних цілей, що передбачають скорочення викидів парникових газів для стримування глобального потепління. Використання таких технологій стане важливим інструментом, що сприятиме переходу до більш стійкої та екологічно чистої енергетики на базі вугільної промисловості, ґрунтуючись на принципах ефективності використання природних ресурсів і мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Тому актуальною науковою проблемою є оптимізація процесів видобутку вугілля підземною газифікацією з попутною утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі, які ґрунтуються на закономірностях зміни параметрів формування активних зон підземного газогенератора та утилізації вуглекислого газу і дають змогу сформувати єдину інтегровану систему керування процесом підземної газифікації вугілля, що може стати каталізатором для відновлення економічної активності, створення нових робочих місць та залучення інвестицій у розвиток гірничодобувних регіонів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» відповідно до плану найважливіших 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», № держреєстрації 0116U008041 (керівник); ГП-489 «Наукові основи формування

єдиної системи збереження та генерації енергії об'єктів паливно-енергетичного комплексу України», № держреєстрації 0117U001127 (основний виконавець); ГП-500 «Синтез, оптимізація та параметризація інноваційних технологій освоєння ресурсів газувугільних родовищ», № держреєстрації 0119U000248 (керівник); ГП-503 «Геотехнологічні основи формування енергохімічних комплексів вугледобувних регіонів», № держреєстрації 0120U102084 (відповідальний виконавець); ГП-511 «Науково-практичні засади структурних трансформацій вугледобувних підприємств на основі інноваційних технологій раціонального природокористування», № держреєстрації 0122U001301 (керівник); ГП-512 «Когазифікація вуглецевмісної сировини при вигазовуванні надтонких вугільних пластів з орієнтацією на отримання водню», № держреєстрації 0123U100985 (відповідальний виконавець); ГП-515 «Обґрунтування технологічних рішень екологічнобезпечного освоєння мінеральних ресурсів в умовах відбудови країни у воєнний і післявоєнний періоди, № держреєстрації 0123U101759 (основний виконавець), ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля», № держреєстрації 0123U101757 (відповідальний виконавець). За результатами роботи укладено Ліцензійний договір № 12 ПЛ від 25.11.2024 р. 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).

Мета роботи – розробка наукових основ керування процесом підземної газифікації вугілля шляхом формування активних зон підземного газогенератора в гірському масиві у взаємозв'язку з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі.

Поставлену мету реалізовано розв'язанням таких основних наукових завдань дослідження:

1. Проаналізовано тенденції розвитку вугледобувних підприємств України з урахуванням світового науково-практичного досвіду впровадження «чистих вугільних технологій» та їх адаптації на принципах кліматичної нейтральності.

2. Розроблено методику лабораторних випробувань зразків гірських порід під впливом змінного температурного поля в динамічному режимі.

3. Сформовано методологічні основи дослідження процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі.

4. Розроблено математичну модель теплообміну середовища в системі «вугілля – генераторний газ» при підземній газифікації вугілля з урахуванням меж фазових переходів.

5. Встановлено залежності взаємозв'язку параметрів формування активних зон підземного газогенератора для підвищення ефективності процесу газифікації вугілля.

6. Обґрунтовано параметри технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу в окислювальній зоні газогенератора способом активації процесу газифікації та комбінуванням складу дуттьової суміші.

7. Розроблено технологію ведення процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі.

8. Встановлено техніко-економічні показники технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу.

Ідея роботи полягає у використанні виявлених нових закономірностей зміни параметрів активних зон підземного газогенератора для оптимізації теплових, газодинамічних та фізико-хімічних процесів у гірському масиві, що забезпечує ефективну утилізацію вуглекислого газу в техногенному середовищі та енергоефективність процесу й формує засади нової науково-обґрунтованої концепції керування процесом підземної газифікації вугілля.

Об'єкт дослідження – термохімічні процеси підземної газифікації вугілля у гірському масиві як комплекс фізико-хімічних, теплових і масообмінних явищ в активних зонах підземного газогенератора, включно з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі.

Предмет дослідження – закономірності зміни параметрів активних зон підземного газогенератора та параметрів утилізації вуглекислого газу, що забезпечують ефективне керування процесом підземної газифікації вугілля.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у роботі було використано комплексний метод досліджень: аналіз та узагальнення світового й вітчизняного досвіду у галузі видобутку запасів вугілля, досліджень у галузі термохімічного перетворення вугілля та утилізації вуглекислого газу; аналітичні методи досліджень при інтегруванні диференціальних рівнянь теплопровідності з урахуванням умов Стефана на межі фазового переходу середовища «вугілля – генераторний газ»; лабораторні методи досліджень, що охоплюють добір, підготовку та дослідження відібраних зразків гірського масиву для дослідження параметрів розповсюдження температурного поля в них і визначення міцнісних характеристик на випробувальному пресі типу KL 200/CE-Tecnotest; рентгенівський дифракційний метод аналізу (XRD) для оцінки кристалічності та структури зразків гірської породи; лабораторні дослідження процесу підземної газифікації вугілля та подальшої утилізації вуглекислого газу; аналітичні та лабораторні дослідження параметрів формування вигазованого простору підземного газогенератора і механізмів зрушення гірського масиву. Дослідження проводилися на авторських запатентованих установках UA №112375, UA №148572, UA №156789.

Наукові положення, що виносяться на захист:

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

зможу 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, направлено 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:

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 (CO₂ – 22,3%) від потужності вугільного пласта та критичних показників CO₂ 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 і 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.

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 отриманих результатів:

1. Розроблено методику з визначення довжини переміщення межі фазового переходу середовища «вугілля – генераторний газ», що характеризує зміну температури вогневого вибою за довжиною зони газифікації від тривалості цього процесу.

2. Розроблено методику дослідження процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу у складі дуттьової суміші.

3. Розроблено методику дослідження зміни міцнісних характеристик гірського масиву навколо підземного газогенератора від параметрів температури за зонами хімічних реакцій у вогневому вибої.

4. Розроблено рекомендації з оптимізації режимів подачі дуттьових сумішей при газифікації вугілля.

5. Розроблено методику прогнозу ефективності процесу газифікації вуглецевмісної сировини з утилізацією вуглекислого газу.

6. Розроблено методику визначення параметрів формування порожнин вигазованого простору підземного газогенератора.

7. Обґрунтовано параметри керування процесом підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу у складі дуттьової суміші.

8. Обґрунтовано параметри технології утилізації вуглекислого газу в техногенному просторі підземного газогенератора.

9. Розроблено технологію утилізації вуглекислого газу при підземній газифікації вугілля, яка захищена патентами України.

10. Розроблено онлайн-інструментарій з дослідження процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи упродовж 2016 – 2025 рр. були впроваджені у навчальні програми підготовки бакалаврів та магістрів з дисциплін: «Механіка гірських порід», «Гірнична інженерія»,

«Моделювання геомеханічних систем у задачах підземного видобутку корисних копалин» у НТУ «Дніпровська політехніка». Розроблено методики і рекомендації з ефективного керування процесами газифікації вугілля та утилізації вуглекислого газу: «Рекомендації з оптимізації режимів подачі дуттьових сумішей при газифікації вугілля» (ТОВ «ЗАХІД ТРЕЙД РЕСУРС»), «Методика визначення параметрів формування порожнин вигазованого простору підземного газогенератора» (ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»), «Методика прогнозу ефективності процесу газифікації вуглецевмісної сировини з утилізацією вуглекислого газу» (ТОВ «ГОФЕР УКРАЇНА»). 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.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні проблеми, мети, ідеї, завдань досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій щодо їх практичної реалізації; особисто проведено аналіз тенденцій видобутку вугілля та його впливу на навколишнє середовище; узагальнено дослідження та досвід трансформації вугільних шахт на базі технологій підземної газифікації вугілля; оцінено аспекти сталого розвитку вугледобувних регіонів на основі досягнення принципів кліматичної нейтральності; розроблено методику дослідження процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу у складі дуттьової суміші; розроблено методику дослідження зміни міцнісних характеристик гірського масиву навколо підземного газогенератора від параметрів температури за зонами хімічних реакцій у вогневому вибої; отримано залежності зміни якісного складу генераторного газу від способів та типів подачі дуттьової суміші; обґрунтовано параметри керування процесом підземної газифікації вугілля з попутною утилізацією вуглекислого газу. Автор безпосередньо брав участь у проведенні експериментальних досліджень, апробації та впровадженні результатів роботи. Текст дисертації викладено автором особисто.

Апробація результатів роботи. Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та висвітлені на міжнародних науково-технічних конференціях: «Українська школа гірничої інженерії» (Бердянськ, 2018 – 2021; Східниця, 2023 – 2025); Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Наукова весна» (Дніпро, 2021 – 2024); «Information society: Technological, economic and technical aspects of formation» (Тернопіль, Україна – Ополь, Польща, 2024); «Distance education as the main problem of young people» (Мадрид, Іспанія, 2023); «Multidisciplinary academic research, innovation and results» (Прага, Чехія, 2022); «Український гірничий форум» (Дніпро, 2020); «Physical & chemical geotechnologies» (Дніпро, 2019); «Innovative development of mining industry» (Кривий Ріг, 2017); «Газогідратні технології у гірництві, нафтогазовій справі, геотехніці та енергетиці» (Дніпро, 2016).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані 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 кватилів 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.

Структура й обсяг роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми досліджень, розглянуто зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету, ідею та завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено основні наукові положення, наукову новизну та значення отриманих результатів, наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів і структуру роботи.

Перший розділ дисертації присвячено розгляду питань огляду глобальних трендів у видобутку вугілля, аналізу ефективності функціонування вугільної промисловості України та особливостям її трансформації на базі технології підземної газифікації з урахуванням принципів кліматичної нейтральності гірничодобувних регіонів.

Сьогодні у світі спостерігається зміна тенденцій у вугільній промисловості, яка відображає зменшення значущості цього традиційного джерела енергії на тлі глобальних декарбонізаційних ініціатив в енергетичних системах. З одного боку, розвинені країни активно зменшують використання вугілля через значний вуглецевий вплив, замінюючи його на більш чисті, альтернативні джерела енергії. З іншого боку, у країнах, що розвиваються, все ще спостерігається зростання споживання вугілля, що зумовлено економічними та енергетичними потребами.

На сьогодні паливно-енергетичний комплекс України зіткнувся з беспрецедентною кризою, пов'язаною з війною в Україні. Цей сектор стикається не лише з фізичною руйнацією інфраструктури, а й з величезними викликами у забезпеченні надійності енергопостачання населення та промислових об'єктів. Для України пошук стабільного та надійного джерела отримання енергоресурсів є одним із першочергових завдань, розв'язання яких також визначає її політичний та економічний розвиток. Сьогодні складна ситуація, що виникла навколо паливно-енергетичного сектору України, зокрема, гірничодобувної промисловості, спонукає до пошуку кардинально нових технологій отримання енергоресурсів. Варто зазначити, що цей акцент не завжди робиться на користь традиційної енергетики. Багаторічні тенденції розвитку нашої економіки, коли значна частка енергетичних джерел експортувалася з-за кордону, виявилася абсолютно хибною. Відповідно, наразі здійснюється переорієнтація на інші

екологічно чисті технології отримання енергії, які можуть бути створені в достатній кількості незалежно від експортної продукції. При цьому, все частіше пропонується проводити поєднання декількох технологій видобутку в межах одного гірничодобувного підприємства. Такі удосконалення спрямовані на максимальне вилучення корисних копалин із надр, причому, виконується це на економічно доцільному рівні та з урахуванням екологічних компонентів відновлення постгірничих територій.

Специфіка гірничо-геологічних, гірничотехнічних та гідрогеологічних умов залягання вугільних пластів вимагає використання альтернативних технологій для ефективного відпрацювання цих ресурсів. Однією з перспективних технологій є підземна газифікація вугілля.

Підземна газифікація вугілля може стати альтернативою традиційній технології видобутку вугілля, забезпечуючи більш повне відновлення енергії шляхом перетворення твердого палива у газоподібні та рідкі вуглеводні. Тому науково-практичні рекомендації щодо формування геореакторних систем у підземному просторі вугільних шахт, залежно від потенціалу підприємств і територіального розміщення, дають змогу обґрунтувати раціональні енергоефективні параметри традиційних та альтернативних вугільних технологій у сталому й взаємопов'язаному системному контексті. Це передбачає удосконалення наявних методів та переформатування підходів до використання вугільних ресурсів з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Вагомий внесок із провадження та дослідження технологій термохімічної деструкції твердого палива зробили як вітчизняні науковці, такі як: Бондаренко В.І., Брик Д.В., Гайко Г.І., Дичковський Р.О., Колоколов О.В., Інкін О.В., Садовенко І.О., Стефанік Ю.В., Табаченко М.М., Фальштинський В.С., Храмов В.М., так і закордонні – Perkins G, Stańczyk K., Kapusta K., Liang J., Liu S., Xin L., Chen, Y. Kačur J., Yang L. та багато інших. Ними було вивчено термодинамічні та теплофізичні явища при термічній деструкції твердого палива, встановлено критерії придатності вугільних пластів, обґрунтовано параметри геомеханічних моделей, розроблено нові та вдосконалено наявні технології та технологічні схеми газифікації вугілля. Однак невирішеними залишаються питання ефективності керування процесами газифікації у взаємозв'язку з формуванням активних зон вогневого вибою підземного газогенератора та утилізації баластного газу, зокрема вуглекислого, що зумовлює проведення досліджень. Також необхідно звертати увагу на дотримання міжнародних норм і стандартів зі зниження викидів вуглекислого газу, що відповідає загальносвітовій концепції екологічної безпеки та сталого розвитку, щоб технологія підземної газифікації відповідала принципам “clean coal technology”. Це зумовлює проведення подальших досліджень з метою оптимізації технологій та методів керування процесом газифікації для забезпечення екологічної стійкості процесу.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено обґрунтуванню методик та методів дослідження технології підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу. Значну увагу приділено авторським лабораторним установкам, що дають змогу відтворити як процес підземної газифікації вугілля, так і утилізації вуглекислого газу. Узагальнену принципову схему наведено на рис. 1.

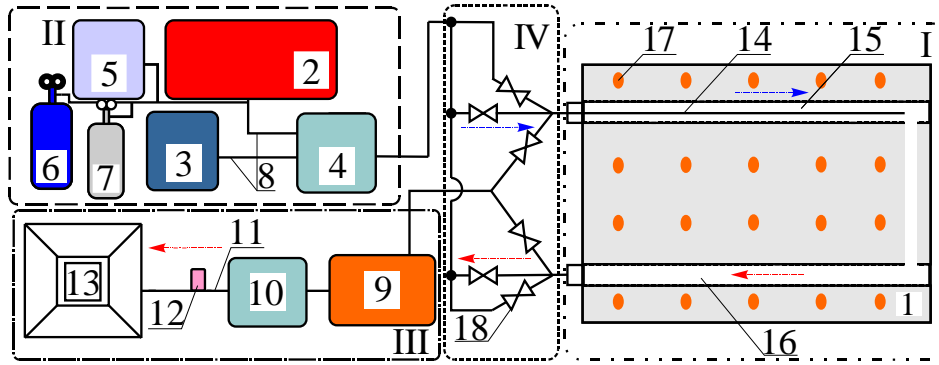


Рисунок 1 – Технологічна схема установки з дослідження процесів газифікації: 1 – стенд; 2 – основний компресор; 3 – допоміжний компресор; 4, 10 – витратоміри; 5 – парогенератор; 6, 7 – балони з киснем та вуглекислим газом відповідно; 8 – дуттьова магістраль; 9 – бак-охолоджувач; 11 – газовідвідна магістраль; 12 – точка відбору газів; 13 – димосос; 14 – керований трубопровід; 15 – дуттьова свердловина; 16 – газовідвідна свердловина; 17 – термопары; 18 – засувки

Складовими елементами кожної установки є: стенд для дослідження I, гілки подачі дуттьових II та відведення газовідвідних III сумішей, системи керування дуттьовими потоками IV. Стенд для газифікації I є центральним елементом лабораторної установки, призначений для відтворення гірничо-геологічних умов, характерних для залягання вугільних пластів. Конструкцію установки розроблено таким чином, що вона забезпечує можливість керування процесом газифікації шляхом контролю подачі дуттьових сумішей і відведення генераторних газів.

