

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

**ЛОЗИНСЬКИЙ Василь Григорович**



УДК 622.012.2:622.278.004.82:662.769

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВОДНЕВО-ОРІЄНТОВАНОЇ  
ПІДЗЕМНОЇ КОГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ**

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:**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри геоінженерії  
Національного технічного університету  
«КПІ ім. Ігоря Сікорського» (м. Київ)

**ГАЙКО  
Геннадій  
Іванович**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри аерогідромеханіки  
та енергомасопереносу Дніпровського  
національного університету  
ім. Олеся Гончара (м. Дніпро)

**ДРЕУС  
Андрій  
Юлійович**

доктор технічних наук, старший  
науковий співробітник, завідувач  
відділу проблем технологій підземної  
розробки вугільних родовищ Інституту  
геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова  
Національної академії наук України  
(м. Дніпро)

**ЗБЕРОВСЬКИЙ  
Василь  
Владиславович**

Захист відбудеться 16 січня 2026 р. об 11<sup>00</sup> 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 грудня 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 одним із найпоширеніших енергетичних ресурсів, на який припадає значна частка виробництва електроенергії у багатьох країнах. Незважаючи на активний розвиток відновлюваних джерел енергії, вугілля продовжує бути надійним енергетичним ресурсом завдяки відносній доступності, значним запасам і можливості використання в металургії та хімічній промисловості.

В умовах глобальних економічних та екологічних викликів, пов'язаних зі зміною клімату та підвищенням вимог до екологічної стійкості, вугільна промисловість потребує модернізації та впровадження інноваційних технологій. Одним із перспективних напрямів є підземна газифікація вугілля (ПГВ). Дана технологія дає змогу залучати до використання важкодоступні та малопродатні для традиційного видобутку вугільні пласти. ПГВ не тільки знижує витрати на видобуток, а й дає змогу отримувати генераторний газ, який є цінним енергетичним продуктом для промислових і побутових потреб. Переваги цієї технології полягають у зменшенні обсягів гірничих робіт, скороченні техногенного навантаження на навколишнє середовище та підвищенні ефективності використання запасів вугілля. Водночас ефективність ПГВ значною мірою залежить від інтенсивності термохімічних реакцій у підземному газогенераторі. Однією з ключових проблем є недостатня активність окислювально-відновних процесів у зв'язку зі значною втратою тепла у вміщуючі породи, що призводить до зниження теплотворної здатності газу. Традиційні способи інтенсифікації мають певні обмеження, збільшують енерговитрати і, відповідно, собівартість отриманого газу.

У контексті переходу до низьковуглецевої енергетики особливої уваги набуває підземна когазифікація вугілля з орієнтацією на отримання водню як висококалорійного та екологічно чистого енергоносія. Такий підхід поєднує переваги використання вугільних ресурсів із виробництвом стратегічно важливого енергоносія майбутнього, що має широке промислове застосування та відповідає цілям декарбонізації.

Тому актуальною науковою проблемою є розробка наукових основ воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля, які ґрунтуються на закономірностях зміни параметрів термохімічних процесів у реакційному каналі при формуванні високотемпературної зони окислення підземного газогенератора, що дає можливість інтенсифікувати вигазовування вугільних пластів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка» відповідно до плану держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України на період 2016 – 2025 рр.:

– ГП-487 «Наукове обґрунтування та розробка енергоефективних маловідходних технологій видобування вуглеводневої та мінеральної сировини», 2016 – 2018 рр., № держреєстрації 0116U008041 (основний виконавець);

– ГП-489 «Наукові основи формування єдиної системи збереження та генерації енергії об'єктів паливно-енергетичного комплексу України», 2017 – 2019 рр., № держреєстрації 0117U001127 (основний виконавець);

– ГП-500 «Синтез, оптимізація та параметризація інноваційних технологій освоєння ресурсів газовугільних родовищ», 2019 – 2021 рр., № держреєстрації 0119U000248 (основний виконавець);

– ГП-503 «Геотехнологічні основи формування енергохімічних комплексів вугледобувних регіонів», 2020 – 2022 рр., № держреєстрації 0120U102084 (основний виконавець);

– ГП-511 «Науково-практичні засади структурних трансформацій вугледобувних підприємств на основі інноваційних технологій раціонального природокористування», 2022 – 2024 рр., № держреєстрації 0122U001301 (відповідальний виконавець);

– ГП-512 «Когазифікація вуглецевмісної сировини при вигазовуванні надтонких вугільних пластів з орієнтацією на отримання водню», 2023 – 2025 рр., № держреєстрації 0123U100985 (керівник);

– ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля», 2023 – 2025 рр., № держреєстрації 0123U101757 (основний виконавець).

Дисертаційна робота відповідає основним напрямкам розвитку паливно-енергетичного комплексу України на період до 2030 року, а також цілям Паризької кліматичної угоди, прийнятої в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату.

**Мета роботи** – обґрунтування та розробка наукових основ воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля шляхом інтенсифікації процесу газоутворення та оптимізації умов взаємодії вуглецевмісної сировини з реагентами дуття в реакційному каналі газогенератора із забезпеченням термодинамічної стабільності геореакторної системи при формуванні високотемпературної зони окислення.

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

1. Виконано бібліометричний аналіз та систематичний огляд літературних джерел технології підземної газифікації для визначення перспективних напрямів інтенсифікації процесу.

2. Встановлено вплив концентрації кисню у дутті на швидкість посування вогневого вибою та основні параметри процесу газифікації.

3. Визначено вплив використання магнітних полів для інтенсифікації процесу газифікації.

4. Розроблено та адаптовано чисельно-аналітичний підхід до моделювання процесу когазифікації для оцінки розподілу температури та концентрацій газів у реакційному каналі.

5. Розроблено математичну модель теплового балансу реакційного каналу на основі встановлених закономірностей теплової взаємодії високотемпературної зони окислення з вміщуючими породами та методику прогнозування теплового режиму процесу когазифікації.

6. Встановлено залежності між складом і теплотою згоряння генераторного газу при різних комбінаціях вуглецевмісної сировини в шихті і типів дуття, у тому числі за умов зниження енергії активації.

7. Обґрунтовано параметри технології підземної когазифікації вугілля, що враховує попереднє намагнічування парокисневого дуття та оптимізацію складу вуглецевмісної сировини для підвищення виходу водню.

8. Розроблено інтегрований підхід до багатокритеріальної оцінки (MCDM) удосконалених критеріїв придатності вугільних пластів із використанням методу індексу переваг (PSI).

9. Розроблено технологічну схему підземної когазифікації вугілля з орієнтацією на підвищене виробництво водню.

10. Визначено економічну ефективність технології підземної когазифікації вугілля на основі інкрементального порівняння показників та аналізу чутливості з розрахунком індексу переваг.

*Ідея роботи* полягає у використанні виявлених нових закономірностей зміни параметрів високотемпературної зони окислення підземного газогенератора для інтенсифікації процесу газоутворення та оптимізації умов взаємодії вуглецевмісної сировини з реагентами дуття, що забезпечує підвищення виходу водню та термохімічну стабільність геореакторної системи і формує засади нової науково обґрунтованої концепції перетворення твердого палива на генераторний газ.

*Об'єкт дослідження* – термохімічні та термодинамічні процеси підземної когазифікації вугілля, спрямовані на підвищення виходу водню шляхом інтенсифікації газоутворення та оптимізації умов взаємодії вуглецевмісної сировини з реагентами дуття.

*Предмет дослідження* – закономірності зміни параметрів високотемпературної зони окислення підземного газогенератора, які забезпечують ефективне газоутворення при комбінуванні дуттям та зміні вмісту вуглецевмісної сировини.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених завдань у роботі було використано комплексний метод теоретичних, експериментальних, аналітичних і чисельних методів дослідження, спрямованих на обґрунтування та розробку наукових основ воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля. Аналіз літературних джерел і результатів попередніх досліджень способів інтенсифікації процесу підземної газифікації виконано з використанням методологічного підходу PRISMA 2020. Систематизацію та семантичний аналіз проведено із використанням інструменту Elicit (Systematic Review Pro), а результати бібліометричного аналізу візуалізовано за допомогою програмного забезпечення VOSviewer. Лабораторні дослідження виконано на авторській запатентованій установці UA №112375 з дотриманням інваріантів та критеріїв подібності. Матеріально-тепловий баланс процесів газифікації та когазифікації визначено із застосуванням програмного продукту MT Balance. Аналітичні методи використано для визначення швидкостей посування вогневого вибою, впливу намагнічування дуття на вихід генераторного газу, розповсюдження температури в анізотропному породному масиві та теплообміну між вугільним пластом і вміщуючими породами під час підземної когазифікації вугілля. Дослідження розподілу температури, концентрацій компонентів і швидкостей газових потоків у реакційному каналі підземного газогенератора за різних складів дуття та умов когазифікації проведено за допомогою чисельного моделювання в середовищі Ansys Fluent. Придатність вугільних пластів до підземної когазифікації обґрунтовано із застосуванням методу багатокритеріального прийняття рішень PSI (метод індексу переваг). Економічну оцінку здійснено за методологією інкрементального порівняння показників з визначенням індексу переваг та проведенням аналізу чутливості.

### **Наукові положення, що виносяться на захист:**

1. Концентрація водню в генераторному газі процесу підземної когазифікації при застосуванні парокисневого дуття ( $O_2 - 42\%$ ,  $H_2O_{\text{пара}} - 10\%$ ) зі зниженням енергії активації з 200,0 до 179,8 кДж/моль змінюється лінійно, досягаючи максимуму (10,56%) при вмісті біомаси в шихті  $\geq 75\%$ , забезпечуючи оптимальне співвідношенням  $H_2/CO$  на рівні 0,6. Це дає можливість спрогнозувати теплотворну здатність генераторного газу (LHV) та ефективність ведення процесу воднево-орієнтованої підземної когазифікації, а також адаптувати синтез-газ до потреб хімічних технологій без зміни базових параметрів процесу когазифікації.