Необхідно зазначити, що підземна газифікація вугілля – це високотемпературний процес, який характеризується зміною градієнтів температури в гірському масиві навколо підземного газогенератора. Відомо, що фізико-механічні властивості більшості гірських порід, включно зі слабометаморфізованими породами Західного Донбасу та Львівсько-Волинського басейну, значно залежать від температурних умов. Зміни температури в гірських масивах можуть призвести до змін у структурі порід, впливаючи на їх міцність, еластичність та інші механічні характеристики. Такі температурні варіації викликають нерівномірний розподіл цих властивостей у масиві, що може стати причиною локальних руйнувань, обвалів чи інших геомеханічних процесів.

Дослідження зміни фізико-механічних властивостей гірського масиву було здійснено шляхом нагрівання відібраних проб гірської породи (шахта «Межирічанська» ДП «Львіввугілля», шахта ім. Героїв Космосу ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»). Такий підхід дав змогу вивчати вплив температури на гірську породу в умовах, максимально наближених до природних, що є критично важливим для оцінки реального теплового впливу на структурну цілісність та механічну поведінку порід у процесі підземної газифікації вугілля. Зразки було поділено на п'ять груп відповідно до заданих температурних режимів: 22 °С, 200 °С, 400 °С, 600 °С та 800 °С. Для термічної обробки кожену групу зразків розміщували в муфельній печі, де вони прогрівалися до відповідної температури. Після досягнення необхідного температурного режиму піч вимикали, даючи змогу зразкам охолоджуватися природним шляхом. Це мінімізувало вплив перепаду

температур на стан зразків. Після охолодження зразки витягали з печі і розміщували в герметичні пакети для зберігання, що запобігало впливу вологи та інших атмосферних факторів на властивості породи.

Контрольна температура в 22 °С відповідала стандартним лабораторним умовам і була базовою для порівняння змін у фізико-механічних властивостях порід після нагрівання до вищих температур. Проведення досліджень зміни міцнісних характеристик гірського масиву здійснювалося на випробувальному пресі типу KL 200/CE-Tecnotest. Після завершення випробувань на міцність, мінералогічний склад зразків гірської породи було детально проаналізовано за допомогою рентгеноструктурного аналізу на високоточному рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3, що дало змогу ідентифікувати кристалічні фази в складі породи та виявити будь-які зміни, спричинені термічною обробкою. Після рентгеноструктурного дослідження для кожної з проб було проведено розрахунки основних параметрів кристалічних структур, а саме – визначення розмірів елементарних комірок ґратки кварцу та каолініту. Ці дані надали важливу інформацію про внутрішню структуру мінералу та її вплив на його фізико-механічні властивості. Крім того, було оцінено щільність дислокацій у кристалічних ґратках кварцу та каолініту, яка є важливим показником їхньої дефектності та механічної стабільності.

Необхідно зазначити, що у процесі підземної газифікації вугілля, високотемпературна зона, що виникає у вогневому вибої, поширюється в радіальному напрямку в породи покрівлі та підшви. Це розповсюдження тепла є критичним фактором, який впливає на структурну стійкість гірського масиву порід і на ефективність процесу газифікації. Для цього виду досліджень було розроблено спеціальний лабораторний стенд, що дає змогу імітувати вплив температури вогневого вибою на гірський масив. Під час процесу нагрівання та випробувань температура зразків фіксувалася за допомогою високоточного пірометра, який дає змогу здійснювати безконтактні вимірювання температур на відстані. Отримані результати в процесі лабораторних досліджень далі піддавалися аналізу та порівнянню з даними, отриманими за допомогою чисельного моделювання. Цей етап співставлення критично важливий для валідації та калібрування чисельних моделей, які використовуються для імітації впливу різних умов на міцнісні характеристики гірських порід.

При цьому, залежно від міцності порід і швидкості посування вогневого вибою, що є змінними по зонах хімічних реакцій, формується вигазований простір підземного газогенератора, який характеризується як спільними, так і відмінними геометричними параметрами від потужності вугільного пласта, що газифікується. Параметри формування вигазованого простору досліджувалися лабораторним шляхом на основі встановлення переміщення лінії вогневого вибою від тривалості процесу газифікації та параметрів опускань порід покрівлі підземного газогенератора за допомогою закладених реперних датчиків. Після збору даних про максимальні значення опускань порід покрівлі, зібраних упродовж періоду процесу газифікації, проводилась детальна графічна візуалізація, що демонструвала динаміку зміни фронту посування вогневого вибою. Це дало змогу точно відстежувати зони, де відбувається обвалення порід,

та оцінити структурні зміни порід покрівлі в реальному часі. Загалом, в ході комплексного дослідження процесів підземної газифікації вугілля, було створено двовимірні моделі руху вогневого вибою, які ілюстрували динаміку його просування та зони обвалення гірського масиву (рис. 2).

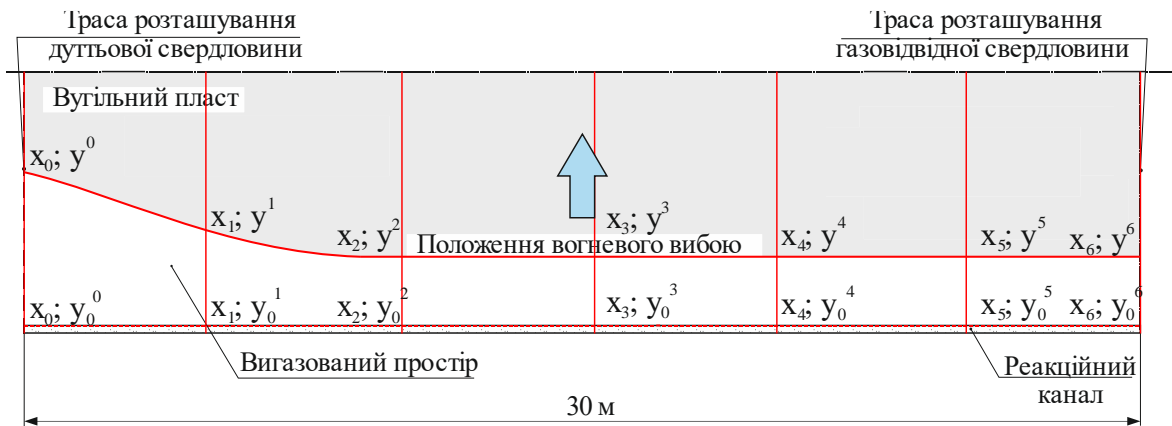


Рисунок 2 – Схема просування фронту вогневого вибою та формування вигазованого простору

Під час проведення наукових досліджень фіксувались дані про зміни концентрації горючих газів у складі генераторного газу, а також тиск подачі дуттьової суміші. Аналіз цих даних виявив, що зі збільшенням величини вигазованого простору значно зросла потреба в коригуванні параметрів подачі дуттьової суміші, щоб забезпечити оптимальне співвідношення дуттьової суміші для ефективного процесу підземної газифікації та підтримання сталості хімічних реакцій у вогневому вибої. Підвищення тиску подачі дуття було визначено як критичну контрольну точку для фіксації змін величини вигазованого простору підземного газогенератора.

У третьому розділі наведено результати розробки математичних моделей теплообміну в площині вогневого вибою підземного газогенератора та прогріву гірського масиву при підземній газифікації вугілля, застосування яких дає змогу спрогнозувати швидкість просування вогневого вибою та параметри розподілу температурного поля в породах покрівлі вугільного пласта, що газифікується.

Моделювання процесу теплообміну супроводжується зміною агрегатного стану середовища підземного газогенератора. Зазначимо, що фізичні властивості середовища при переході через межу фазових перетворень (у нашому випадку це теплопровідність) змінюються стрибкоподібно. Такі зміни унеможливають застосування класичних моделей теплообміну з постійними коефіцієнтами, що вимагає використання нелінійних термодинамічних моделей, здатних враховувати температурну залежність властивостей гірських порід та ефекти фазових переходів. Основною характеристикою фазових перетворень під час газифікації вугілля є температура, за якої фази перебувають у стані термодинамічної рівноваги (точка фазового переходу). Для фазових переходів першого роду характерно, що в точці фазового переходу спостерігається виділення або поглинання тепла та зміна об'єму. У загальному вигляді рухому межу фазового переходу «вугілля – генераторний газ» $S(t)$ наведено на рис. 3.

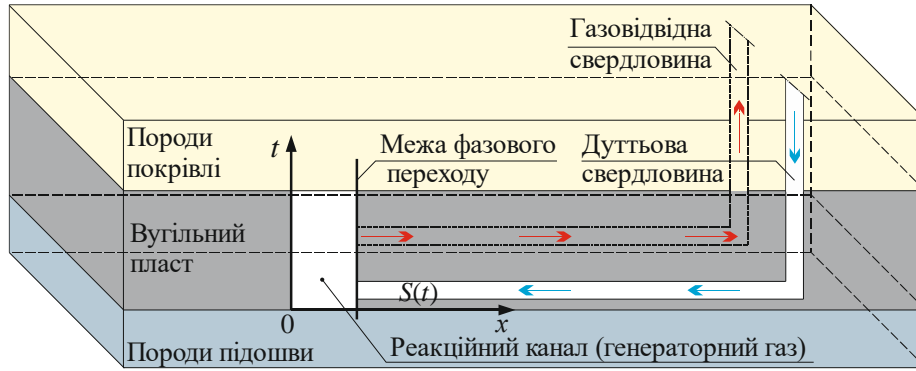


Рисунок 3 – Схема межі $S(t)$ поділу фаз («вугілля – генераторний газ»)

Відповідно до наведеної схеми на рис. 3 зроблено припущення, що вугілля займає напівпростір $x > 0$. При $t < 0$ температура вугілля однакова і дорівнює $T_0 < T_2$, де T_2 – температура газифікації вугілля. При $t = 0$ та $x = 0$ підтримується постійна температура $T_p \geq T_2$. У цьому випадку при $t > 0$ та $x \approx 0$ виникає вигазований простір, величина якого $S(t)$ з часом збільшується.

Межа фазового переходу $x = S(t)$ у будь-який момент часу відокремлює вугілля від продуктів згорання, рухаючись із деякою швидкістю $v = dS/dt$ у напрямку вугільного пласта. З умови задачі $S(0) = 0$. Припускаючи, що властивості середовища при фазовому переході змінюються стрибком, рівняння теплопровідності для двох фаз приймають вигляд:

$$\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < x < S(t); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (2)$$

де $T_1(x, t)$, $T_2(x, t)$ – температура газу і вугілля відповідно; $a_i = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коефіцієнт температуропровідності; γ_i – щільність середовища; λ_i – коефіцієнт теплопровідності; c_i – питома теплоємність; $i - 1$ – величини, що відносяться до газу, а $i - 2$ – до вугілля.

Повертаючись до змінних x, t рішення рівнянь (1) і (2) запишуться у вигляді:

$$T_1(x,t) = A_1 + B_1 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\alpha_1\sqrt{t}}\right); \quad (3)$$

$$T_2(x,t) = A_2 + B_2 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\alpha_2\sqrt{t}}\right), \quad (4)$$

де $\alpha_1 = \sqrt{a_1}$.

З граничних умов (3) і (4), з урахуванням $\operatorname{erf}(0) = 0$, $\operatorname{erf}(\infty) = 1$, отримуємо:

$$A_1 = T_p; \quad (5)$$

$$A_1 + B_2 = T_0. \quad (6)$$

З умови $T_1(x, t)|_{x=S-0} = T_2(x, t)|_{x=S+0} = T_2$ на межі фазового переходу маємо:

$$A_1 + B_1 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S(t)}{2\alpha_1\sqrt{t}}\right) = T_2; \quad (7)$$

$$A_2 + B_2 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S(t)}{2\alpha_2\sqrt{t}}\right) = T_2. \quad (8)$$

Кожна з цих умов (7) і (8) може бути виконана для будь-якого $t > 0$ лише в тому випадку, якщо аргумент функції $\operatorname{erf}(x)$ в цих рівняннях не залежить від часу. Але це можливо, якщо $S(t) = \beta \cdot \sqrt{t}$, де β – невідома стала.

Таким чином, з точністю до деякої константи β , визначено закон руху $S(t)$ межі фазового переходу:

$$S(t) = \beta \cdot \sqrt{t}. \quad (9)$$

Звідси корені β трансцендентного рівняння

$$F(\beta) = \frac{\exp\left[-\left(\frac{\beta}{2\alpha_1}\right)^2\right] \lambda_1(T_2 - T_p)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\beta}{2\alpha_1}\right) \cdot \alpha_1} - \frac{\exp\left[-\left(\frac{\beta}{2\alpha_2}\right)^2\right] \lambda_2(T_2 - T_0)}{\left(\operatorname{erf}\left(\frac{\beta}{2\alpha_2}\right) - 1\right) \cdot \alpha_2} - \sqrt{\pi} \gamma_2 \frac{Q\beta}{2} = 0$$

знаходяться методом Ньютона-Рафсона, який має квадратичну збіжність. Послідовні наближення за методом Ньютона-Рафсона обчислюються за формулою: $\beta_{n+1} = \beta_n - \frac{F(\beta_n)}{dF(\beta_n)}$.

На рис. 4 наведено залежність зміни температурного поля в середовищі «вугілля – генераторний газ». Тривалість ведення процесу газифікації $t = 0 - 100$ год. При цьому межа фазового переходу $S(100) = 0,0624$. Аналіз залежності, наведеної на рис. 4а, вказує, що температурне поле в середовищі «вугілля – газ» змінюється лінійно з одним кутом нахилу до межі фазового переходу і з іншим кутом нахилу після, що відповідає умовам Стефана. При цьому межа фаз середовища «вугілля – генераторний газ» описується гілкою параболи від тривалості газифікації (рис. 4б). Параболічний характер цієї залежності підкреслює важливість таких змінних, як температурний режим, інтенсивність хімічних реакцій і фізико-хімічні властивості вугілля.

Адаптація розробленої математичної моделі проводилась шляхом встановлення залежності зміни температури вздовж довжини стовпа газифікації (рис. 5), що дало змогу не лише відстежити напрямок переміщення вогневого вибою, а й підтвердити його відповідність заданим параметрам технологічного процесу (температурний режим зон хімічних реакцій, швидкість посування вогневого вибою).

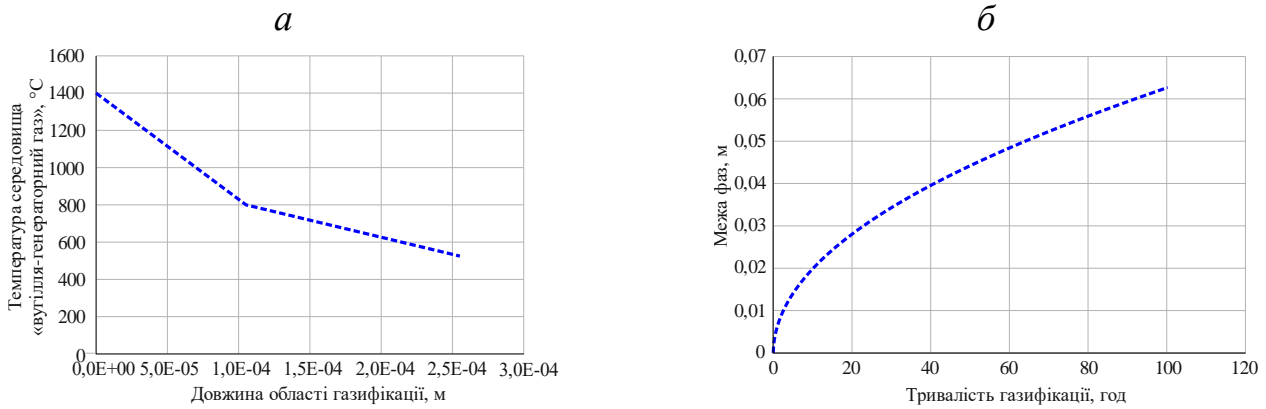


Рисунок 4 – Залежність зміни температури середовища «вугілля – генераторний газ» від довжини зони газифікації (а) та залежність зміни межі фазового переходу від тривалості газифікації (б)

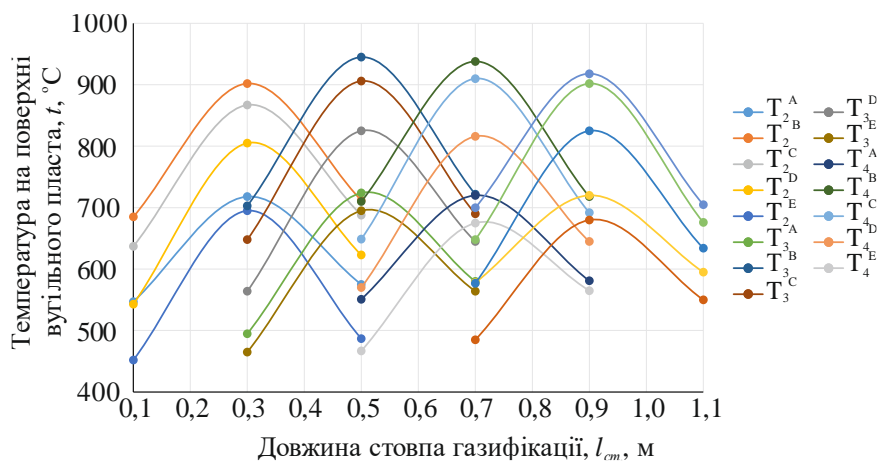


Рисунок 5 – Циклічність зміни температур у вугільному пласті за довжиною стовпа газифікації: $T_2^A - T_4^E$ – номери термопар

Згідно з проведеними дослідженнями, через 30 хв тривалості експерименту температура на першому ряді термопар ($T_1^A - T_1^E$) підвищилась до 110 – 150 °С. Це свідчить про рух вогневого вибою у напрямку другого ряду термопар $T_2^A - T_2^E$. Максимум температур на другому ряді термопар спостерігався на 2,4 годину газифікації і становив 695 – 902 °С. Звідси можна стверджувати, що швидкість руху вогневого вибою становила 0,083 м/год. Аналогічна ситуація щодо зміни швидкості руху вогневого вибою спостерігалась при дослідженні максимуму температур за третім ($T_3^A - T_3^E$) та четвертим рядом термопар ($T_4^A - T_4^E$). Збіжність між результати чисельного моделювання та лабораторними дослідженнями становить 78 – 84 %.

Необхідно зазначити, що змінні параметри формування температурного поля на поверхні вугільного пласта нерівномірно розподіляються у породах покрівлі підземного газогенератора. Тому розробка чисельної моделі передбачає врахування прийнятих припущень, за яких математична задача визначення температурного поля $T(x, y, t)$ полягає в інтегруванні диференціального рівняння теплопровідності, що описує розподіл температур у просторових координатах x, y та часі $t \in \{(x, y, t) | y \in (0, l), x \in (0, l), t \in (0, \infty)\}$ у:

$$c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right); \quad (10)$$

– з початковою умовою:

$$T(x, y, 0) = T_0; \quad (11)$$

– з граничними умовами:

$$T(x, y, 0) = T_1; \quad (12)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right|_{y=l} = 0; \quad (13)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha \cdot (T(0, y, t) - T_2); \quad (14)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right|_{x=l} = \alpha \cdot (T(l, y, t) - T_2), \quad (15)$$

де $T(x, y, t)$ – температура тіла; (x, y) – декартові координати; t – час; γ – щільність матеріалу; c – питома теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; α – коефіцієнт тепловіддачі; l – довжина сторони тіла; T_0 – початкова температура тіла; T_1 – температура нагріву тіла; T_2 – температура середовища; $T_1 > T_2 > T_0$.

На рис. 6 наведено результати чисельного моделювання розповсюдження температурного поля $\theta = \frac{T(X, Y, t) - T_0}{T_1 - T_0}$ від тривалості нагріву досліджуваних зразків гірської породи на прикладі алевроліту.

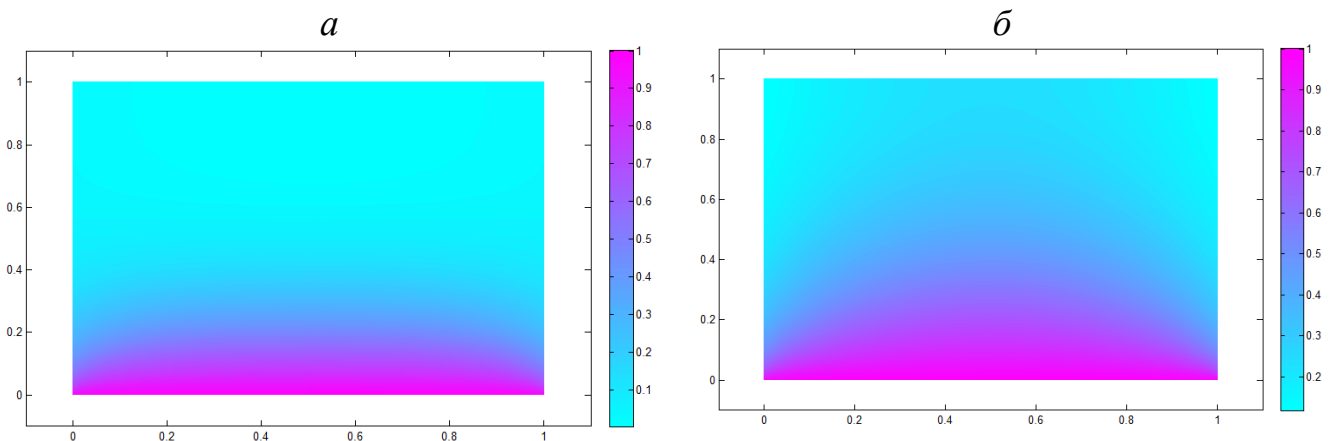


Рисунок 6 – Візуалізація зміни температурного поля у відносних одиницях від тривалості нагріву досліджуваного зразка: (а) – $F_0 = 0,04$ (100 с); (б) – $F_0 = 0,4$ (1000 с)

Порівняння розподілу градієнтів температури дає змогу визначити, яким чином змінюється температурне поле з часом і які ділянки зразка найбільше реагують на зміну температурного режиму. Водночас поступове підвищення температури гірської породи (вісь x) детально моделює процес зміни температури

на межі середовища між безпосередньою покрівлею та зоною вогневого вибою, а розроблена чисельна модель є основою для подальшого аналізу зміни температурного поля в гірському масиві під час газифікації вугілля, зміна якого покладена в основу дослідження фізико-механічних характеристик гірського масиву, що характеризує параметри формування вигазованого простору підземного газогенератора. Збіжність між лабораторними дослідженням та чисельним моделюванням щодо розподілу температурного поля навколо підземного газогенератора становить 83 – 92 %.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено оптимізації параметрів технології свердловинної підземної газифікації вугілля. Основна увага зосереджена на дослідженні параметрів формування активних зон підземного газогенератора та на керуванні параметрами технології з урахуванням фронту посування вогневого вибою.

Знання про динаміку зміни формування активних зон підземного газогенератора є надзвичайно важливими в ракурсі розв'язання низки ключових питань, пов'язаних з керуванням та оптимізацією процесу газифікації вугілля. Необхідно зазначити, що на зазначену динаміку, насамперед, впливає температурний режим підземного газогенератора.

Дослідження параметрів розповсюдження температурного поля виконувалось у визначених точках змодельованої області, де були встановлені стаціонарні температурні датчики типу ТЕП-109, які закладались у площині вугільного пласта, безпосередній та основній покрівлі з метою забезпечення точного моніторингу температурного поля в зоні вогневого вибою та у зоні взаємодії вогневого вибою газогенератора з гірським масивом. Формування активних зон і теплова інтенсифікація реакційного каналу моделі газогенератора забезпечувалися реверсом подачі дуття з дуттьової і газовідвідної свердловин. Вогневий вибій знаходився в температурному діапазоні 695 – 1004 °С. Середній тиск подачі дуттьової суміші становив 0,24 МПа. Це дало змогу сформувати окислювальну, перехідну та відновлювальну зони газогенератора за довжиною вогневого вибою.

Окислювальна зона (0 – 9 м) характеризується інтенсивним окисненням вуглецю (С) у присутності кисню (O₂): $C + O_2 \rightarrow CO_2 + q$. Ця реакція екзотермічна і супроводжується виділенням значної кількості тепла, яке забезпечує подальше протікання процесів у газогенераторі. Градієнт температури в цій зоні становить близько 25 – 50 °С на метр, що пояснюється концентрацією тепловиділяючих реакцій на невеликій довжині. Відновлювальна зона (9 – 30 м) характеризується ендотермічними реакціями відновлення, за яких відбувається поглинання теплоти: $C + H_2O \rightarrow CO + H_2 - q$; $C + CO_2 \rightarrow 2CO - q$. Температурний градієнт у цій зоні менш інтенсивний і становить 15 – 20 °С на метр, що пояснюється поступовим зменшенням інтенсивності реакцій через нестачу реагентів дуття. Перехід між окислювальною та відновлювальною зонами є критичним для забезпечення ефективності процесу газифікації. У цьому інтервалі, зазвичай на довжині 9 – 11 м вогневого вибою, спостерігається максимальний тепловий вплив на гірський масив, що може спричинити його термічне руйнування та утворення тріщин.

Аналіз температурного поля при дослідженні процесів газифікації вказує на формування чіткої зональності в температурних режимах. Максимум температури спостерігається зі сторони дуттьової свердловини. Це зумовлюється інтенсивністю хімічних реакцій, які безпосередньо залежать від кількості та інтенсивності підведення дуття до реакційної поверхні вугільного пласта. В окислювальній зоні газогенератора, яка знаходиться зі сторони дуттьової свердловини, проходить випередження лінії вогневого вибою.

При газифікації вугільного пласта потужністю 0,6 м середнє випередження окислювальної зони відносно відновлювальної на кінець першої доби газифікації становить 1,34 м. Біля устя експлуатаційних свердловин (дуттьової та газовідвідної) цей показник сягає 1,45 м. До завершення другої доби газифікації величина випередження окислювальної зони збільшується до 5,9 м, а її довжина становить 10,8 м (рис. 7а). Рівень концентрації горючих газів почав різко знижуватися і становив 29,35%. Необхідно зазначити, що концентрація газів почала знижуватися вже з 42 години газифікації. Таким чином, враховуючи параметри виходу горючих газів та тривалість процесу газифікації вугільного пласта потужністю 0,6 м, визначено, що оптимальні параметри довжини окислювальної зони становлять 9,0 – 10,35 м. Стабільні показники виходу горючих генераторних газів були на рівні 34,72 – 34,82%.

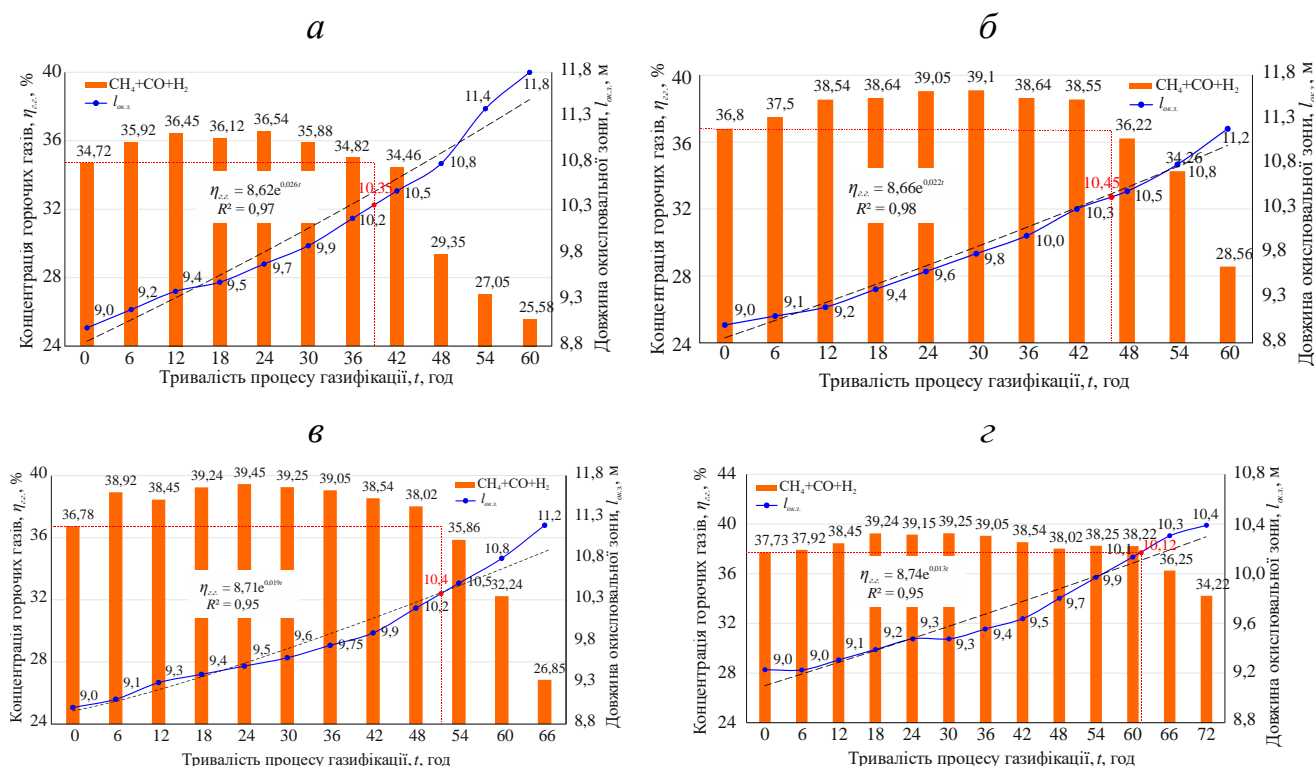


Рисунок 7 – Дані щодо концентрації горючих газів $\eta_{г.г.}$ та довжини окислювальної зони $l_{ок.з.}$ від часу газифікації t за потужності вугільного пласта: (а) – 0,6 м; (б) – 0,8 м; (в) – 1,0 м; (г) – 1,2 м

Аналогічна картина збільшення довжини окислювальної зони підземного газогенератора спостерігається під час газифікації вугільного пласта потужністю 0,8 м (рис. 7б). Однак, суттєва відмінність полягає в часових характеристиках

процесу, зокрема, в моменті переходу підземного газогенератора до режиму зниження концентрації горючих газів. На початкових етапах газифікації збільшення довжини окислювальної зони відбувається поступово, що сприяє стабільному утворенню горючих газів із високим рівнем концентрації (38,54 – 39,1%). У порівнянні з більш потужнішими вугільними пластами $> 0,8$ м швидкість прогріву та формування зон хімічних реакцій вища, що прискорює перехід процесу до стадії інтенсивного виділення горючих компонентів. Оптимальні параметри довжини окислювальної зони становлять 9,0 – 10,45 м.