2. Ефективний час ( $t$ ) подачі парокисневого дуття ( $O_2 - 42\%$ ,  $H_2O_{\text{пара}} - 10\%$ ) у газогенератор при підземній когазифікації визначається циклічністю активізації окислювальної зони кисневим дуттям ( $O_2 - 42\%$ ) і залежить від теплового ефекту залучених органічних компонентів (суміш вугільного пилу і біомаси у співвідношенні 1:3) із сумарним внеском 63% вуглецю до базового значення вугілля як граничне значення. Це дає змогу прогнозувати режим роботи підземного газогенератора в температурному діапазоні 1000 – 1050°C.

3. Застосування намагніченого парокисневого дуття підвищує лінійну швидкість посування вогневого вибою з 1,37 до 1,54 м/добу, збільшуючи площу вигазовування на 12,4%, що забезпечує скорочення інтервалу реверсування з 2,6 до 2,0 діб при віддалені середини окислювальної зони на довжину 5,0 м від початкового значення. Врахування параметрів реверсування дає змогу запобігти надмірному видовженню реакційного каналу і забезпечить стабільну роботу геореакторної системи при інтенсифікації процесу когазифікації.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

#### *1. Вперше:*

– встановлено залежність впливу концентрації кисню у дутті на швидкість посування вогневого вибою газогенератора, апроксимовану за моделлю насичення типу Міхаеліса-Ментена;

– встановлено залежність зниження енергії активації реакцій газифікації під дією магнітного поля, яка спричиняє експоненціальне підвищення константи швидкості реакції, що відображається у значенні фактора  $F$ ;

– адаптовано чисельно-аналітичний підхід до моделювання процесу когазифікації вуглецевмісної сировини в реакційному каналі підземного газогенератора із використанням  $k-\epsilon$  турбулентної моделі та методу незмішуваного горіння з урахуванням густини розподілу ймовірностей (PDF);

– встановлено закономірності теплової взаємодії високотемпературної зони окислення з вміщуючими породами, які виражаються експоненціальним зниженням безрозмірної температури  $\theta$  зі збільшенням критерію Фур'є  $Fo$ , збільшенням кумулятивних теплових втрат  $\Delta Q$  з часом  $\tau$  та зменшенням відносних втрат тепла  $\eta$ ;

– розроблено та протестовано математичну модель теплового балансу реакційного каналу з урахуванням теплопровідності вугілля і вміщуючих порід, яка дає змогу визначати тепловий режим когазифікації та прогнозувати термостабільність високотемпературної зони окислення;

– встановлено залежності зміни нижчої теплоти згоряння генераторного газу процесу підземної когазифікації за різних поєднань вуглецевмісної сировини в шихті і типів окислювача;

– встановлено залежності зміни мольних часток складових генераторного газу процесу підземної когазифікації при магнітній активації парокисневого дуття за різних поєднань вуглецевмісної сировини;

– визначено граничні умови ефективного часу подачі парокисневого дуття з урахуванням циклічної активації високотемпературної зони окислення та теплового ефекту компонентів вуглецевмісної сировини;

– встановлено залежності впливу намагніченого парокисневого дуття на динаміку посування вогневого вибою та зміну періодичності реверсування дуттьових потоків.

2. *Отримала подальший розвиток* концепція воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля як інтегрованого термохімічного процесу, в якій враховано вплив складу вуглецевмісної сировини, типу дуття, параметрів високотемпературної зони окислення і зовнішніх фізичних впливів на тепловий баланс, кінетику реакцій і стабільність роботи геореакторної системи.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджується використанням апробованих методів теоретичних, експериментальних та чисельних досліджень, застосуванням основних положень теорії теплообміну, термодинаміки та кінетики хімічних реакцій, принципів математичної статистики, достатнім обсягом виконаних експериментів і високою достовірністю результатів аналітичних та експериментальних досліджень (збіжність отриманих результатів становить 82 – 96%).

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей протікання термохімічних процесів когазифікації вугілля, що враховують вплив складу вуглецевмісної сировини, типу дуття, параметрів високотемпературної зони окислення та зовнішніх фізичних впливів на тепловий баланс, кінетику реакцій і стабільність роботи геореакторної системи.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Обґрунтовано вибір пріоритетних способів інтенсифікації процесу підземної газифікації на основі методологічного підходу PRISMA з подальшим семантичним зіставленням термінів.

2. Визначено та обґрунтовано оптимальні параметри концентрації кисню у дутті, що забезпечують оптимальну швидкість вигазовування вугілля.

3. Обґрунтовано оптимальні режими роботи підземного газогенератора залежно від складу шихти, типу дуття та впливу магнітного поля для підвищення виходу водню.

4. Розроблено методику прогнозування теплового режиму газогенератора на основі математичної моделі теплового балансу реакційного каналу процесу когазифікації.

5. Розроблено методику визначення граничних умов ефективного часу подачі парокисневого дуття з урахуванням циклічної активації високотемпературної зони окислення, що забезпечує стабільну роботу підземного газогенератора.

6. Обґрунтовано параметри керування процесом когазифікації для запобігання надмірному видовженню реакційного каналу та забезпечення стабільності геореакторної системи.

7. Розроблено технологічну схему підземної когазифікації вугілля з орієнтацією на підвищене виробництво водню, яка враховує попереднє намагнічування парокисневого дуття та оптимізацію складу вуглецевмісної сировини.

8. Обґрунтовано економічну ефективність технології підземної когазифікації на основі інкрементального порівняння показників з визначенням індексу переваги.

9. Удосконалено критерії придатності вугільних пластів до підземної газифікації вугілля з урахуванням коефіцієнта інтенсифікації (когазифікація).

10. Запропоновано інтегрований підхід для оцінки придатності вугільних пластів до впровадження технології підземної когазифікації на основі багатокритеріального аналізу з використанням методу індексу переваг (PSI).

**Реалізація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи протягом 2016 – 2025 рр. були впроваджені у навчальні програми підготовки бакалаврів та магістрів за дисциплінами: «Фізико-хімічна геотехнологія», «Інноваційні технології розробки родовищ корисних копалин», «Спеціальні способи добування корисних копалин» у НТУ «Дніпровська політехніка». На основі виконаних досліджень розроблено низку методик і рекомендацій, а також отримано акт впровадження: «Методика прогнозу ефективності процесу підземної когазифікації з орієнтацією на отримання водню» (ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»), «Методика багатокритеріальної оцінки придатності вугільних пластів шахти «Західно-Донбаська» до підземної когазифікації (ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»), «Методика оцінки високоефективного використання техногенних родовищ вуглезбагачення України» (ПАТ «Львівська вугільна компанія»), «Рекомендації з оптимізації режимів подачі дуттьових сумішей при газифікації вугілля» (ТОВ «ЗАХІД ТРЕЙД РЕСУРС»), «Рекомендації щодо технічного та технологічного удосконалення комплексної утилізації відходів вуглезбагачення на техногенних об'єктах ПАТ «Львівська вугільна компанія» (ПАТ «Львівська вугільна компанія»), акт впровадження «Наукові засади технології воднево-орієнтованої когазифікації вугілля» (ПАТ «Львівська вугільна компанія»).

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні проблеми, мети, ідеї, завдань досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій щодо їх практичної реалізації; особисто проведено бібліометричний аналіз і систематичний огляд літератури з технології підземної газифікації та когазифікації вугілля; встановлено вплив параметрів дуття і магнітного поля на швидкість посування вогневого вибою і склад генераторного газу; розроблено чисельно-аналітичний підхід і математичну модель теплового балансу реакційного каналу; визначено закономірності зміни генераторного газу при зміні складу вуглецевмісної сировини; виконано економічну оцінку ефективності технології та вдосконалено критерії придатності вугільних пластів для технології підземної когазифікації вугілля. Автор безпосередньо здійснював чисельне моделювання, 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» / “Ukrainian School of Mining Engineering” (Бердянськ, 2019; Східниця, 2020, 2023, 2024); “Essays of Mining Science and Practice” (Дніпро, Україна, 2023, 2024); “Information Society: Technological, Economic and Technical Aspects of Formation” (Тернопіль, Україна – Ополе, Польща, 2024); “Distance Education as the Main Problem of Young People” (Мадрид, Іспанія, 2023); “Multidisciplinary academic research, innovation and results” (Прага, Чехія, 2022); «Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: Міжгалузеві диспути» (Київ, Україна, 2021); “Priority Development Fields of the European Research Area” (Рига, Латвія), «Український гірничий форум» (Дніпро, Україна, 2020); “Physical & Chemical Geotechnologies” (Дніпро, Україна, 2018, 2019); «Школа підземної розробки» (Бердянськ, Україна, 2016 – 2018); “Innovative Development of Mining Industry” (Кривий Ріг, Україна, 2017); «Газогідратні технології у гірництві, нафтогазовій справі, геотехніці та енергетиці» (Дніпро, Україна, 2016); “Zagrozenia Naturalne” (Тарганіце, Польща).

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковані у 82 наукових працях, у тому числі: 31 стаття у журналах, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science, з яких 11 відносяться до кватилів Q1-Q2; 13 статей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science; 6 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; 18 тез доповідей у матеріалах всеукраїнських і міжнародних конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 467 найменувань, 3 додатків на 27 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 472 сторінки, у тому числі 121 рисунок та 23 таблиці.