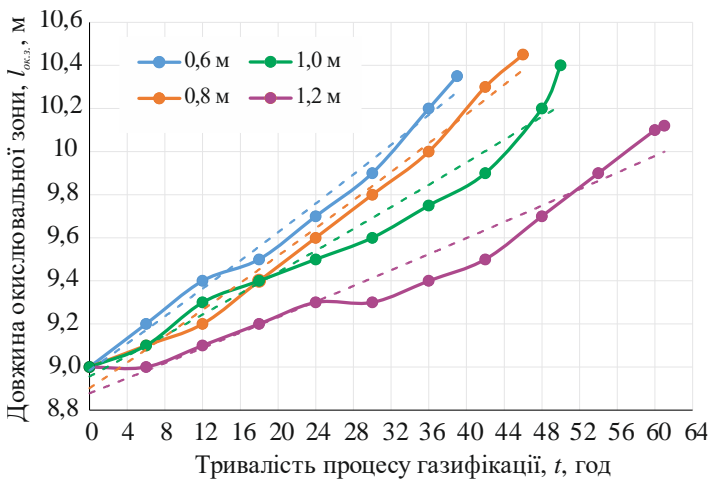
Аналіз результатів досліджень (рис. 7в) вказує на те, що при веденні режиму газифікації впродовж однієї доби середнє випередження окислювальної зони відносно відновлювальної становить 0,5 м, а біля устя експлуатаційних свердловин (дутьової, газовідвідної) – 0,6 м. При цьому довжина окислювальної зони $l_{ок.з.} = 9,0 - 9,4$ м суттєво не впливає на вихід горючих генераторних газів. На закінчення другої доби ведення процесу газифікації величина випередження збільшується до 2,1 м, а довжина окислювальної зони склала 10,2 м. За таких параметрів концентрація горючих газів була впродовж другої доби на рівні 38,02% з теплотою згоряння 6,94 МДж/м³. Це пояснюється підвищенням інтенсивності процесу газифікації за рахунок попереднього прогріву породо-вугільного масиву. З початком третьої доби (4 год) випередження становило 2,4 м, а довжина окислювальної зони – 10,4 м. Вихід газів почав різко зменшуватися і склав 36,78%. Ця ситуація обумовлена порушенням балансу між зонами хімічних реакцій. За таких умов відбувається неповне згоряння кисню у складі дутьової суміші та підвищення концентрації баластних газів.

На кінець третьої доби середня величина випередження становила 2,4 м, а довжина окислювальної зони – 10,8 м. Вихід газів почав різко зменшуватися і склав 32,24%. Ця ситуація зумовлена порушенням балансу між зонами хімічних реакцій. За таких умов відбувається не повне згоряння кисню у складі дутьової суміші та підвищення концентрації баластних газів.

При газифікації вугільного пласта потужністю 1,2 м (рис. 7г) на початкових етапах (до 24 год) концентрація горючих газів тримається на стабільному рівні 37,7 – 38,5%. У період 24 – 60 год концентрація сягає свого піку – 38,54%. Це корелює з інтенсивною газифікацією та збалансованою роботою хімічних зон. Після 60 год спостерігається зниження концентрації до 36,25% (на 72 год), що свідчить про порушення балансу між зонами окислення та відновлення. На початку (0 – 24 год) довжина коливається в межах 9,0 – 9,4 м. У період інтенсивного газоутворення (24 – 60 год) довжина поступово зростає до 10,12 м. На 72 год значення довжини сягає 10,4 м. Після 60 год спостерігається дисбаланс: подальше зростання $l_{ок.з.}$ супроводжується зниженням концентрації горючих газів. Це може бути наслідком порушення рівноваги між зонами хімічних реакцій, зростання частки баластних газів або неповного згоряння кисню.

Таким чином, ефективність процесу газифікації можна охарактеризувати параметрами формування окислювальної зони підземного газогенератора, а саме її довжиною $l_{ок.з.}$ та величиною випередження окислювальної зони відносно відновлювальної. Відповідно до проведених досліджень було отримано залежності зміни довжини окислювальної зони $l_{ок.з.}$ від ефективного часу

газифікації t за потужністю вугільних пластів, які мають стабільну тенденцію до зростання за експоненціальною залежністю (рис. 8).



$$m - 0,6 \text{ м } l_{ок.з.} = 8,98 \exp(0,003t), \text{ м};$$

$$m - 0,8 \text{ м } l_{ок.з.} = 8,90 \exp(0,003t), \text{ м};$$

$$m - 1,0 \text{ м } l_{ок.з.} = 8,96 \exp(0,003t), \text{ м};$$

$$m - 1,2 \text{ м } l_{ок.з.} = 8,88 \exp(0,002t), \text{ м}.$$

Рисунок 8 – Залежності зміни довжини окислювальної зони $l_{ок.з.}$ підземного газогенератора від ефективного часу газифікації t за потужністю вугільного пласта m

Обґрунтування оптимальної довжини окислювальної зони підземного газогенератора відбувається з використанням виявлених закономірностей у вигляді графіків на рис. 8. Апроксимація отриманих даних дала змогу отримати узагальнену залежність зміни довжини окислювальної зони $l_{ок.з.}$ підземного газогенератора від ефективного часу газифікації t та потужності вугільного пласта m :

$$l_{ок.з.}(m,t) = (9,04 - 0,12m) \cdot \exp((0,005 - 0,002m) \cdot t), \text{ м}.$$

Таким чином, у результаті проведених досліджень встановлено закономірності зміни довжини окислювальної зони підземного газогенератора $l_{ок.з.}$, яка має стабільну тенденцію до зростання за експоненціальними залежностями і сягає свого критичного значення у 10,12 – 10,45 м, що свідчить про вихід процесу газифікації за межу ефективності від часу газифікації вугільного пласта t та його потужності m . Отримані закономірності дають змогу спрогнозувати параметри посування фронту вогневого вибою для забезпечення стабільної та ефективної роботи підземного газогенератора при керуванні параметрами обвалення порід покрівлі вугільного пласта.

Під час досліджень параметрів формування окислювальної зони підземного газогенератора було зафіксовано зменшення показників виходу генераторного газу з ростом вигазованого простору. Таким чином, було проведено дослідження щодо параметрів формування вигазованого простору з подальшою оцінкою параметрів подачі дуттьової суміші та зміни концентрації горючих газів. Зазначені дослідження склалися з аналізу зміни положення вогневого вибою за даними температурних датчиків, фіксації опускань покрівлі підземного газогенератора в часі, вимірювання зміни концентрації горючих і баластних газів. Відповідно до отриманих даних, за кожною серією досліджень було не тільки проведено графічну візуалізацію зміни фронту посування вогневого вибою, а й детально проаналізовано параметри формування вигазованого простору в часі (рис. 9).

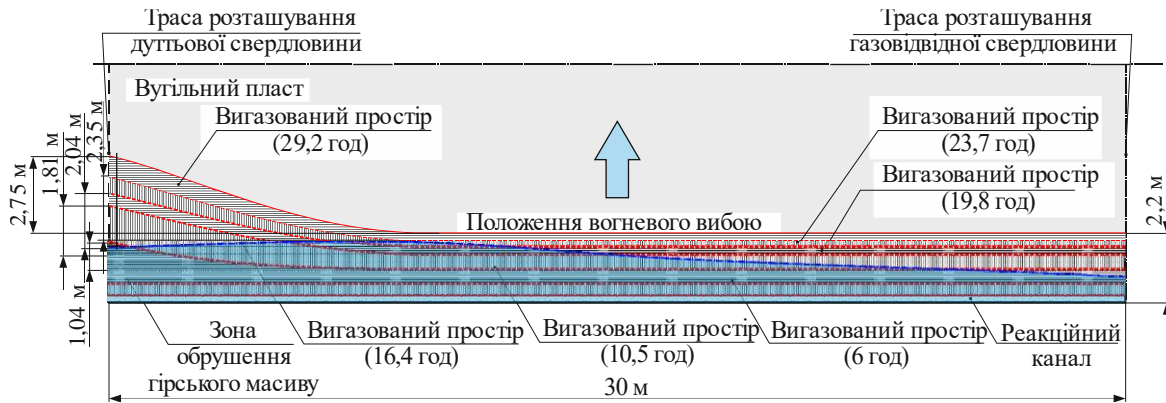
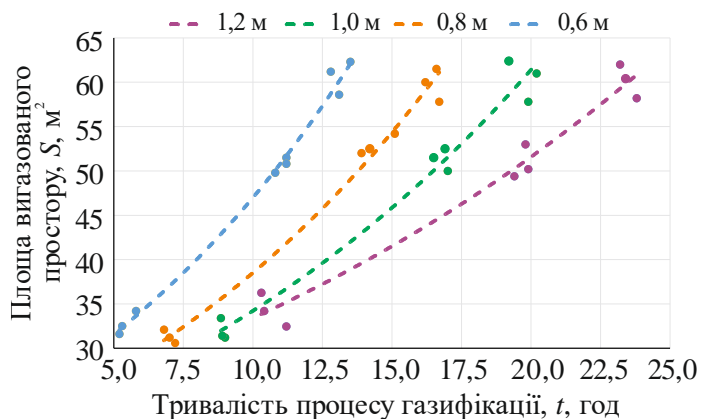


Рисунок 9 – Схема посуювання фронту вогневого вибою: потужність вугільного пласта $m = 1,2$ м; тиск подачі дугтя $P = 0,44$ МПа; час газифікації $t = 29,2$ год

Аналіз наведених даних на рис. 9 вказує на зменшення площі вигазованого простору, що пов'язано з обваленням порід покрівлі з певним кроком за довжиною вогневого вибою. Обвалення порід відбувається нерівномірно. У відновлювальній зоні крок обвалення змінюється від 1,23 до 1,37 м. В окислювальній зоні крок обвалення становить від 1,4 до 2,75 м. Нерівномірність кроків обвалення, насамперед, є результатом впливу температури на гірський масив. У процесі газифікації вугільних пластів із потужністю від 0,6 до 1,0 м, параметри кроку обвалення порід виявляються подібними. Це свідчить про те, що температура має вирішальний вплив на механізми обвалення порід.

У результаті проведених досліджень було зареєстровано чотири кроки підвищення тиску подачі дугтя від зміни розмірів вигазованого простору від тривалості процесу газифікації. На рис. 10 наведено дані щодо зміни площі вигазованого простору S від тривалості процесу газифікації t та потужності вугільного пласта m .



$$m - 0,6 \text{ м } S = 21,21 \exp(0,08t), \text{ м}^2;$$

$$m - 0,8 \text{ м } S = 19,33 \exp(0,07t), \text{ м}^2;$$

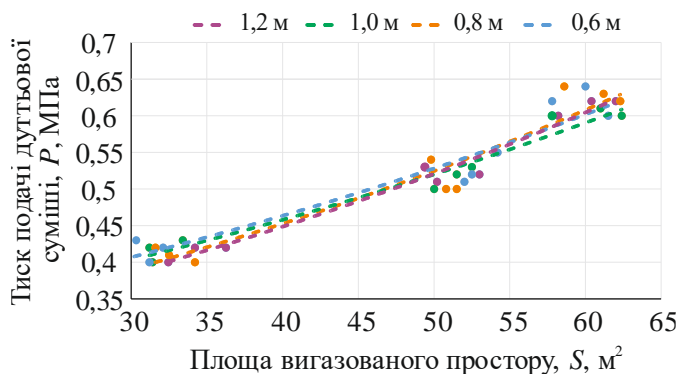
$$m - 1,0 \text{ м } S = 19,07 \exp(0,06t), \text{ м}^2;$$

$$m - 1,2 \text{ м } S = 21,63 \exp(0,04t), \text{ м}^2.$$

Рисунок 10 – Залежності зміни площі вигазованого простору від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта

Аналіз наведених даних на рис. 10 свідчить про експоненціальне зростання площі вигазованого простору від тривалості процесу газифікації. Врахування отриманих даних у вигляді залежностей має важливе практичне значення, що дає змогу прогнозувати параметри розширення вигазованого простору на основі

тривалості газифікації та в подальшому керувати процесом. Дані щодо зміни тиску подачі дуттьової суміші P від площі вигазованого простору S та потужності вугільного пласта m за досліджуваними точками наведено на рис. 11.



$$m - 0,6 \text{ м } P = 0,29 \exp(0,014S), \text{ МПа};$$

$$m - 0,8 \text{ м } P = 0,32 \exp(0,012S), \text{ МПа};$$

$$m - 1,0 \text{ м } P = 0,33 \exp(0,011S), \text{ МПа};$$

$$m - 1,2 \text{ м } P = 0,31 \exp(0,012S), \text{ МПа}$$

Рисунок 11 – Залежності зміни тиску подачі дуттьової суміші від площі вигазованого простору та потужності вугільного пласта

Встановлено, що підвищення тиску продовжує час перебування газів у реакційній зоні, даючи їм більше часу для протікання хімічних реакцій та досягнення рівноважного стану системи підземного газогенератора. При цьому за подальшого підвищення тиску зафіксовано, що додаткове його збільшення не призводить до наступного утворення горючих генераторних газів. Таким чином, швидкість реакції перестає збільшуватися і вплив тиску стає менш значущим.

Аналіз зазначених вище залежностей вказує на те, що параметри тиску від площі вигазованого простору змінюються за однаковою функцією, виявляючи експоненціальний зв'язок. Відмінність полягає у змінних експоненціальних коефіцієнтах, що зумовлено, перш за все, зміною фізичних властивостей середовища та хімічними реакціями, які відбуваються під час газифікації, що впливають на рівномірність формування окислювальної та відновлювальної зон підземного газогенератора. За таких умов коефіцієнт варіації становить 6,0 – 8,59% від середнього значення, що свідчить про порівняно низьку розкиданість значень у цих даних. Тому узагальнена функція набуває вигляду:

$$P = 0,31 \exp(0,012S), \text{ МПа.}$$

Таким чином встановлено, що тиск подачі дуттьової суміші P під час газифікації вугільних пластів потужністю від 0,6 до 1,2 м описується експоненціальною залежністю від площі загазованого простору S , параметри формування якої зумовлені тривалістю процесу газифікації t та швидкостями посування вогневого вибою в окислювальній і відновлювальній зонах підземного газогенератора. Врахування цієї залежності дає змогу визначити ефективні режими подачі дуттьової суміші для оптимізації енергетичних витрат на її подачу.

Необхідно зазначити, що наявність високих температур у породах покрівлі та подошви підземного газогенератора суттєво впливає на структуру гірських порід. Високі температури можуть ініціювати термічну деформацію та зміну мінералогічного складу порід, спричиняючи їх розширення, тріщиноутворення та інші структурні зміни, які можуть впливати на механічну стійкість масиву.

При дослідженні впливу температури на відібрані проби гірського масиву встановлено, що в температурному режимі 200 °С маса зразків зменшилася до 317,5 – 329,8 г ($\gamma = 2540,8 - 2638,4 \text{ кг/м}^3$) з 319,3 – 332,1 г ($\gamma = 2554,4 - 2656,8 \text{ кг/м}^3$). При нагріві у 400 °С маса зразків знизилася на 0,04 – 0,9% від попередньої ($\gamma = 2329,6 - 2542,4 \text{ кг/м}^3$). При 600 °С маса досліджуваних зразків до нагріву становила 322,0 – 335,1 г ($\gamma = 2576,1 - 2680,0 \text{ кг/м}^3$), після – маса зменшилася на 30,6 – 53,2 г. У температурному режимі 800 °С різниця мас склала 34,6 – 64,6 г. Явища зменшення маси пов'язано з дегідратацією та декарбоксілюванням під дією температур, що відбуваються через випаровування води та виділення вуглецю з мінеральних компонентів у зразках породи, що підтверджено також у дослідженнях. Зміна маси породи за таких умов є індикатором структурних змін у матеріалі, що може впливати на його механічні властивості та стійкість. Тому подальшими дослідженнями було визначено міцність порід на одновісний стиск залежно від температурного режиму. Результати досліджень міцності зразків гірської породи наведено на рис. 12.

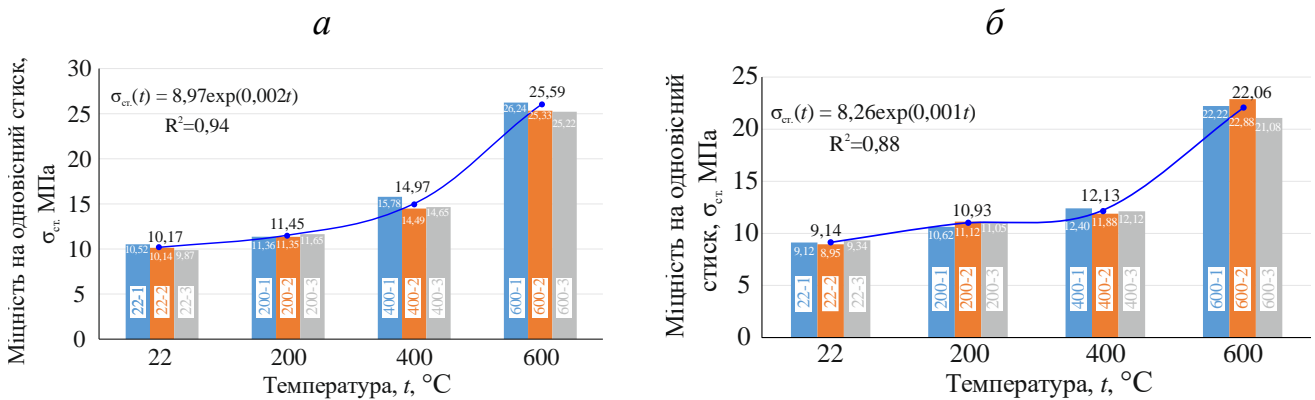


Рисунок 12 – Залежність зміни міцності зразків гірської породи шахти ім. Героїв Космосу ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (а) та шахти «Межирічанська» ДП «Львіввугілля» (б) на одновісний стиск від температури

Аналіз наведених результатів на рис. 12 вказує на експоненціальне зростання міцності порід з підвищенням температури. Під впливом температури при значенні 600 °С міцність на одновісний стиск зростає в середньому у 2,41 – 2,52 раза порівняно з температурою 22 °С. За подальшого підвищення температурного режиму до 800 °С міцність породних зразків різко почала зменшуватися і була зафіксована на рівні 10,52 – 11,22 МПа з різницею від початкового в 1,05 – 1,38 МПа. Отримані закономірності щодо зміни міцнісних характеристик гірського масиву є основою для задання цих даних для побудови фізичної моделі гірського масиву з метою подальшого визначення параметрів утилізації вуглекислого газу в техногенному середовищі. Необхідно зазначити, що під час проведення досліджень у чотирьох із шести породних зразків було зафіксовано утворення тріщин уздовж нашарувань порід. Тому додатково було проведено рентгеноструктурні дослідження. Встановлено, що найбільш розповсюдженим оксидом у досліджуваних зразках гірської породи є SiO₃ (кварц – 80%), каолінит (9%) і мусковіт (7%). Надалі з підвищенням температури вміст кварцу закономірно і послідовно збільшується, а вміст каоліну зменшується. Також визначено зміну

щільності дислокацій у кварці та збільшення дислокацій у каолініті, що зумовлюють структурні та функціональні зміни порід гірського масиву. Встановлено, що зниження щільності дислокацій кварцу покращує його механічну міцність. Тому вплив температури знижує ймовірність внутрішніх напружень, що призводять до виникнення тріщин.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи обґрунтовано параметри технології утилізації вуглекислого газу при підземній газифікації вугілля на основі встановлення нових закономірностей зміни концентрації CO_2 в генераторному газі від його концентрації у дуттьовій суміші та визначення оптимальних зон утилізації CO_2 навколо підземного газогенератора.

Проведеними дослідженнями встановлено, що 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 адаптивності», становить, відповідно, 6,0 та 8,35 МДж/м³. Вихід генераторного газу склав 3,34 – 4,46 м³/кг вугілля. Враховуючи значення концентрації баластного газу CO_2 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 600 м (довжина вогневого вибою – 30 м, потужність вугільного пласта – 0,8 м, густина вугілля – 1,24 т/м³), вихід вуглекислого газу становить 6,61 – 11,25 тис. м³. Оцінюючи характер зміни дуттьової суміші шляхом підвищення концентрації CO_2 у її складі, отримано дані щодо зміни концентрації горючих і баластних газів у генераторному газі. При цьому, відповідно до даних рис. 13 теплотворна здатність генераторного газу 6,0 МДж/м³ (повітряне дуття) відповідає значенню концентрації CO_2 в 22,3% у дуттьовій суміші.

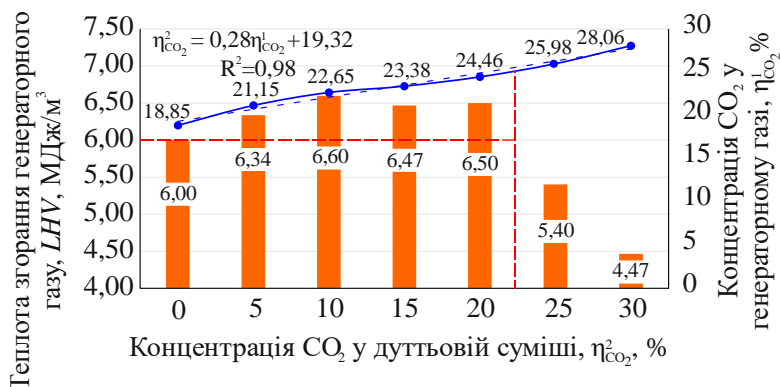


Рисунок 13 – Залежність зміни концентрації CO_2 в генераторному газі від його концентрації у дуттьовій суміші

Аналіз даних рис. 13 доводить, що простежується тенденція зменшення концентрації горючих газів і підвищення концентрації баластних зі збільшенням вуглекислого газу в 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 (CO_2) і монооксид вуглецю (CO). При вторинній реакції CO утворюватиметься у відновлювальній зоні вогневого вибою, де відбувається взаємодія діоксиду

вуглецю (CO_2) з вуглецем (C) за високих температур. Ця реакція відбувається при температурах стінок каналу газогенератора в діапазоні від 800 до 1050 °C: $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$.

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 відновлювальної 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 окислювача та термодинамічні умови в різних зонах підземного газогенератора.

Встановлено, що в межах концентрації CO_2 в дуттьовій суміші від 0 до 22,3%, середня теплота згоряння генераторного газу становить 6,32 МДж/м³. Однак, коли концентрація CO_2 в дуттьовій суміші перевищує 22,3%, спостерігається різке зниження теплоти згоряння. Зокрема, при концентрації CO_2 у 25% теплота згоряння 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 CO_2 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 залежно від умов його формування. Таким чином, аналіз даних з рис. 12 свідчить, що при подачі CO_2 у складі дуттьової суміші в кількості 18,85%, залишок неутилізованого газу становить 5,25%.

У результаті проведених досліджень встановлено показник коефіцієнта утилізації вуглекислого газу, який визначається за такою формулою:

$$k_{\text{CO}_2} = \left| 1 - \frac{\eta_{\text{CO}_2}^1}{\eta_{\text{CO}_2}^2} \right|,$$

де $\eta_{\text{CO}_2}^1$ – концентрація CO_2 в дуттьовій суміші, %; $\eta_{\text{CO}_2}^2$ – концентрація CO_2 в генераторному газі, %. Аналіз результатів проведення аналітичних розрахунків відповідно до запропонованої формули вказує, що умовою ефективною 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 $\eta_{\text{CO}_2}^1$ та генераторному газі $\eta_{\text{CO}_2}^2$, остання, яка змінюється лінійно за граничних концентрацій подачі вуглекислого газу у складі дуттьової суміші й складає не більше 22,3%. Урахування цієї залежності дає змогу спрогнозувати теплотворну здатність отриманого газу LHV та ефективність ведення процесу підземної газифікації вугілля з наступною утилізацією вуглекислого газу.

У ході дослідження процесу газифікації із використанням утилізації вуглекислого газу було виявлено значне зростання концентрації цього газу в генераторному. Тому подальші дослідження направлено на встановлення ефективного часу газифікації вугілля t з попутною утилізацією. Фіксація параметрів виходу вуглекислого газу до значень 25% відбувалась відповідно до

часового проміжку, що закладений у визначенні довжини формування окислювальної зони $l_{ок.з.}$. Залежності, що характеризують ефективний час виходу вуглекислого газу у складі генераторного газу, наведено на рис. 14.

Аналіз наведених даних на рис. 15 вказує на часовий проміжок подачі вуглекислого газу у складі дуттьової суміші при значеннях 22,3%, що раніше визначені як ефективні.

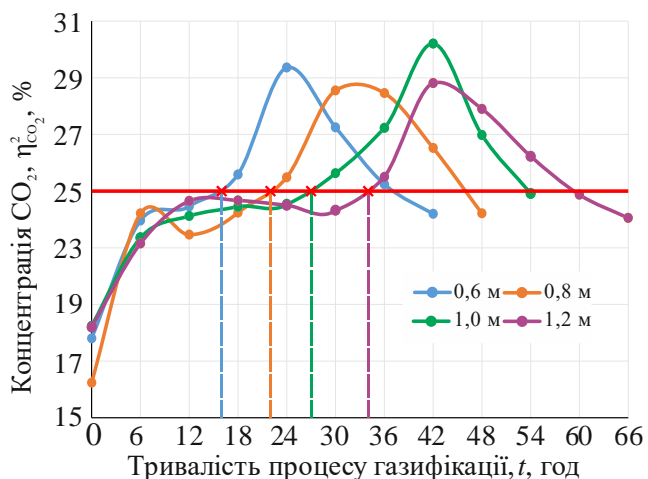


Рисунок 14 – Дані виходу вуглекислого газу від тривалості процесу газифікації

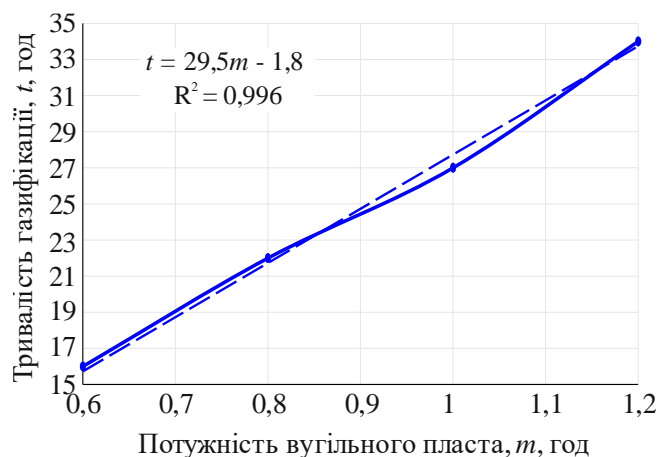


Рисунок 15 – Залежність тривалості процесу газифікації від потужності вугільного пласта

Таким чином, встановлений ефективний час подачі повітряно-вуглекислотного дуття t до площини підземного газогенератора характеризується лінійною залежністю від потужності вугільного пласта m та показників виходу вуглекислого газу у складі генераторного η_{CO_2} у кількості 25% як критичне значення. Це дає змогу спрогнозувати тривалість роботи підземного газогенератора, направлено на утилізацію вуглекислого газу (68,83 – 85,87%) з максимальним забезпеченням теплоти згоряння генераторного газу на рівні 6,3 – 6,6 МДж/м³.

Залишок вуглекислого газу, який не підлягає утилізації в межах роботи одного підземного газогенератора, залишається на рівні 12,88 – 19,83 млн м³. При посуванні підземного газогенератора відбувається опускання порід покрівлі з формуванням порожнин V_1 і V_2 зі сторони дуттьової та газовідвідної свердловин відповідно, а також порожнин розшарування $V_{p.1}$, $V_{p.2}$, ..., $V_{p.i}$ у покрівлі вугільного пласта. Необхідно зазначити, що механізм формування порожнини вигазованого простору можна уявити як процес створення виробленого простору. З обох боків – дуттьової та газовідвідної свердловин – уздовж стовпа газифікації гірські породи безпосередньої покрівлі звисають від площини вугільного пласта до зони повного опускання покрівлі. Тому додатково було проведено серію експериментальних досліджень для встановлення параметрів опускань безпосередньої покрівлі підземного газогенератора. Параметри даних опускань досліджувались за допомогою реперних датчиків, які закладалися на рівні змодельованої покрівлі підземного газогенератора. За результатами проведених досліджень встановлено залежність зміни площі порожнини виробленого простору зі сторони дуттьової свердловини від потужності вугільного пласта (рис. 16a).