## 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 систематичному аналізу світового досвіду досліджень підземної газифікації вугілля, узагальненню передумов і тенденцій розвитку технології, бібліометричній оцінці наукової активності та визначенню провідних напрямів інтенсифікації процесу газифікації на основі проведення критичного аналізу.

Попри глобальний перехід до відновлюваних джерел енергії, традиційна вугільна енергетика продовжує відігравати важливу роль у забезпеченні енергетичної безпеки багатьох країн. Щільне поширення вугілля, наявність

розвиненої інфраструктури його видобутку та споживання, а також значні розвідані запаси зумовлюють збереження його частки в глобальному енергетичному балансі. Водночас інтенсивне спалювання вугілля супроводжується викидами парникових газів, передусім діоксиду вуглецю, що викликає підвищену критику з боку екологічної спільноти. У відповідь на ці виклики активно розвиваються так звані «чисті» вугільні технології (Clean Coal Technologies), які спрямовані на зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Серед них одне з провідних місць займає газифікація вугілля – процес, що дає змогу перетворювати вугілля на генераторний газ (синтез-газ) для подальшого використання в енергетичних або хімічних технологіях. Порівняно з прямим спалюванням, газифікація забезпечує вищу енергоефективність та нижчий рівень викидів. Особливу увагу дослідників привертає технологія ПГВ, яка дає змогу залучати до розробки забалансові запаси без потреби у створенні традиційної інфраструктури, з мінімальним впливом на земну поверхню.

На основі аналізу передумов розвитку підземної газифікації вугілля встановлено, що дана технологія, маючи тривалу історію становлення, є перспективною альтернативою традиційного способу видобутку вугілля, оскільки забезпечує отримання генераторного газу з можливістю його конверсії у синтетичний газ та/або водень.

Проведений бібліометричний аналіз публікацій у наукометричній базі даних Scopus (1970 – 2025 рр.) показав значний інтерес до підземної газифікації з чіткою хвилеподібною динамікою. З 2005 року спостерігається стабільне збільшення кількості публікацій, що свідчить про поступове відновлення інтересу до даної технології. Особливо стрімко збільшується кількість наукових праць за напрямом когазифікації, що пояснюється її відповідністю принципам циркулярної економіки, можливістю залучення біомаси та підвищеним потенціалом для виробництва водню.

Встановлено, що інтенсивність наукової активності у сфері підземної газифікації вугілля суттєво залежить від макроекономічних чинників. Пікові значення публікацій в рецензованих виданнях збігаються з періодами підвищення світових цін на нафту (1979 – 1983, 2007 – 2008, 2011 – 2014 роки), що підтверджує тенденційність наукових досліджень при появі глобальних енергетичних викликів та потребі розвитку енергонезалежних технологій.

Аналіз регіональної структури публікаційної активності показав, що абсолютним лідером є Китай, який формує найпотужніші міжнародні наукові зв'язки. Активну участь у дослідженнях беруть також науковці зі США, Польщі, Індії, Канади, Великої Британії, Австралії та України, утворюючи міжнародні та регіональні наукові кластери. Вагомий внесок із провадження та дослідження технологій підземної газифікації вугілля зробили як вітчизняні науковці, такі як: Бондаренко В.І., Гайко Г.І., Дичковський Р.О., Інкін О.В., Колоколов О.В., Саїк П.Б., Садовенко І.О., Табаченко М.М., Фальштинський В.С., так і закордонні – Chen Y., Durdán M., Kačur J., Kapusta K., Laciak M., Liang J., Liu S., Stańczyk K., Xin L. та багато інших. Ними було вивчено кінетичні, термодинамічні та гідродинамічні явища при ПГВ, питання керування фронтом горіння, складу генераторного газу, а також безпечності та стабільності геореакторних систем у різних геологічних умовах. Значна увага приділялась моделюванню тепломасообмінних процесів, розробці програмних засобів для чисельного прогнозування параметрів газифікації



**Другий розділ** дисертаційної роботи присвячено дослідженню хімізму процесів підземної газифікації вугілля, встановленню закономірностей взаємодії вуглецю з реагентами дуття, а також експериментальному вивченню впливу конструктивних і технологічних параметрів підземного газогенератора на інтенсифікацію процесу газоутворення.

Процес підземної газифікації вугілля є складним багатостадійним термохімічним перетворенням, що охоплює піроліз, горіння, газифікацію і вторинні реакції, які визначають склад і теплотворну здатність генераторного газу. Незважаючи на значну кількість досліджень, на сьогодні відсутній єдиний механізм опису хімічних реакцій, тому покладатися виключно на хімізм процесу не є достовірним варіантом. З огляду на це, проведено серію експериментальних досліджень, результати яких порівнювалися з аналітичними розрахунками та даними напівпромислової станції газифікації. Експериментальні дослідження проводилися на запатентованій стендовій установці UA №112375 (рис. 2а,б) з дотриманням інваріантів та критеріїв подібності.

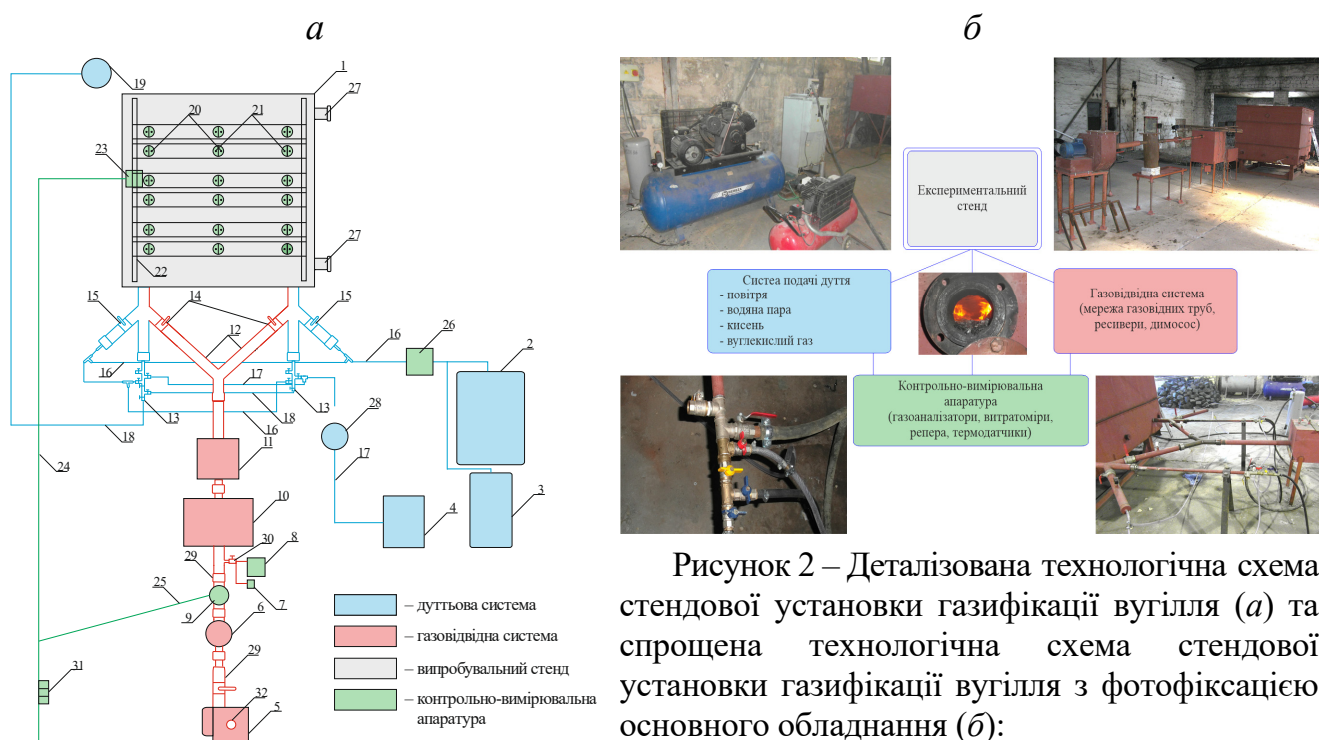


Рисунок 2 – Деталізована технологічна схема стендової установки газифікації вугілля (а) та спрощена технологічна схема стендової установки газифікації вугілля з фотофіксацією основного обладнання (б):

1 – металевий ящик; 2 – робочий компресор; 3 – резервний компресор; 4 – парогенератор; 5 – димосос; 6 – вапняковий фільтр очищення газу; 7 – портативний газоаналізатор ВХ-170; 8 – аналізатор газу трикомпонентний Gasboard-3200L; 9 – газовий витратомір; 10 – бак-охолоджувач; 11 – бак-розширник; 12 – газовідвідний трійник; 13 – керований високонапірний трубопровід; 14 – шарнірні крани газовідвідної гілки для реверсування; 15 – шарнірні крани повітроподавальної гілки для реверсування; 16 – повітряний шланг високого тиску; 17 – гумовий високотемпературний шланг; 18 – кисневий шланг; 19 – кисневий балон; 20 – отвори для встановлення реперних датчиків; 21 – отвори для встановлення термопар; 22 – установка для оптичних датчиків; 23 – з'єднувальна коробка мережних кабелів термопар і реперних датчиків опускань; 24 – мережний кабель термопар і реперних датчиків; 25 – мережний кабель витратоміра; 26 – витратомір для визначення подачі дуттьової суміші; 27 – розпалювально-контролюючий отвір; 28 – паровий ресивер; 29 – газовідвідний трубопровід; 30 – штуцер для відбору проб генераторного газу; 31 – перетворювачі сигналів; 32 – газовідвідна труба; 33 – отвір для подачі дуття і відведення газів; 34 – відстійник для конденсату

За сировину, що піддавалася газифікації, було вибрано кам'яне вугілля марки Г (газове), яке превалює в енергетичному балансі і запаси якого в Україні надзвичайно великі. Експериментальні дослідження на стендовій установці супроводжувалися зміною параметрів реагентів дуття. Було застосовано п'ять основних попередньо апробованих типів дуття, а саме:

I – повітряне ( $O_2$  – 21%,  $N_2$  – 79%);

II – пароповітряне ( $O_2$  – 21%,  $N_2$  – 69%,  $H_2O_{\text{пара}}$  – 10%);

III – кисневе ( $O_2$  – 42%,  $N_2$  – 58%);

IV – парокисневе ( $O_2$  – 42%,  $N_2$  – 48%,  $H_2O_{\text{пара}}$  – 10%);

V – вуглекислий газ + кисень ( $O_2$  – 21%,  $CO_2$  – 10%,  $N_2$  – 69%).