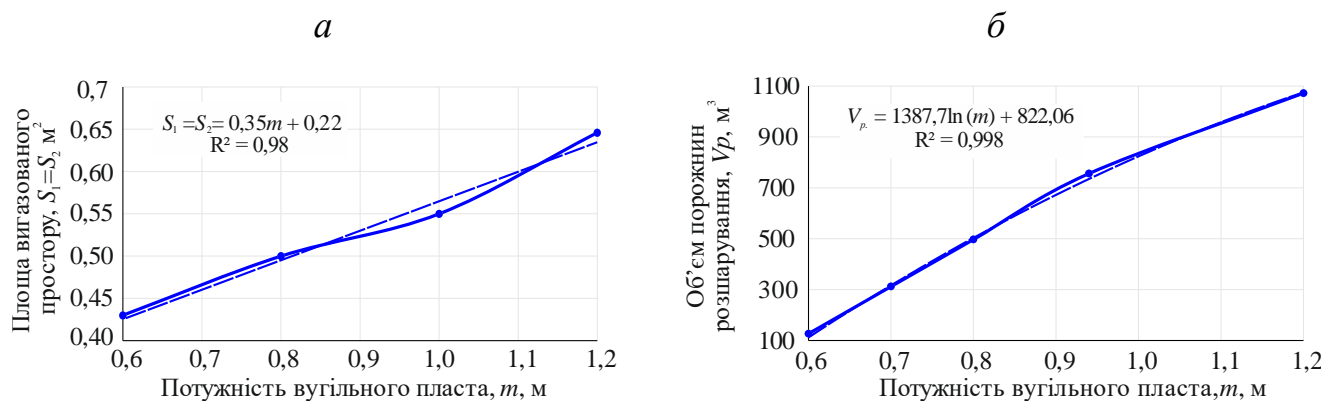


Рисунок 16 – Залежності зміни площі порожнини виробленого простору зі сторони експлуатаційних свердловин (а) та зміни сумарного об'єму порожнин розшарування надвугільної товщі (б) від потужності вугільних пластів

Встановлено, що з урахуванням материнської зольності вугільних пластів отримана залежність (рис.16а) набуває вигляду:

$$S_1 = S_2 = 0,81 \dots 0,94(0,35m + 0,22), \text{ м}^2,$$

де 0,81...0,94 – коефіцієнт зменшення площі вигазованого простору S_1 і S_2 .

Надалі було побудовано фізичну модель гірського масиву, яка дає змогу визначити параметри порожнин розшарування під час газифікації вугільного пласта. В основу побудови цієї моделі закладено зміну міцнісних характеристик гірського масиву під дією температурного режиму підземного газогенератора. Отриману залежність наведено на рис. 16б.

При газифікації пластів потужністю від 0,6 до 1,2 м визначено, що об'єм порожнин розшарування (V_p) змінюється від 127 до 1072 м³. Тому, враховуючи параметри об'ємів сформованих порожнин за довжиною стовпа газифікації ($L = 600$ м) від 418 та 627 м³ ($k_3 = 0,81$), додатково можна утилізувати від 0,55 до 1,7 тис. м³ вуглекислого газу, при $k_3 = 0,94$ – 0,61 – 1,8 тис. м³. Дані значення відповідно становлять 4,2 – 8,6% та 4,7 – 9,1% від неутілизованого газу. Отже, шляхом подачі вуглекислого газу у складі дуттьової суміші та його закачуванням у техногенно сформовані порожнини підземного газогенератора, ефективність утилізації вуглекислого газу становить 73,03 – 94,97 %.

Шостий розділ дисертаційної роботи висвітлює розроблені способи керування процесом підземної газифікації вугілля та утилізації вуглекислого газу зі встановленням їх економічної ефективності.

Практична реалізація технології підземної газифікації вугілля передбачає підведення дуттьових сумішей за двома технологіями. Перша зумовлює подачу дуття по експлуатаційній свердловині, друга – подачу дуттьової суміші по керованому трубопроводу з керованою точкою дуття. Проведеними дослідженнями встановлено дані щодо зміни концентрації горючих генераторних газів від способу подачі дуттьових сумішей (рис. 17).

Варіація теплотворної здатності під час проведення досліджень демонструє поступовість збільшення за кожним способом подачі дуття. Теплотворна здатність газоподібного продукту при подачі дуття по дуттьовій свердловині в середньому змінюється від 4,8 до 5,23 МДж/м³.

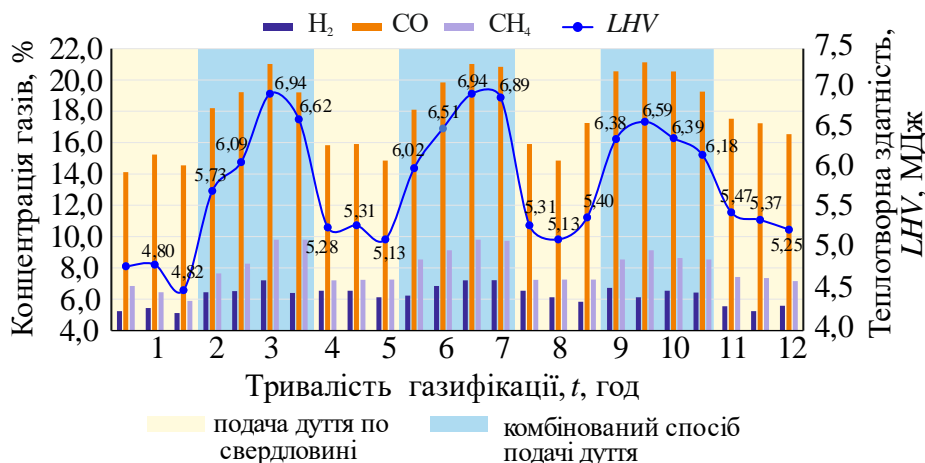


Рисунок 17 – Дані щодо зміни концентрації горючих генераторних газів та теплоти згорання від способів подачі дуттьових сумішей

При комбінованій подачі дуттьової суміші теплотворна здатність газу в середньому підвищується на 26% і змінюється від 6,34 до 6,59 МДж/м³. Максимальний скачок зміни теплоти згорання простежується між 1 та 2 циклом дослідження завдяки утворенню стабільного температурного режиму як у вугільному пласті, так і в породах покрівлі та підшви. Подача дуття керованими трубопроводами забезпечує формування незалежного джерела високотемпературного впливу, що обумовлює керованість процесом газифікації вугілля з різним складом як в автотермічному, так і у періодичному алотермічному режимах. Комбінована подача дуття в підземний газогенератор зумовлює подвійне надходження окислювача O₂ в зону газифікації, що інтенсифікує процес газифікації за рахунок розширення реакційних зон $l_{ок.}$, $l_{від.}$ як за довжиною стовпа газифікації L , так і за потужністю пласта m . При зміні способу подачі дуття теплота згорання в середньому підвищується на 2,02 МДж/м³. Це дає змогу адаптувати способи подачі сумішей у реакційні зони газогенератора й оперативно приймати технологічні рішення щодо зміни режимів роботи підземного газогенератора.

Практична реалізація способів утилізації вуглекислого газу в техногенному середовищі підземного газогенератора передбачає виділення чотирьох зон для акумулювання CO₂. До першої зони належать порожнини з боку експлуатаційних свердловин, де вуглекислий газ буде накопичуватися у вільному стані. До другої зони відноситься частина підземного газогенератора, що характеризується найбільшим потенціалом для накопичення CO₂ у зоні виробленого простору. Третя і четверта зони, відповідно, відносяться до частини зони обвалення порід, де відбувається прогин нашарувань товщі гірських порід у бік виробленого простору з утворенням газопровідних тріщин, розломів та розшарувань. Загалом, об'єм зазначених зон описується формулою:

$$V = \frac{Ll(k_I^I h_I + k_{II}^{II} (h_{II} - h_I))}{100} - V_r - (V_1 + V_2), \text{ м}^3,$$

де k_I , k_{II} – усереднена пористість гірської породи досліджуваних зон, %; L – довжина стовпа газифікації, м; l – довжина вогневого вибою, м; h_I – зона

безладного обвалення порід, м; h_{II} – зона плавного прогину нашарувань товщі гірських порід з утворенням розшарувань та тріщин, м; V_r – об’єм порожнин розшарування, м³; $V_1 + V_2$ – об’єм сформованих порожнин за довжиною стовпа зі сторони експлуатаційних свердловин.

Для проведення обчислювальних експериментів за базові параметри було прийнято температурний градієнт від 32 до 125 °С. Водночас тиск P , у якому молекули CO₂ впливають на техногенне середовище газогенератора, з одного боку, має бути більшим за гідростатичний, з іншого, тиск має залишатися нижчим за границю міцності гірських порід, щоб не спричинити їхню деформацію або руйнування. Для наших умов, згідно з усередненими даними значення коливаються у діапазоні від 7,82 до 9,24 МПа. Відповідно до проведених досліджень, міцність порід на стиск у заданому температурному режимі від 32 до 125 °С для умов ДП «Львіввугілля» (шахта «Межирічанська») змінюється від 9,14 до 10,61 МПа, ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (шахта ім. Героїв Космосу) – віж 10,17 до 14,79 МПа. За умови подачі CO₂, коли відбувається стабілізація поля напружень до початкового непорушеного стану гірського масиву γH , параметр P становить, відповідно, $9,14 < P_1 < 10,61$ МПа та $10,17 < P_2 < 14,79$ МПа. Розглядаючи умови подачі CO₂, коли сформована зона розвантаження $< \gamma H$, параметри тиску становлять $< \gamma H < P_1 < 10,61$ МПа та $< \gamma H < P_2 < 14,79$ МПа. Вищезазначені дані вказують, що CO₂ за таких умов перебуває у суперкритичному стані, умовою настання якого є температура вище 31 °С та тиск більше 7,38 МПа. Це обумовлює високу щільність і низьку в’язкість, що є оптимальним для транспортування та зберігання.

При газифікації вугільного пласта потужністю 0,6 м за умов $P_1 = 14,5$ МПа, $T_1 = 125$ °С та $P_1 = 14,5$ МПа, $T_1 = 32$ °С об’єм утилізації CO₂ становить 3,79 млн м³, при 0,8 м – 5,87 млн м³, 1,0 м – 7,34 млн м³, 1,2 м – 8,78 млн м³. З огляду на попередні результати щодо кількості CO₂, що залишилася після використання у складі дуттьової суміші, від 12,88 до 19,83 млн м³, можна дійти висновку, що в межах одного підземного газогенератора, який працював на пластах потужністю 0,6 – 1,2 м, можливо додатково утилізувати 26 – 29% газу CO₂.

Для візуалізації отриманих результатів дослідження було розроблено онлайн-середовище «USG-1». Це адаптивний механізм аналізу ключових параметрів процесу газифікації вугілля з попутною утилізацією CO₂, що сприяє подальшому розвитку та впровадженню технології підземної газифікації у промислову практику.

В основу визначення економічної ефективності від впровадження технології та встановлених параметрів покладено аналіз базового та інноваційного варіантів. Такий підхід дає змогу ефективно провести порівняльний аналіз між прибутковою частиною реалізації проекту та аспектами, що стосуються економії витрат. До прибуткової відносять підвищення теплоти згоряння генераторного газу, до економії витрат – зменшення суми платежів за надлишкові викиди CO₂ в атмосферу. Також при оцінюванні об’ємів економії від утилізації вуглекислого газу за інноваційним варіантом необхідно враховувати факт залишків CO₂, за викиди якого підприємство буде платити. На рис. 18 наведено узагальнені дані щодо параметрів економічної ефективності за базовим та інноваційним варіантом.

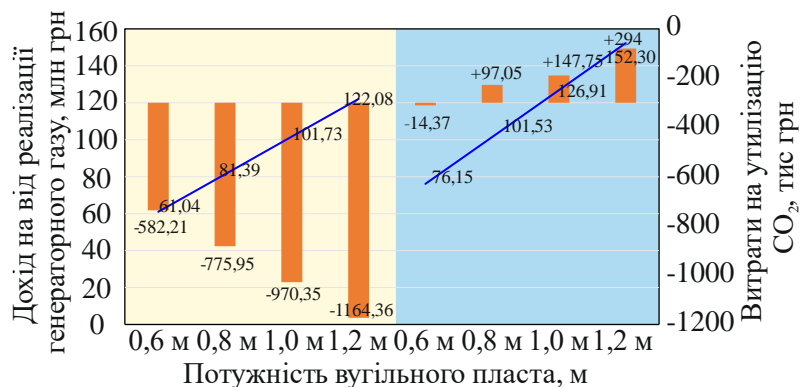


Рисунок 18 – Дані щодо дохідної та витратної частин: базовий варіант – повітряне дуття; інноваційний варіант – повітряно-вуглекислотне дуття, утилізація CO₂ у дуттьовій суміші + у техногенному просторі підземного газогенератора

Проведеними дослідженнями встановлено, що дохід від реалізації генераторного газу при базовому варіанті змінюється від 61,04 до 122,08 млн грн, при інноваційному – від 76,15 до 152,30 млн грн, відповідно до потужності вугільного пласта від 0,6 до 1,2 м, або зростає на 24,8%. Порівнюючи умови газифікації вугілля за базовим варіантом (повітряне дуття, утилізація CO₂ відсутня) з інноваційним (повітряне дуття, утилізація CO₂), витрати на утилізацію CO₂ при інноваційному варіанті менші від базового на 224,64 – 520,34 тис. грн, а при утилізації CO₂ у дуттьовій суміші (див. рис. 18) менші на 343,2 – 938,04 тис. грн. Комплексний підхід до утилізації CO₂ під час газифікації вугільних пластів від значення потужності пласта в 0,64 м вказує на додатковий дохід від утилізації CO₂. Наприклад, під час газифікації вугільних пластів потужністю від 0,8 до 1,2 м з попутною утилізацією CO₂ гірничче підприємство додатково зможе отримати від 97,05 до 294,0 тис. грн.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальну наукову проблему з оптимізації процесів видобутку вугілля підземною газифікацією з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі, які ґрунтуються на виявлених нових закономірностях зміни параметрів формування активних зон підземного газогенератора та утилізації вуглекислого газу і дають змогу сформуванню єдиної інтегрованої системи керування процесом підземної газифікації вугілля, яка може стати каталізатором для відновлення економічної активності, створення нових робочих місць та залучення інвестицій у розвиток гірничодобувних регіонів.

Основні наукові та практичні результати полягають у такому:

1. На основі світового аналізу глобальних тенденцій щодо видобутку вугілля визначено, що в найближче десятиліття вугілля залишатиметься ключовим елементом світового енергетичного балансу. Для України, де вугільна промисловість є важливою частиною енергетичного сектору, особливого значення набуває трансформація галузі в умовах глобальної декарбонізації. Воєнні дії та руйнування інфраструктури ставлять перед Україною завдання

пошуку ефективних технологічних рішень для підвищення екологічної безпеки та продуктивності вугільної галузі.

2. Визначено, що одним із ключових напрямів розвитку вугільної промисловості, є впровадження інноваційних технологій, зокрема підземної газифікації вугілля. Ця технологія дає змогу значно підвищити ефективність використання вугілля, зменшуючи потребу в традиційному його видобутку та знижуючи екологічний вплив на навколишнє середовище.

3. Визначено, що при розвитку перспективного освоєння вугілля як енергетичної сировини є необхідність інтеграції технологій утилізації вуглекислого газу у вугільну промисловість, що є важливим етапом для її екологічної адаптації до сучасних міжнародних вимог щодо зниження викидів парникових газів. Технології підземної газифікації, у поєднанні з утилізацією CO₂, дають змогу не тільки зменшити викиди в атмосферу, а й перетворити вуглець на корисні енергоносії, що можуть слугувати альтернативою природному газу.

4. Розроблено методики лабораторних випробувань зразків гірських порід під впливом змінного температурного поля у динамічному режимі для дослідження параметрів формування площини вигазовування активних зон підземного газогенератора та сформовано методологічні основи дослідження процесу підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу в техногенному середовищі під час визначення оптимальних технологічних параметрів керування процесом газифікації вугілля та розробки підходів до мінімізації екологічного впливу за рахунок повторного використання CO₂.

5. Вперше розроблена математична модель теплообміну середовища в системі «вугілля – генераторний газ» при підземній газифікації вугілля враховує межі фазових переходів за умовою Стефана. Ця модель дає змогу більш точно прогнозувати теплові процеси, що відбуваються під час газифікації вугілля, та визначити оптимальні температурні режими для забезпечення ефективності газифікації.

6. Вперше встановлено залежності зміни довжини окислювальної зони підземного газогенератора ($l_{ок.з.}$) від тривалості процесу газифікації (t) і потужності вугільного пласта (m). Ця довжина сягає свого критичного значення на проміжку 10,12 – 10,45 м, що свідчить про вихід процесу газифікації за межу ефективності його застосування. Отримані залежності дають змогу спрогнозувати параметри посування фронту вогневого вибою для забезпечення стабільної та ефективної роботи підземного газогенератора під час формування вигазованого простору газогенератора.

7. Вперше встановлено залежності зміни тиску подачі дуттьової суміші (P) при газифікації вугільних пластів потужністю від 0,6 до 1,2 м від тривалості процесу газифікації (t), який встановлює геометричні параметри вигазованого простору від швидкості посування вогневого вибою в окислювальній та відновлювальній зонах підземного газогенератора. Врахування даних залежностей дає змогу визначити режими подачі дуттьової суміші для оптимізації енергетичних витрат на її подачу.

8. Вперше отримано коефіцієнт утилізації вуглекислого газу (k_{CO_2}) при підземній газифікації вугілля, що враховує концентрації діоксиду вуглецю в

генераторному газі ($\eta_{CO_2}^2$) та його концентрації у складі дуттьової суміші ($\eta_{CO_2}^1$) за граничних концентрацій подачі у складі не більше 22,3%.

9. Вперше встановлений 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. Це дає змогу спрогнозувати тривалість роботи підземного газогенератора, направлено на утилізацію вуглекислого газу (68,83 – 85,87%), з максимальним значенням теплотворної здатності отриманого газу на рівні 6,3 – 6,6 МДж/м³.

10. Визначено, що комбінована подача дуття зумовлює подвійне надходження окислювача (O₂) у підземний газогенератор, що інтенсифікує процес газифікації вугілля за рахунок розширення реакційних зон вогневого вибою за довжиною стовпа газифікації (L) від потужності вугільного пласта (m). При зміні способу подачі дуття теплотворна здатність генераторного газу в середньому підвищується на 2,02 МДж/м³. Це дає змогу адаптувати способи подачі сумішей у реакційні зони, оперативно ухвалювати технологічні рішення щодо зміни режимів роботи підземного газогенератора.

11. Набула подальшого розвитку концепція утилізації вуглекислого газу в складі дуттьової суміші та техногенному середовищі підземного газогенератора на базі технології підземної газифікації вугілля для забезпечення принципів сталого розвитку вугледобувних регіонів.

12. Розроблено технології газифікації вугілля та утилізації вуглекислого газу: «Спосіб утилізації діоксиду вуглецю» (UA №156354), «Спосіб управління станом гірського масиву при підземній газифікації твердого палива» (UA №156406), «Спосіб підземної газифікації твердого палива» (UA №127929), «Спосіб підземної газифікації твердого палива» (UA №152841), «Спосіб підземної газифікації твердого палива» (UA №149211).

13. Розроблено методики і рекомендації з ефективного керування процесами газифікації вугілля та утилізації вуглекислого газу: «Рекомендації з оптимізації режимів подачі дуттьових сумішей при газифікації вугілля» (ТОВ «ЗАХІД ТРЕЙД РЕСУРС»), «Методика визначення параметрів формування порожнин вигазованого простору підземного газогенератора» (ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»), «Методика прогнозу ефективності процесу газифікації вуглецевмісної сировини з утилізацією вуглекислого газу» (ТОВ «ГОФЕР УКРАЇНА»).

14. Економічна оцінка доцільності застосування розробленої технології та технологічних рішень дає змогу отримати зростання доходу від реалізації генераторного газу на 24,8% (61,04 – 122,08 млн грн → 76,15 – 152,30 млн грн). Комплексний підхід до утилізації CO₂ під час газифікації вугільних пластів потужністю від 0,64 м демонструє додатковий дохід від утилізації CO₂ за кожен тону вугілля. Встановлено, наприклад, що під час газифікації вугільних пластів потужністю від 0,8 до 1,2 м з утилізацією CO₂ гірниче підприємство додатково зможе отримати від 97,05 до 294,0 тис. грн.

Основні положення і результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. **Saik, P.B.**, & Berdnyk, M.H. (2024). Mathematical model for heat transfer during underground coal gasification process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 19-24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/019>
2. **Saik, P.**, Lozynskiy, V., Anisimov, O., Akimov, O., Kozhantov, A., & Mamaykin, O. (2023). Managing the process of underground coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 25-30. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/025>
3. Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., **Saik, P.**, Dychkovskiy, R., Zhautikov, B., & Cabana, E. (2022). Use of magnetic fields for intensification of coal gasification process. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 37(5), 61-74. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.5.6>
4. **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>
5. Falshtynskiy, V., **Saik, P.**, Lozynskiy, V., Toleuov, B., Sulaiev, V., & Buketov, V. (2022). Determining the parameters of stratification cavity in rock mass to extract mine methane. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 30-35. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/030>
6. 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>
7. **Saik, P.**, Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Cabana, E.C., & Hrytsenko, L. (2021). Chemistry of the gasification of carbonaceous raw material. *Materials Science Forum*, 1045, 67-78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1045.67>
8. Pivnyak, G., Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., **Saik, P.**, Lozynskiy, V., Cabana, E., & Koshka, O. (2020). Conditions of suitability of coal seams for underground coal gasification. *Key Engineering Materials*, 844, 38-48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.844.38>
9. **Saik, P.B.**, Falshtynskiy, V.S., Lozynskiy, V.H., Cabana, E.C., Demydov, M.S., & Dychkovskiy, R.O. (2020). Efficiency of underground gas generator in consideration of the reverse mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 39-46. <https://doi.org/nvngu/2020-4/039>
10. Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., **Saik, P.**, Lozynskiy, V., Sulaiev, V., & Cabana, E.C. (2019). The concept of mining enterprises progress on the basis of underground coal gasification method characteristic. *Solid State Phenomena*, 291, 137-147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.291.137>
11. Petlovanyi, M.V., Lozynskiy, V.H., **Saik, P.B.**, & Sai, K.S. (2018). Modern experience of low-coal seams underground mining in Ukraine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(6), 917-923. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.014>
12. Lozynskiy, V., **Saik, P.**, Petlovanyi, M., Sai, K., Malanchuk, Z., & Malanchuk, Ye. (2018). Substantiation into mass and heat balance for underground coal gasification

in faulting zones. *Inżynieria Mineralna*, 19(2), 289-300. <https://doi.org/10.29227/IM-2018-02-36>

13. Falshtynskiy, V., **Saik, P.**, Lozynskiy, V., Dychkovskiy, R., & Petlovanyi, M. (2018). Innovative aspects of underground coal gasification technology in mine conditions. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 68-75. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.068>

14. Falshtynskiy, V.S., Dychkovskiy, R.O., **Saik, P.B.**, Lozynskiy, V.H., & Cabana, E.C. (2018). Substantiation into “rock massive – underground gasifier” system adaptability of Solenovskiy site in the Donetsk coal basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 14-21. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/5>

15. **Saik, P.**, Petlovanyi, M., Lozynskiy, V., Sai, K., & Merzlikin, A. (2018). Innovative approach to the integrated use of energy resources of underground coal gasification. *Solid State Phenomena*, 277, 221-231. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.221>

16. Lozynskiy, V., **Saik, P.**, Petlovanyi, M., Sai, K., & Malanchuk, Y. (2018). Analytical research of the stress-deformed state in the rock massif around faulting. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 35, 77-88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.35.77>

17. Falshtynskiy, V.S., Dychkovskiy, R.O., **Saik, P.B.**, Lozynskiy, V.H., & Cabana, E.C. (2017). Formation of thermal fields by the energy-chemical complex of coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 36-42. Retrieved from <http://nvngu.in.ua/index.php/en/component/jdownloads/finish/70-05/8703-5-2017-dychkovskiy/0>

18. Falshtynskiy, V., Lozynskiy, V., **Saik, P.**, Dychkovskiy, R., & Tabachenko, M. (2016). Substantiating parameters of stratification cavities formation in the roof rocks during underground coal gasification. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 16-24. <https://doi.org/10.15407/mining10.01.016>

19. Tabachenko, M., **Saik, P.**, Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., & Dychkovskiy, R. (2016). Features of setting up a complex, combined and zero-waste gasifier plant. *Mining of Mineral Deposits*, 10(3), 37-45. <https://doi.org/10.15407/mining10.03.037>

20. **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>

21. **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>

22. Bukreieva, D., **Saik, P.**, Lozynskiy, V., Cabana, E., & Stoliarska, O. (2022). Assessing the effectiveness of innovative projects implementation in the development of coal deposits by geotechnology of underground gasification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012031>

23. **Saik, P.**, Maksymova, E., Lozynskyi, V., Cabana, E., & Petlovanyi, M. (2021). Synergistic approach as an innovative basis for obtaining a natural gas substitute. *E3S Web of Conferences*, (230), 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001022>
24. **Saik, P.**, Lozynskyi, V., Chemeriachko, Y., & Cabana, E. (2020). Basics of the approach formation to substantiate the temperature field distribution during experimental research on the coal gasification processes. *E3S Web of Conferences*, (201), 01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101037>
25. **Saik, P.**, Dychkovskiy, R., Lozynskyi, V., Falshtynskiy, V., Cabana, E., & Hrytsenko, L. (2020). Studying the features of the implementation of underground coal gasification technology in terms of Lvivvuhillia SE. *E3S Web of Conferences*, (168), 00036. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800036>
26. Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., **Saik, P.**, & Sai, K. (2019). Predicting the producing well stability in the place of its curving at the underground coal seams gasification. *E3S Web of Conferences*, (123), 01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301019>
27. **Саїк, П.Б.** (2024). До питання утилізації вуглекислого газу при підземній газифікації вугілля. *Збірник наукових праць НГУ*, (79), 84-94. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.084>
28. **Саїк, П.Б.**, & Фальштинський, В.С. (2024). Утилізація діоксиду вуглецю при свердловинній підземній газифікації вугілля. *Збірник наукових праць НГУ*, (78), 39-50. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.039>
29. **Саїк, П.Б.**, & Бердник, М.Г. (2024). Математична модель розподілу температури у зразку гірської породи при нагріванні. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна»*, 1-2(31-32), 70-77. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2024-1\(31\)-2\(32\)-70-77](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2024-1(31)-2(32)-70-77)
30. **Саїк, П.Б.**, Лозинський, В.Г., Малашкевич, Д.С., & Черняєва, О.В. (2022). До питання підземної газифікації малопотужних некондиційних запасів вугілля. *Збірник наукових праць НГУ*, (71), 91-103. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.091>
31. **Саїк, П.Б.** (2021). Методика адаптації результатів лабораторних досліджень при газифікації вугілля щодо натурних умов. *Збірник наукових праць НГУ*, (65), 50-59. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.050>
32. **Саїк, П.Б.**, Лозинський, В.Г., Фальштинський, В.С., Демидов, М.С., & Ганушевич, К.А. (2019). Дослідження матеріально-теплових показників процесу газифікації вугілля. *Збірник наукових праць НГУ*, (57), 32-44. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/57.032>
33. **Саїк, П.Б.**, Лозинський, В.Г., Петльований, М.В., Сай, К.С., & Стрижаков, Є.М. (2018). Сучасний підхід до освоєння енергетичних ресурсів залишених та некондиційних запасів вугілля. *Збірник наукових праць НГУ*, (54), 152-168. Режим доступу: <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/54/17.pdf>
34. **Саїк П.Б.**, Лозинський В.Г., Фальштинський В.С., & Демидов, М.С. (2017). До питання дослідження процесу газифікації вугілля. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(41), 94-101. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/151217>
35. Фальштинський, В.С., **Саїк, П.Б.**, Дичковський, Р.О., Лозинський, В.Г., & Демидов, М.С. (2022). Аспекти впровадження акумулюючих енергосистем у

техногенному просторі вугільних шахт. *Збірник наукових праць НГУ*, (69), 94-104. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.094>

36. Лозинський, В., Фальштинський, В., Саїк, П., & Дичковський, Р. (2024). *Інтенсифікація процесу газифікації вуглецевмісної сировини фізичними полями*. Дніпро, Україна: Герда, 104 с. ISBN 978-617-8185-18-3

37. Falshtynskyi, V., Saik, P., Dychkovskyi, R., & Lozynskyi, V. (2021). *Optimization of energy efficiency of heat recuperator on the basis of underground coal gasification*. In *Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions* (pp. 276-293). Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing. <https://dx.doi.org/10.31713/m1017>

38. Дичковський, Р.О., Табаченко, М.М., Фальштинський, В.С., Лозинський, В.Г., & Саїк, П.Б. (2017). *Адаптація технології свердловинної підземної газифікації вугілля*. Дніпро, Україна: Національний гірничий університет, 189 с. ISBN 976-966-350-678-4

39. Лозинський, В.Г., & Саїк, П.Б. (2016). *Свердловинна підземна газифікація вугілля в умовах Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну*. Дніпро, Україна: Національний гірничий університет, 243 с. ISBN 978-966-350-633-3

40. Саїк, П.Б., & Лозинський, В.Г. (2024). *Спосіб утилізації діоксиду вуглецю*. Патент на корисну модель UA №156354, Опубл. 16.06.2024. Бюл. №24. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1804778/>

41. Саїк, П.Б., & Лозинський, В.Г. (2024). *Спосіб управління станом гірського масиву при підземній газифікації твердого палива*. Патент на корисну модель UA №156406, Опубл. 19.06.2024. Бюл. №25. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1805627/>

42. Фальштинський, В.С., Саїк, П.Б., Дичковський, Р.О., & Лозинський, В.Г. (2024). *Спосіб підземної газифікації твердого палива*. Патент на винахід UA №127929, Опубл. 14.02.2024. Бюл. №7. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1784136/>

43. Саїк, П.Б., Лозинський, В.Г., Анісімов, О.О., Черняєв, О.В., & Рисбеков, К.Б. (2024). *Спосіб дослідження зразків гірничої породи на стиск при нагріванні*. Патент на корисну модель UA №156789, Опубл. 07.08.2024. Бюл. №32. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1813627/>

44. Лозинський, В.Г., Саїк, П.Б., Фальштинський, В.С., & Дичковський, Р.О. (2023). *Спосіб підземної газифікації твердого палива*. Патент на корисну модель UA №152841, Опубл. 19.04.2023. Бюл. №16. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1733061/>

45. Фальштинський, В.С., Саїк, П.Б., Дичковський, Р.О., & Лозинський, В.Г. (2021). *Спосіб підземної газифікації твердого палива*. Патент на корисну модель UA №149211, Опубл. 27.10.2021. Бюл. №43. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1635240/>

46. Саїк, П.Б., Дичковський, Р.О., Лозинський, В.Г., & Фальштинський, В.С. (2021). *Стенд для дослідження процесів газифікації твердого палива*. Патент на корисну модель UA №148572, Опубл. 25.08.2021. Бюл. №34. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1612463/>

47. Фальштинський, В.С., Саїк, П.Б., Дичковський, Р.О., Лозинський, В.Г., & Кабана, Е.К. (2020). Спосіб утилізації відходів при газифікації вугілля. Патент на винахід UA №121987, Опубл. 25.08.2020. Бюл. №16. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1449306/>