Серія експериментальних досліджень чергувалася зміною дуття. Після кожної наступної зміною режиму дуття відбувався перехід на повітряне дуття. Тривалість перехідного режиму на дутті склала 1 годину.

Розроблені й апробовані на стендовій установці з моделювання процесу підземної газифікації вугілля конструкторські та технічні рішення з підведення дуття безпосередньо на вогневий вибій газогенератора зумовлюють інтенсифікацію процесу газифікації вугільних пластів з урахуванням конкретних гірничо-геологічних умов. Відповідно три можливих конструкції газогенератора були предметом дослідження ефективності процесу газифікації:

– без гнучкого трубопроводу з направленням дуття на вогневий вибій реакційного каналу (конструкція-1);

– з гнучкими трубопроводами з направленням дуття через перфоровані насадки на вогневий вибій реакційного каналу (конструкція-2);

– з гнучкими трубопроводами й активатором у реакційному каналі з направленням дуття на вогневий вибій реакційного каналу (конструкція-3).

У результаті проведення серії експериментальних досліджень з моделювання процесу газифікації обґрунтовано вплив конструкторських і технологічних рішень на інтенсифікацію процесу підземної газифікації вугілля (рис. 3а,б).

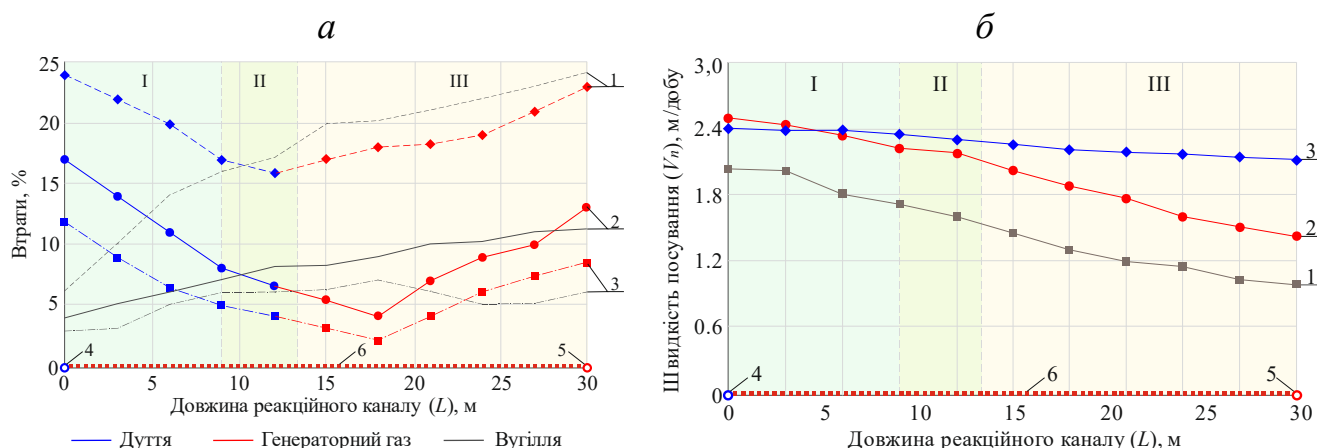


Рисунок 3 – Залежності втрати дуття, генераторного газу і вугілля залежно від конструкції газогенератора (а) і залежності впливу конструкцій з підведення дуття в реакційний канал газогенератора на рівномірність посування вогневого вибою (б): 1 – конструкція-1; 2 – конструкція-2; 3 – конструкція-3; 4 – повітроподавальна свердловина; 5 – газовідвідна свердловина; 6 – лінія вогневого вибою газогенератора; I – окислювальна зона; II – перехідна зона; III – відновлювальна зона

Застосування гнучких трубопроводів з активаторами дає змогу забезпечити рівномірне посування вогневого вибою, скорочення часу досягнення активного режиму та зниження потреби в реверсуванні. Встановлено, що конструкція газогенератора з направленою подачею дуття на зони реакційного каналу підвищує ступінь вигазовування до 12%, збільшує теплотворну здатність газу до 18% і розширює сферу застосування ПГВ на тонких пластах.

Порівняльний аналіз експериментальних, напівпромислових і розрахункових даних підтвердив високу збіжність результатів щодо виходу генераторного газу за різних режимів підземної газифікації вугілля. Застосоване програмне забезпечення MT Balance демонструє адекватність прогнозування складу синтез-газу, зокрема для енергетично значущих компонентів (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), з точністю 85–95% залежно від типу дуття (рис. 4). Встановлено, що підвищення концентрації O<sub>2</sub> у дутті сприяє збільшенню виходу горючих компонентів та підвищенню нижчої теплотворної здатності газу, що підтверджує ефективність використання кисневого і парокисневого дуття.

Аналіз впливу концентрації кисню у дутті на швидкість посування вогневого вибою газогенератора показав наявність нелінійної залежності, яку апроксимовано моделлю типу Міхаеліса-Ментена  $v(x) = (V_{\max}x)/(K + x)$  (рис. 5). Зі збільшенням вмісту O<sub>2</sub> до 42% спостерігається значне прискорення посування вибою, тоді як подальше підвищення концентрації до 65% призводить до насичення процесу і зменшення приросту швидкості.

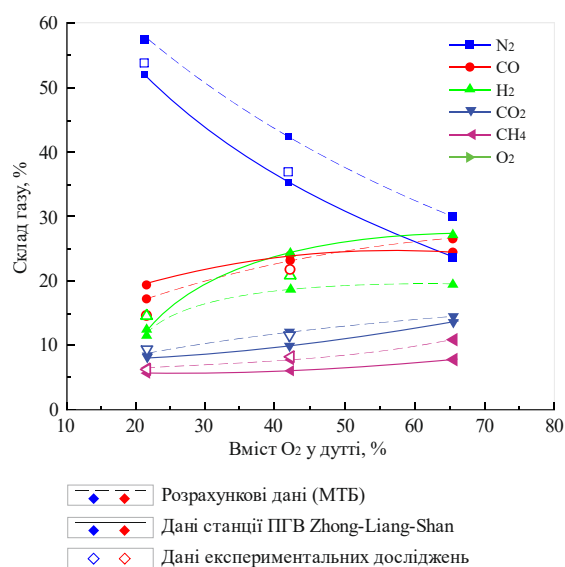


Рисунок 4 – Узагальнені залежності виходу складових генераторного газу при зміні вмісту кисню у дутті

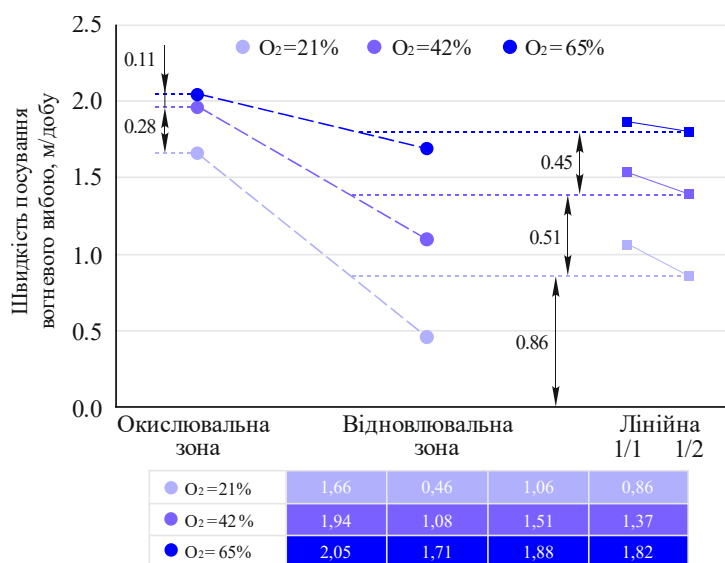


Рисунок 5 – Розрахункові дані зміни швидкостей посування вогневого вибою газогенератора при зміні насиченості дуття киснем

Розрахована модель з параметрами апроксимації  $V_{\max} \approx 4,6$  і  $K \approx 1,0$  достовірно відображає загальні тенденції процесу. В результаті дослідження визначено оптимальну концентрацію кисню у дутті на рівні 42%, яка забезпечує баланс між продуктивністю і економічною доцільністю процесу газифікації. Отримані результати є підґрунтям для оптимізації режимів роботи газогенератора залежно від параметрів дуття і якості вихідної вуглецевмісної сировини.

У **третьому розділі** наведено результати аналітичних досліджень застосування магнітних полів для інтенсифікації процесу підземної газифікації вугілля, що базуються на механізмі інтеркомбінаційних переходів молекул кисню і води з синглетного в триплетний стан в неоднорідному магнітному полі.