48. Саїк, П.Б., Лозинський, В.Г., Сай, К.С., Петльований, М.В. (2018). Спосіб транспортування генераторного газу при свердловинній підземній газифікації вугілля. Патент на винахід UA №128116, Опубл. 10.09.2018. Бюл. №17. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/238254/>

49. Фальштинський, В.С., Дичковський, Р.О., Руських В.В., Саїк, П.Б., & Лозинський, В.Г. (2016). Стенд для дослідження процесів газифікації пластів твердого палива. Патент на винахід UA №112375, Опубл. 25.08.2016. Бюл. №16. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/726852/>

50. Саїк, П.Б. (2024). Взаємозв'язок між математичними моделям та експериментальними даними при дослідженні процесів підземної газифікації вугілля. У *Матеріалах XIV міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна»* (с. 245-247). Дніпро, Україна. Режим доступу: https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/166925/Scientific_Spring_2024-245-247.pdf?sequence=1

51. Саїк, П.Б., & Гуназа, К.Г. (2024). Аналіз технологічних та технічних рішень з утилізації вуглекислого газу при видобутку вугілля. У *Матеріалах XVII міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 75-76). Східниця, Україна. <https://doi.org/10.33271/usme17.075>

52. Saik, P., Lozynskyi, V., & Yankin, D. (2024). On the question of sorption processes in underground gasification of coal. In *Information society: technological, economic and technical aspects of formation* (pp. 130-132). Ternopil, Ukraine – Opole, Poland. Retrieved from <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1545/>

53. Саїк, П.Б. (2023). До питання розвитку гірничих робіт при газифікації вугілля. У *Матеріалах XIII міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна»* (с. 285-287). Дніпро, Україна. Режим доступу: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2023/Scientific_Spring_2023.pdf

54. Saik, P., Lozynskyi, V., & Demydov, M. (2023). Prerequisites of the production of low-rank coal. In *Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference “Distance education as the main problem of young people”* (pp. 287-289) Madrid, Spain. Retrieved from <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2023/12/DISTANCE-EDUCATION-AS-THE-MAIN-PROBLEM-OF-YOUNG-PEOPLE.pdf>

55. Саїк, П., Анісімов, О., & Коверя, А. (2023). До питання освоєння низькосортного вугілля. У *Матеріалах XVI міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 41-42). Східниця, Україна. <https://doi.org/10.33271/usme16.041>

56. Saik, P., Lozynskyi, V., Falshtynskyi, V., & Yankin, D. (2022). To the question of research into the rock mass stress-strain state around the underground gas generator. In *XXII International Scientific and Practical Conference “Multidisciplinary academic research, innovation and results”* (pp. 682-685). Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.22>

57. **Saik, P., & Lozynskyi, V.,** (2020). Prerequisites for creation mining and chemical enterprise. In *International scientific conference priority development fields of the European research area* (pp. 70-73). Riga, Latvia. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-84-6-20>

58. **Саїк, П., Дичковський, Р., Лозинський, В., & Фальштинський, В.** (2020). До питання моделювання системи підземного газогенератора. У *Матеріалах міжнародної конференції «Український гірничий форум»* (с. 54-59). Дніпро, Україна: НТУ «Дніпровська політехніка». <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/156743>

59. **Саїк, П., & Янкін, Д.** (2020). Передумови впровадження геотехнології підземної газифікації. У *Матеріалах XIV міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 77-78). Бердянськ, Україна. <https://doi.org/10.33271/usme14.077>

60. **Saik, P., Lozynskyi, V., Babii, Yu., & Teodorovych, V.** (2019). Features of georeactor systems formation in the underground coal mine. In *Materials of the International scientific and practical conference “Physical and chemical geotechnologies-2019”* (pp. 12-14). Dnipro, Ukraine: Dnipro University of Technology.

61. **Saik, P., Smoliar, M., Lozynskyi, V.** (2019). Facility for research into gasification processes of solid fossil fuels. In *Ukrainian School of Mining Engineering* (pp. 77-78). Skhidnytsia, Ukraine. <https://doi.org/10.33271/usme13.077>

62. **Saik, P.B., Lozynskyi, V.G., & Cabana, E.C.** (2017). Innovative prospects for domestic waste utilization in underground gasifiers. In *II International scientific and technological internet-conference “Innovative development of mining industry”* (p. 112). Kryvyi Rih, Ukraine: Kryvyi Rih National University.

63. **Саїк, П., & Лозинський, В.** (2016). Генераторний газ як альтернатива природному газу. У *Матеріалах II міжнародної науково-технічної конференції «Газогідратні технології у гірництві, нафтогазовій справі, геотехніці та енергетиці»* (с. 34-35). Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/323368998_Generatornij_gaz_ak_alternativa_prirodnomu_gazu

64. **Саїк, П., & Лозинський, В.** (2016). Розвиток та впровадження технології підземної газифікації вугілля. У *Матеріалах X міжнародної науково-практичної конференції «Школа підземної розробки»* (с. 17-18). Бердянськ, Україна. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/153791>

Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві: [1, 4, 29, 58] – розробка математичної моделі теплообміну; [2, 5, 7, 9, 10, 14, 27] – проведення експериментальних досліджень, аналіз та обробка результатів; [3, 6, 23, 31, 43, 46, 49, 50, 61] – формування методики проведення досліджень; [4, 16, 18, 26, 28, 56, 57] – розрахунок та аналіз геомеханічної ситуації навколо підземного газогенератора; [8, 13, 25, 35, 37, 53, 63] – аналіз гірничотехнічних умов; [11, 15, 33, 55, 59] – аналіз трендів вугільної промисловості України; [12, 30, 34, 52] – обґрунтування параметрів матеріально-теплого балансу процесу газифікації; [17, 19, 24, 36] – дослідження температурного поля навколо вогневого вибою; [20, 38, 39, 51, 54, 60, 62, 64] – аналіз літературних джерел, опрацювання та систематизація даних; [22] – економічна оцінка технології газифікації; [40 – 42, 44, 45, 47, 48] – розробка технології та способів підземної газифікації вугілля й утилізації вуглекислого газу.

АНОТАЦІЯ

Саїк П.Б. Наукові основи підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2025.

Захищаються встановлені залежності: зміни критичних довжин окислювальної зони підземного газогенератора від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта з урахуванням теплотворної здатності генераторного газу; 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 теплотворної здатності генераторного газу від способів подачі дуттьової суміші до площини підземного газогенератора. Запропоновано коефіцієнт утилізації вуглекислого газу при підземній газифікації вугілля, що оцінюється його концентраціями у складі дуттьової суміші та генераторному газі. 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.

Створено низку нових методик дослідження процесів підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу та надано рекомендації щодо оптимізації режимів подачі дуттьових сумішей при газифікації вугілля. Обґрунтовано параметри керування процесом підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу у складі дуттьової суміші та в техногенному просторі підземного газогенератора, що покладено в основу розробки онлайн-інструментарію з дослідження вищезазначених процесів. Розроблено технологію утилізації вуглекислого газу при підземній газифікації вугілля.

Ключові слова: підземна газифікація, вугілля, утилізація, вуглекислий газ, генераторний газ, вогневий вибій, підземний газогенератор, гірський масив, математична модель, керування, оптимізація, економічна оцінка.

ABSTRACT

Saik P.B. Scientific foundations of underground coal gasification with carbon dioxide utilization. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation submitted for the Doctorate Degree in Technical Sciences in the specialty 05.15.02 – Underground Mining of Mineral Deposits. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2025.

The presented dissertation is a completed scientific-research work in which the urgent scientific-technical problem of optimizing the processes of coal mining by underground gasification with carbon dioxide utilization in the technogenic environment is solved, based on the patterns of change in the parameters of formation

of the underground gasifier active zones and carbon dioxide utilization, and make it possible to form a single integrated control system for the underground coal gasification process, which can become a catalyst for the restoration of economic activity, creation of new jobs and attraction of investments in the development of mining regions.

Based on the analysis of global coal mining trends, it has been determined that in the coming decade coal will remain a key element of the global energy balance, especially in developing countries and regions with a significant dependence on traditional energy sources. For Ukraine, where the coal industry remains an important component of the energy sector, the issue of its transformation in the context of global decarbonization is of particular importance. Military actions and related infrastructure destruction complicate the implementation of renewable energy sources, which necessitates the search for effective technological solutions to improve environmental safety and productivity of the coal industry.

It has been found that the deterrent to traditional coal mining and processing technologies in the near future is their significant environmental impact, high carbon dioxide emissions, and growing pressure from international decarbonization initiatives. Therefore, in the face of such restrictions, an important direction for the development of the coal industry is the introduction of new technologies, including underground coal gasification, which will increase the efficiency of coal use, and the additional integration of carbon dioxide utilization technologies will facilitate the environmental adaptation of the Ukrainian coal industry to modern global requirements.

The research deals with a set of interrelated tasks structured into a single system for analysis, study, and development of practical recommendations, methods, and techniques for underground coal gasification with carbon dioxide utilization based on the identified patterns of change in the parameters of active underground gasifier zones, which allows optimizing thermal, gas-dynamic, physical-chemical processes in the rock mass, providing efficient utilization of carbon dioxide in the technogenic environment and energy efficiency of the coal gasification process.

The methodology for modeling the technology of underground coal gasification, which uses the author's patented laboratory facilities that accurately reproduce the mining-geological conditions of occurrence of coal seams, has been substantiated. A significant contribution has been made to the study of physical-mechanical properties of a rock mass under the influence of a high-temperature field, including the analysis of the relationship between temperature and the uniaxial compressive strength of the rock and its mineralogical composition, as well as with main parameters of crystal structures.

Methods for studying the parameters of the temperature field influence on the rock mass and the formation parameters of the underground gasifier outgassing space, including complex temperature measurements, analysis of heat transfer parameters and parameters of the blast mixture supply, have been developed.

As a result of the conducted research, a mathematical model of the gasification process heat exchange has been developed, which describes the temperature change in the “coal – producer gas” medium at the phase transition boundary. The model indicates a linear temperature change at a certain gasification area with one inclination angle to the phase transition boundary, as well as another inclination angle after this

boundary, which corresponds to the Stefan condition. In addition, the revealed parabolic dependence of the phase transition boundary displacement on gasification duration indicates that the rate of this process depends on the temperature regime, the intensity of chemical reactions, and the physical-chemical properties of coal.

A mathematical model of temperature distribution in a rock sample during heating has also been developed, which provides a comprehensive approach to heat transfer analysis in underground gasification conditions. The model takes into account the influence of the temperature field from the contact plane between the combustion face and the coal seam roof.

The developed mathematical models were tested in laboratory conditions, which confirmed their accuracy and made it possible to specify a number of parameters. This created the basis for further application of models in real conditions of underground coal gasification, as well as for the development of recommendations for optimizing technological processes.

Based on the conducted laboratory studies, it has been found that the transition between the oxidative and reduction zones of the gasifier is a critical phase of gasification, since there is an intensive heat exchange, which directly affects the energy efficiency of the gasification process. The oxidative zone of the combustion face experiences the maximum thermal impact, which stimulates chemical gasification reactions, but at the same time can lead to unpredictable thermal destruction of the immediate roof rocks. Therefore, understanding these processes is important for developing methods to control and optimize gasification conditions, as well as to increase the stability of underground gasifier.

It has been determined that the length of the oxidative zone of an underground gasifier during gasification of coal seams with a thickness from 0.6 to 1.2 m reaches its critical value ranging from 10.12 to 10.45 m. Under such conditions, the gasification process is efficient.

The control modes of the coal gasification process during the supply of the blast mixture have been determined based on their supply pressure and geometric parameters of the outgassed space area of the underground gasifier, depending on the duration of the gasification process and the rate of the combustion face advance in the oxidative and reduction zones of the gasifier. Taking these factors into account makes it possible to optimize the conditions for supplying the blast mixture, which, in turn, reduces energy costs and increases the gasification process efficiency.

The change in the rock mass compressive strength for the mining-geological conditions of SE Lvivuhillya and PJSC DTEK Pavlohraduhillya under the influence of temperature in the zones of chemical reactions of the combustion face, described by exponential dependences, has been studied. It has been found that at a temperature of 600°C, the rock strength increases by almost 2.4 times. In the studied rock samples, the most common oxides are SiO₃ (quartz – 80%), kaolinite (9%) and muscovite (7%). Temperature rise above 560°C increases the quartz content and decreases the kaolin content, which changes the mechanical properties of rocks by reducing the dislocation density in quartz and increasing it in kaolinite.

Qualitative and quantitative parameters of carbon dioxide utilization in the blast mixture composition have been determined, with utilization rates ranging from 68.83

(8.9 million m³) to 85.87% (23.71 million m³). The logarithmic dependence of the change in the volume of the coal-overlying formation stratification cavities on the coal seam thickness has been revealed. The effective time of air-carbon dioxide blast supply is determined by a linear dependence on the coal seam thickness and carbon dioxide concentration in the producer gas, where the critical value is 25%. This makes it possible to predict the duration of the gasifier operation with carbon dioxide utilization at a maximum calorific value of the producer gas of 6.3-6.6 MJ/m³.

It has been found that the combined supply of blast to the underground gasifier provides a double supply of oxidizing agent (O₂) to the combustion face plane, which, in turn, intensifies the gasification process due to the expansion of reaction zones. The change in the blast supply method can increase the average concentration of combustible gases (CO, CH₄, H₂) by 8.64%, and the combustion heat increases by an average of 2.02 MJ/m³. This makes it possible to effectively adapt the blast supply methods to the reaction zones of an underground gasifier and promptly adjust its operating modes to maximize the result.

The dependences of CO₂ utilization on the size of utilization zones, pressure and temperature parameters, determined by the coal seam thickness, have been obtained. A single underground gasifier operating on seams with a thickness of 0.6 to 1.2 m can utilize 26 to 29% of CO₂.

Based on the results obtained, a web-based tool UCG-1 has been created, which is designed to determine the parameters of the efficiency of operating the underground coal gasification technology with carbon dioxide utilization. This tool is affordable and easy to use, making it useful for a wide range of specialists.

The “Recommendations for optimizing the blast mixture supply modes during coal gasification”, “Methodology for determining the parameters for the formation of outgassing space cavities of an underground gasifier”, “Methodology for predicting the gasification process efficiency of carbon-containing raw materials with carbon dioxide utilization” have been developed.

Technologies for coal gasification and carbon dioxide utilization have been developed: “Method of Carbon Dioxide Utilization” (UA No.156354), “Method of Rock Mass State Management During Underground Solid Fuel Gasification” (UA No.156406), “Method for Underground Solid Fuel Gasification” (UA No.127929), “Method for Underground Solid Fuel Gasification” (UA No.152841), “Method for Underground Solid Fuel Gasification” (UA No.149211).

The economic assessment of the feasibility of applying the developed technology and technological solutions makes it possible to obtain a 24.8% increase in revenue from the sale of producer gas. In addition, a comprehensive approach to CO₂ utilization during coal seam gasification from a coal seam thickness of 0.64 m indicates additional revenue from CO₂ utilization for each ton.

Keywords: underground gasification, coal, utilization, carbon dioxide, producer gas, combustion face, underground gasifier, rock mass, mathematical model, management, optimization, economic assessment.

САЇК Павло Богданович

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ
ВУГІЛЛЯ З УТИЛІЗАЦІЄЮ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ**

(Реферат)

Підписано до друку 09.04.2025. Формат 60×90/16.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,9.
Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. №25

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19