Для активації дуття в процесі газифікації вугілля суттєву неоднорідність магнітного поля можна створити за рахунок використання постійних магнітних полів невисокої напруженості шляхом контакту твердих намагнічених поверхонь і газоподібних продуктів дуття. Інтенсивність участі вуглецю під час обробки дуттьової суміші магнітним полем змінюється від 16,6 до 20,2% залежно від температури (від 800 до 1000°C) в зоні газифікації за постійного впливу магнітного поля 500 Е.

Застосування магнітних полів у процесі газифікації значно підвищує реакційну здатність молекул, таких як вода і кисень, завдяки збільшенню їхньої внутрішньої енергії через перерозподіл спінів електронів. Цей ефект знижує енергію активації, необхідну для реакцій газифікації, прискорюючи виробництво синтез-газу і підвищуючи загальну ефективність процесу. Магнітні поля також послаблюють водневі зв'язки, роблячи молекули більш реакційними. Аналітичні дані на основі рівняння Арреніуса підтверджують отримані результати, вказуючи на те, що магнітні поля збільшують швидкість реакцій, що добре узгоджується з експериментальним збільшенням частки участі вуглецю.

Виявлено, що застосування магнітних полів у процесі газифікації значно підвищує швидкості реакцій ( $k$ ), який виражається через експоненціальний фактор  $-\frac{E_a}{RT}$  в аналітичних константах швидкості, що підкреслює суттєвий вплив магнітних полів на покращення процесу газифікації шляхом зниження енергії активації ( $E_a$ ), що також інтенсифікує швидкості реакцій і загальну ефективність газифікації вуглецю. Варто зазначити, що швидкості, спричинені впливом магнітного поля, пропорційно вищі, що вказує на те, що магнітна обробка забезпечує значну перевагу в прискоренні кінетики реакцій.

Для газифікації вуглецю приймається типове значення  $A = 10^6 \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Енергія активації ( $E_a$ ) така: без впливу магнітного поля –  $E_a = 200 \text{ кДж/моль}$ ; під впливом магнітного поля – енергія активації зменшується на величину різниці частки участі вуглецю за зміни температури та магнітної обробки дуттьових сумішей (від 17,5 до 20,2 одиниць, що становить  $\approx 10\%$  максимального значення енергії активації). Відповідно, в результаті молекулярної активації під впливом магнітного поля приймемо кореговане значення  $E_a$ .

Встановлено, що ефективність газифікації вуглецевмісної сировини в температурному діапазоні 800 – 1000°C підвищується за умови магнітної обробки дуттьової суміші, що аналітично описується зниженням енергії активації на 10% під дією магнітного поля напруженістю 500 Е. Активация термохімічного перетворення фізичними полями спричиняє експоненціальне підвищення константи швидкості реакції газифікації у 6,74 – 7,11, що відображається у значенні фактора  $F$  і відповідає збільшенню частки участі вуглецю на 51,5 – 58,9% (рис. 6). Це дає змогу кількісно оцінити вплив параметрів магнітного поля на кінетику реакцій і обґрунтувати доцільність його застосування для інтенсифікації процесу газифікації.

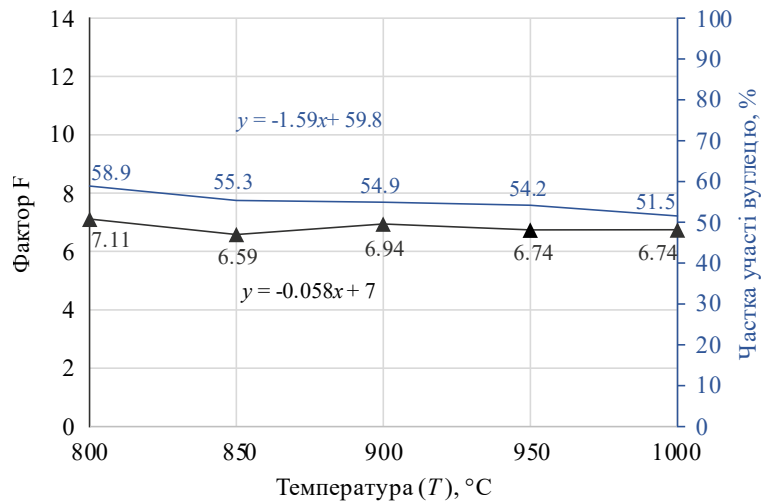


Рисунок 6 – Закономірність зміни фактора  $F$  і зміни частки участі вуглецю ( $C$ , %) за магнітної обробки дуття в температурному діапазоні 800 – 1000°C

Фактор  $F$  (коефіцієнт перетворення) визначає у скільки разів змінюється константа швидкості реакції в умовах впливу магнітного поля порівняно з умовами без впливу магнітного поля.  $F > 1$  означає, що магнітне поле прискорює реакцію, збільшуючи її швидкість. Отримані дані зміни енергії активації були використані в комп'ютерному моделюванні процесу когазифікації.

Відповідно, використання магнітно активованого пароповітряного дуття є ефективним способом інтенсифікації процесу газифікації, оскільки сприяє активізації реакцій окислення і відновлення, прискорює формування синтез-газу і забезпечує підвищення термохімічної ефективності геореакторної системи.

**Четвертий розділ** дисертаційної роботи присвячено чисельному CFD-моделюванню процесу спалювання вуглецевмісної сировини в каналі вугільного пласта з метою визначення температурних змін, оцінки стабільності формування високотемпературної зони окислення та встановлення закономірностей утворення продуктів згорання.

Застосування CFD-підходу на базі програмного середовища Ansys Fluent дало змогу врахувати складну взаємодію багатофазної турбулентної течії, теплообміну, дифузії і хімічних реакцій, що забезпечило високу точність просторово-часового прогнозування температурних полів, концентрацій компонентів і динаміки потоку.

Для моделювання процесу горіння в каналі використовується модель незмішаного горіння (non-premixed combustion model), що є оптимальним вибором, коли паливо і окислювач вводять окремо і змішують безпосередньо в зоні горіння.

Основою моделі незмішаного горіння є підхід до фракції суміші, який дає змогу значно спростити обчислення хімічних реакцій, зводячи їх до одного скалярного параметра – фракції суміші ( $f$ ). Ця змінна характеризує локальну масову частку компонентів, що надходять із паливного потоку. При цьому передбачається, що процес горіння перебуває в стані хімічної рівноваги або близький до нього. Під час моделювання незмішаного горіння використано метод густини розподілу ймовірностей (Probability Density Function – PDF) для врахування складної взаємодії між турбулентністю і хімічними реакціями.

Густини розподілу ймовірностей або диференціальна функція розподілу являє собою безперервний розподіл відстані ймовірностей, за якого ймовірність спостерігати значення в певному інтервалі дорівнює інтегралу від диференціальної функції, взятому в цих межах. Зазначений підхід описує розподіл скалярних величин, таких як температура і концентрації хімічних компонентів, замінюючи обчислення одного детермінованого значення статистичним підходом.

Вхідні отвори моделі для подачі повітря і палива налаштовані таким чином, щоб забезпечити точне моделювання подачі окислювача і палива, а також врахувати вплив турбулентності на межах області моделі. Швидкість потоку повітря на вході становить 30 м/с, для палива – 7,7 м/с. Напрямок руху повітря спрямований перпендикулярно до межі каналу, що забезпечує стабільну подачу окислювача. Для обох вхідних отворів задано інтенсивність турбулентності 5% і відношення в'язкості 10, що відповідає помірній турбулентності, типовій для замкнених каналів. Середній коефіцієнт змішування для входу повітря встановлено на рівні 0, що відповідає чистому окислювачу, тоді як для входу палива цей коефіцієнт дорівнює 1, що відповідає чистому паливу. Дисперсію коефіцієнта змішування визначено як 0,125, враховуючи флуктуації змішування на межах області моделі. Вихідний отвір моделюється як вихід із заданим тиском, встановленим на нульовий манометричний тиск (приблизно 0,101325 МПа за стандартних умов). Умови зворотного потоку враховують можливу рециркуляцію поблизу виходу, з інтенсивністю турбулентності 5% і відношенням в'язкості 10. Середній коефіцієнт змішування і його дисперсія на виході визначені як 0, що забезпечує коректне моделювання потоку через вихідний отвір.

Результатом транзитивного моделювання незмішуваного спалювання в Ansys Fluent є отримання карт і графіків розподілу статичної температури (рис. 7) для прогнозування розвитку високотемпературної зони окислення.

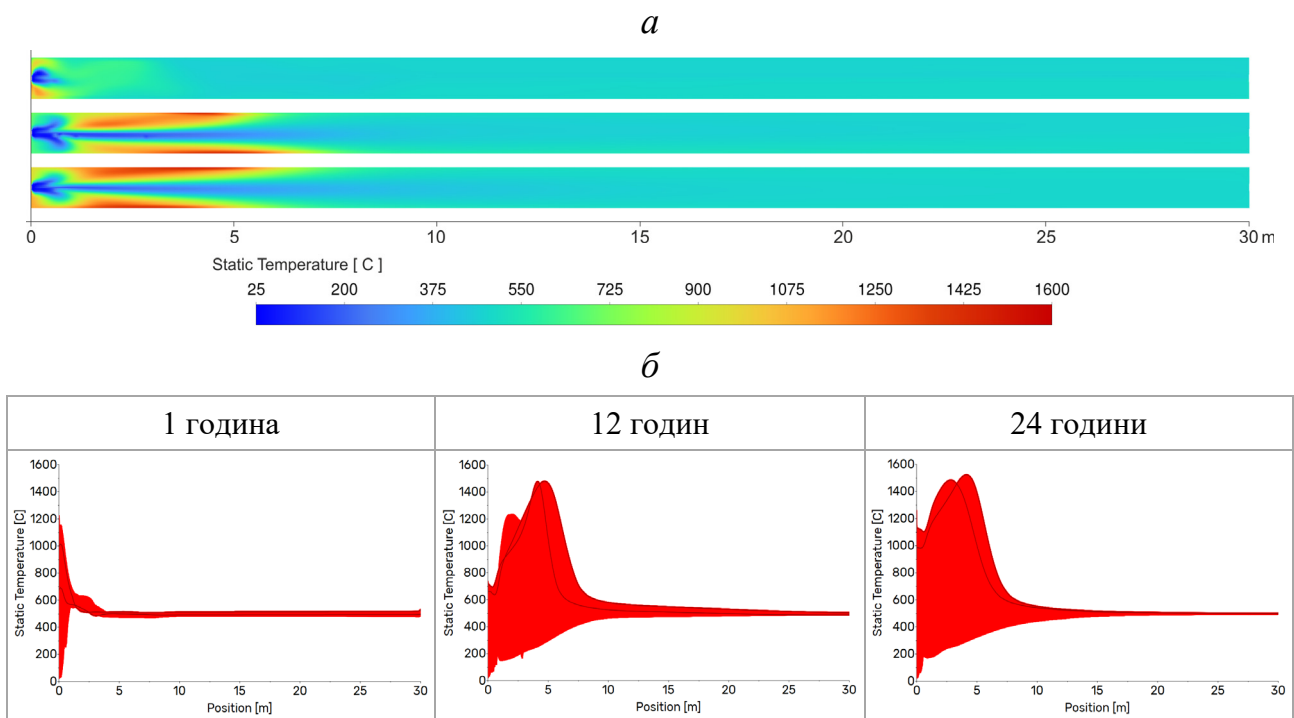


Рисунок 7 – Карти (*a*) та графіки (*б*) розподілу статичної температури вздовж каналу через 1, 12 і 24 год

Встановлено, що зона максимальної температури формується в ділянці входу в реакційний канал і поступово розширюється протягом перших 12 год, сягаючи температури 1400 – 1540°C, після чого профіль температури стабілізується. У віддаленій частині каналу (від 10 до 30 м) температура знижується до 490 – 520°C, утворюючи зону теплової рівноваги між залишковим виділенням тепла та тепловими втратами в породі. Після 24 год процесу формується квазістаціонарний режим, у якому подальше збільшення тривалості горіння (до 36 і 48 год) не спричиняє суттєвих змін температурного профілю. Визначено, що ефективний температурний діапазон для когазифікації (900 – 1200°C) забезпечується після 12 год горіння.

Моделювання в Ansys Fluent також дало змогу отримати дані розподілу масових часток негорючих ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) і горючих ( $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ) газоподібних компонентів уздовж каналу через 1, 12 і 24 год (рис. 8).

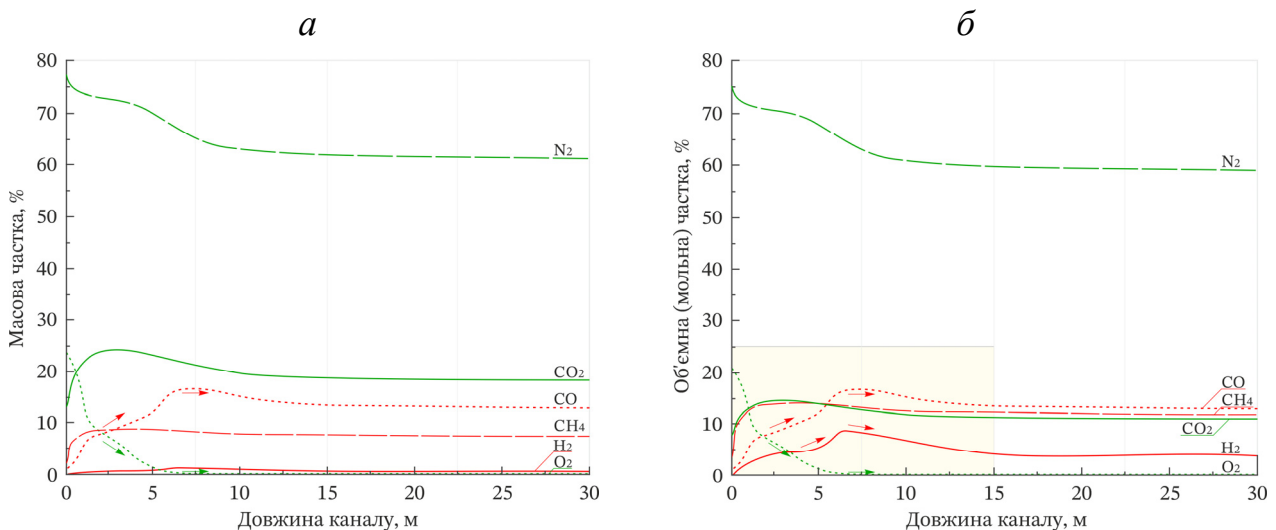


Рисунок 8 – Графік зміни максимального розподілу горючих ( $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ) і негорючих ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) газоподібних компонентів вздовж каналу: *а* – масова частка; *б* – об'ємна (мольна) частка

Встановлено, що горючі компоненти  $CO$ ,  $CH_4$  і  $H_2$  утворюються поблизу входу в результаті піролізу і неповного згорання. Масова частка  $CO$  сягає максимуму на відстані 6 – 8 м, тоді як  $CH_4$  і  $H_2$  утворюється на відстані 0 – 7 м, після чого знижуються внаслідок вторинних реакцій. Ця система функціонує з високим ступенем конверсії горючих газів, з подальшою стабілізацією складу після 10 м.

Водень ( $H_2$ ) швидко споживається під час формування реакцій окислювання і рекомбінації, що особливо інтенсивно відбувається в зоні високих температур біля входу. Масова частка водню різко знижується після 7 м і стабілізується на незначному рівні далі вздовж каналу.

Швидкість потоку газів є найбільшою поблизу входу (25 м/с) і виходу (до 58 м/с), де домінує вплив нагнітання і теплового розширення. Інтенсивність турбулентності перевищує 800 – 1000% поблизу зони подачі реагентів дуття, зменшуючись до 200 – 300% на відстані понад 10 м, що вказує на поступову стабілізацію потоку. Густина газів знижується від 1,3 кг/м<sup>3</sup> на вході до 0,4 – 0,6 кг/м<sup>3</sup> в зоні реакції внаслідок нагрівання і генерації легких газів.

З метою оцінки впливу фізичних властивостей гірських порід на динаміку температурного поля, проведено моделювання процесу розповсюдження температури у пороодо-вугільний масив. Для розрахунків було використано результати комп'ютерного моделювання. Прийнято, що температура стінки каналу становить  $500^{\circ}\text{C}$  на 1 год;  $1400^{\circ}\text{C}$  на 12 год;  $1540^{\circ}\text{C}$  на 24 год;  $1580^{\circ}\text{C}$  на 36 год та  $1600^{\circ}\text{C}$  на 48 год. Початкова температура масиву становила  $20^{\circ}\text{C}$ . Розповсюдження температури відбувається вглиб масиву. Основним змінним параметром у розрахунках було значення температуропровідності  $\alpha$ , яке відображає теплофізичні властивості відповідних гірських порід. Під час моделювання використано такі значення: аргіліт –  $\alpha = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; алевроліт –  $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-6}$ ; пісковик –  $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-6}$ ; вугілля –  $\alpha = 0,6 \cdot 10^{-6}$ . Результати визначення розповсюдження температури наведено на рис. 8.

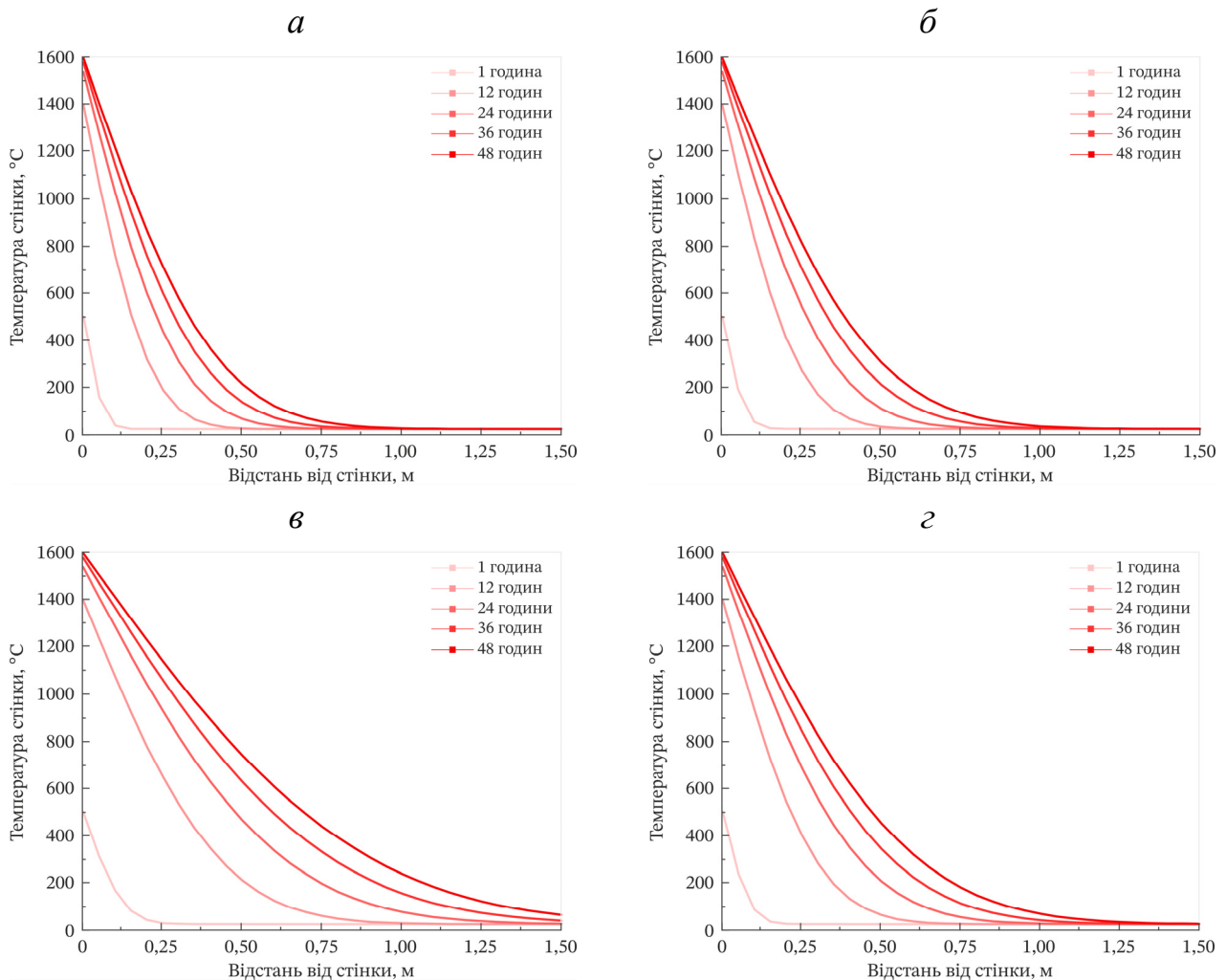


Рисунок 8 – Розповсюдження температури в породах і вугіллі: (а) – аргіліт; (б) – алевроліт; (в) – пісковик; (з) – вугілля

Отримані дані розповсюдження температури в породах і вугіллі лягли в основу визначення часових параметрів комбінування дуття для підтримання високої реакційної активності окислювальної зони підземного газогенератора при періодичному нагнітанні пароповітряного дуття, яке чинить охолоджуючий вплив на гірський масив.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи наведено результати дослідження процесів когазифікації вугілля і біомаси в реакційному каналі підземного газогенератора, визначено вплив складу дуття і кількості додатково залученої біомаси, встановлено часові інтервали стабільної роботи підземного газогенератора з урахуванням параметрів матеріально-теплого балансу.

Розроблено аналітичну модель теплового балансу процесу когазифікації вугілля і вуглецевмісної сировини в реакційному каналі. Розглянуто теплові потоки вздовж каналу та втрати тепла у вміщуючі породи через покрівлю і підшову виробленого простору. Для опису нестационарної теплопровідності застосовано розв'язок рівняння Фур'є у безрозмірних координатах.

Отримано закономірність зміни безрозмірної температури  $\theta$  від критерію Фур'є  $Fo$ , яка відображає динаміку охолодження граничного шару порід у часі. Показано, що зі зростанням  $Fo$  спостерігається спадання  $\theta$  у напрямку від межі реакційного простору, що відповідає поступовому зменшенню температурного градієнта (рис. 9а). Також отримано закономірність зміни кумулятивних теплових втрат  $\Delta Q$  від часу  $\tau$  (рис. 9б), яка має кореневу залежність виду  $\Delta Q \propto \sqrt{\tau}$ . Це означає, що інтенсивність втрат тепла у породи з часом зменшується, тоді як сумарна кількість відведеного тепла збільшується пропорційно кореню з часу. Таким чином, модель дає можливість кількісно оцінити ефективність теплового використання енергії реакцій термохімічної конверсії і визначити роль теплопровідності вміщуючих порід у загальному енергетичному балансі процесу підземної когазифікації.

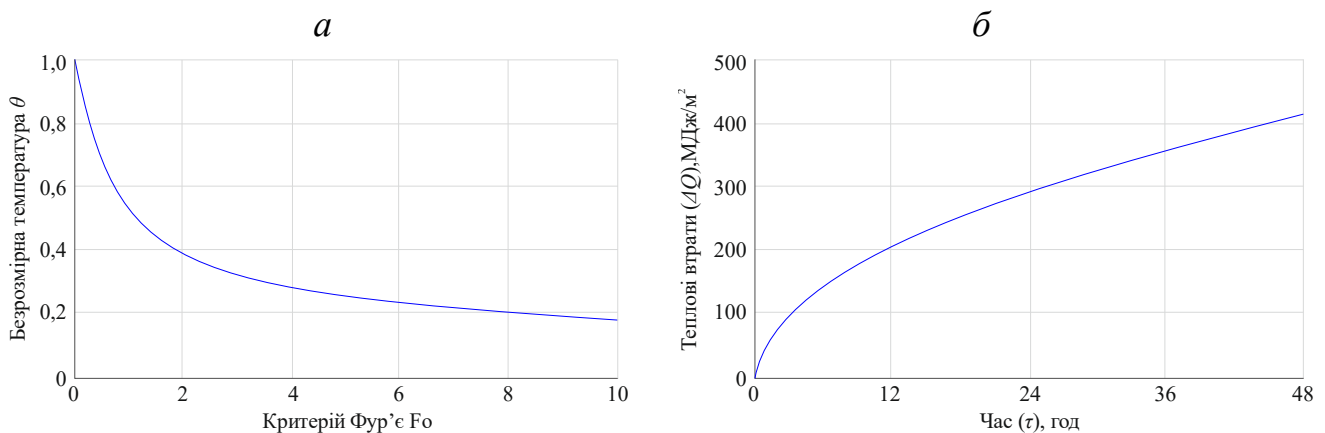


Рисунок 9 – Закономірності зміни безрозмірної температури  $\theta$  від критерію Фур'є  $Fo$  (а) та зміни кумулятивних теплових втрат  $\Delta Q$  від часу  $\tau$  (б)

Для визначення параметрів матеріально-теплого балансу (МТБ) процесу когазифікації застосовано комп'ютерну програму “МТ Balance”, розроблену в НТУ «Дніпровська політехніка». При дослідженні використовували три типи дуття:

- повітряне ( $O_2$  – 21%,  $N_2$  – 79%);
- кисневе ( $O_2$  – 42%,  $N_2$  – 58%);
- парокисневе ( $O_2$  – 42%,  $N_2$  – 48%,  $H_2O_{\text{пара}}$  – 10%).

Дослідження проводиться в 6 етапів. На першому етапі досліджувалося повітряне дуття ( $O_2$  – 21%,  $N_2$  – 79%), на другому – кисневе ( $O_2$  – 42%,  $N_2$  – 58%), а на третьому – парокисневе ( $O_2$  – 42%,  $N_2$  – 48%,  $H_2O_{\text{пара}}$  – 10%). При виконанні

четвертого, п'ятого і шостого етапів використовували ті самі типи дуття, однак для розрахунку матеріально-теплого балансу додавалися вуглецевмісні компоненти, тобто збільшували кількість вуглецю (C) у вихідних даних елементного складу вугілля. Максимальне значення додаткового залучення вуглецю становить 100% порівняно з вихідним вмістом вуглецю у складі вугілля – від початкового значення, тобто від 80 до 160 одиниць вуглецю. Крок зміни кількості вуглецю становить 5 одиниць або 6,25%.

Результати досліджень вказують на значний вплив кількості вуглецевмісної сировини і типу дуття на характеристики генераторного газу. Парокисневе дуття виявилось найефективнішим, показуючи найвищий хімічний ККД і сумарну теплоту згоряння (рис. 10).

Виявлено, що зі збільшенням вуглецевмісної сировини зменшується хімічний ККД процесу когазифікації, що потребує визначення максимально можливої кількості сировини, яку можна подати в газогенератор з урахуванням ефективності процесу. Вважається, що процес когазифікації є ефективним, коли ККД не опускається нижче 2/3 максимального значення. Таким чином, з урахуванням стандартної похибки визначено показники, які наведено на номограмі, а саме 7,5% – для повітряного дуття; 52% – для кисневого і 63% – для парокисневого (рис. 11). Отримані дані використані при подальшому комп'ютерному моделюванні процесу когазифікації вугілля та вуглецевмісної сировини.

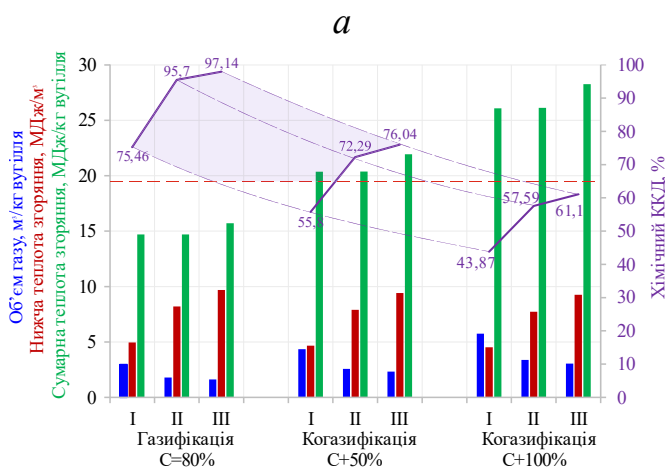


Рисунок 10 – Параметри МТБ газифікації та когазифікації кам'яного вугілля

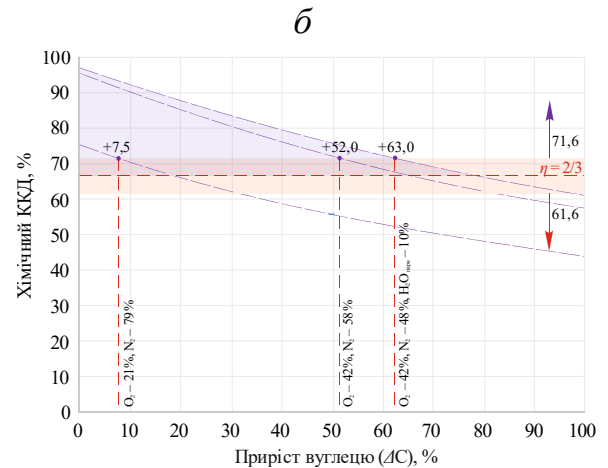


Рисунок 11 – Номограма визначення ефективності процесу когазифікації

Перед застосуванням ANSYS Fluent для дослідження впливу комбінацій вуглецевмісної сировини (вугільного пилу та біомаси) і типу дуття на вихід генераторного газу, його складу і теплоти згоряння, проведено валідацію результатів комп'ютерного моделювання з розрахунками МТБ для трьох типів дуття – повітряного, кисневого та парокисневого, при відповідній зміні приросту вуглецю 7,5, 52 і 63%. Для повітряного дуття спостерігається незначна розбіжність (6 – 12%) між CFD-моделюванням і розрахунками МТБ, що свідчить про адекватне відтворення процесів часткового окислення при низькому прирості вуглецю (7,5%). Для кисневого дуття відмінності становлять близько 3 – 8%. Найбільші розбіжності (до 18%) характерні для парокисневого дуття, що може бути зумовлено складними процесами одночасного протікання реакцій парового риформінгу та зсуву водню.

У рамках комп'ютерного моделювання було визначено показники складу генераторного газу, отриманого в процесі підземної когазифікації, за різних поєднань вуглецевмісної сировини (вугільного пилу, біомаси та їхніх сумішей у співвідношеннях 25/75, 50/50, 75/25) і трьох типів дуття: повітряного, кисневого та парокисневого. Кількість додатково введеного вуглецю у вигляді шихти для кожного типу дуття визначали за попередніми розрахунками, що забезпечують однаковий рівень надлишку повітря ( $\lambda \approx 0,73$ ) для порівнянності результатів.

На рис. 12 наведено взаємозв'язок двох LHV-величин з часткою біомаси в шихті (від чистого вугілля до чистої біомаси) і трьома типами окислювача (повітряний, кисневий і парокисневий). Виходячи з отриманих результатів, оптимальним для забезпечення балансу між масовою та об'ємною енергетичною цінністю синтез-газу є парокисневий окислювач у поєднанні з шихтою, яка складається з 25% вугільного пилу та 75% біомаси, відповідно надалі розглядається лише парокисневе дуття.

Зниження енергії активації з 200,0 до 179,8 кДж/моль внаслідок застосування попередньо намагніченого парокисневого дуття ( $O_2 - 42\%$ ,  $H_2O - 10\%$ ) призводить до зміни складу генераторного газу (рис. 13). Найбільш виражене підвищення спостерігається для водню. Залежно від варіанта сировини його об'ємна частка збільшується на 8–29%, причому найвищий приріст спостерігається при використанні біомаси (з 8,30 до 10,71%; +29%), а найменший при використанні вугільного пилу (з 7,20 до 7,78%; +8%).

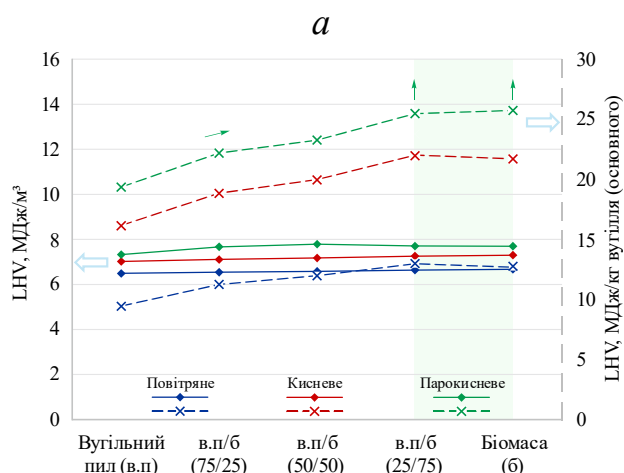


Рисунок 12 – Залежності зміни нижчої теплоти згоряння генераторного газу за різних поєднань палива та типів окислювача

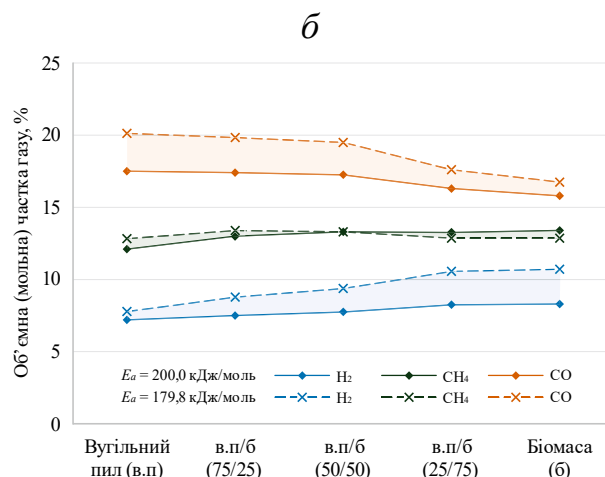


Рисунок 13 – Залежності зміни мольних часток складових генераторного газу при магнітній активації парокисневого дуття

В результаті проведених досліджень встановлено, що концентрація водню в генераторному газі процесу підземної когазифікації при застосуванні парокисневого дуття ( $O_2 - 42\%$ ,  $H_2O_{\text{пара}} - 10\%$ ) зі зниженням енергії активації з 200,0 до 179,8 кДж/моль змінюється лінійно, досягаючи максимуму (10,56%) при вмісті біомаси в шихті  $\geq 75\%$ , забезпечуючи оптимальне співвідношенням  $H_2/CO$  на рівні 0,6. Це дає можливість спрогнозувати теплотворну здатність генераторного газу (LHV) і ефективність ведення процесу воднево-орієнтованої підземної когазифікації, а також адаптувати синтез-газ до потреб хімічних технологій без зміни базових параметрів процесу когазифікації.

З метою визначення часових параметрів комбінування дуття для підтримання високої реакційної активності окислювальної зони підземного газогенератора при нагнітанні пароповітряного дуття, як найперспективнішого виду окислювача для генерації водню, виконано оцінку зміни температури в зоні окислення при подачі парокисневого дуття ( $O_2 - 42\%$ ,  $N_2 - 48\%$ ,  $H_2O - 10\%$ ). Для цього використано аналітичну модель експоненціального зниження температури, яка зумовлена охолоджуючим впливом пари через ендотермічні реакції:

$$T(t) = T_0 - \Delta T \cdot (1 - e^{-k_1 t}),$$

де:  $T(t)$  – температура зони реакцій у момент часу  $t$ , °С;  $T_0$  – початкова температура після прогрівання (прийнята рівною  $1200^\circ\text{C}$ );  $\Delta T$  – розрахункове зниження температури, °С;  $k_1$  – коефіцієнт охолодження, пов’язаний з тепловою інерцією середовища;  $\Delta T$  – температура вихідної речовини, °С.

На тлі охолоджувального впливу пари в канал додатково потрапляє органічна маса, яка продовжує продукувати тепло. Відповідно, вищенаведена модель доповнена тепловиділеннями реакцій когазифікації:

$$T(t) = T_0 - \Delta T_{\text{пара}} \cdot (1 - e^{-k_1 t}) + \Delta T_{\text{паливо}} \cdot (1 - e^{-k_2 t}),$$

де:  $T_{\text{паливо}}$  – приріст тепла від реакцій когазифікації, °С;  $k_2$  – темп вивільнення тепла з палива.

У дослідженні враховувалися три варіанти дії дуття за наявності пари на зниження температури в окислювальній зоні:

- 1) В-1 – охолодження паром без урахування виділення екзотермічного тепла;
- 2) В-2 – газифікація вугілля (у пласті);
- 3) В-3 – когазифікація вугілля і вуглецевмісної суміші: вугільний пил/біомаса = 25/75» (63% вуглецю до базового значення на кілограм основного палива).

Результуючі криві зміни температури в окислювальній зоні газогенератора наведено на рис. 14.

З практичного погляду, перехід на кисневе дуття необхідно здійснювати при досягненні критичної температури. Примітно, що при подачі суміші «вугільний пил/біомаса = 25/75» окислювальна зона зберігає робочу температуру найдовше, і зміну режиму подачі пари можна відтермінувати без ризику зупинення основних реакцій газоутворення. Таким чином, збільшення частки біомаси в шихті виступає ефективним способом термостабілізації підземного геореактора, даючи змогу довше працювати в парокисневому режимі і підвищувати вихід водню.

Після встановлення характеру температурного спаду в окислювальній зоні за безперервної подачі парокисневого дуття, постало завдання оптимізації теплового режиму шляхом поєднання двох типів дуття – парокисневого і кисневого для забезпечення підвищеного виробництва водню. Такий підхід дає змогу уникнути неконтрольованого охолодження геореактора і забезпечити тривалу роботу в межах оптимального температурного інтервалу. У цьому випадку аналіз проводився для режиму когазифікації з найбільшим тепловиділенням – вугільний пил/біомаса у співвідношенні 25/75 (варіант В-3), із сумарним внеском 63% вуглецю до базового значення на кілограм основного палива. Результати визначення зміни температури в зоні окислення при циклічній подачі дуття наведено на рис. 15.

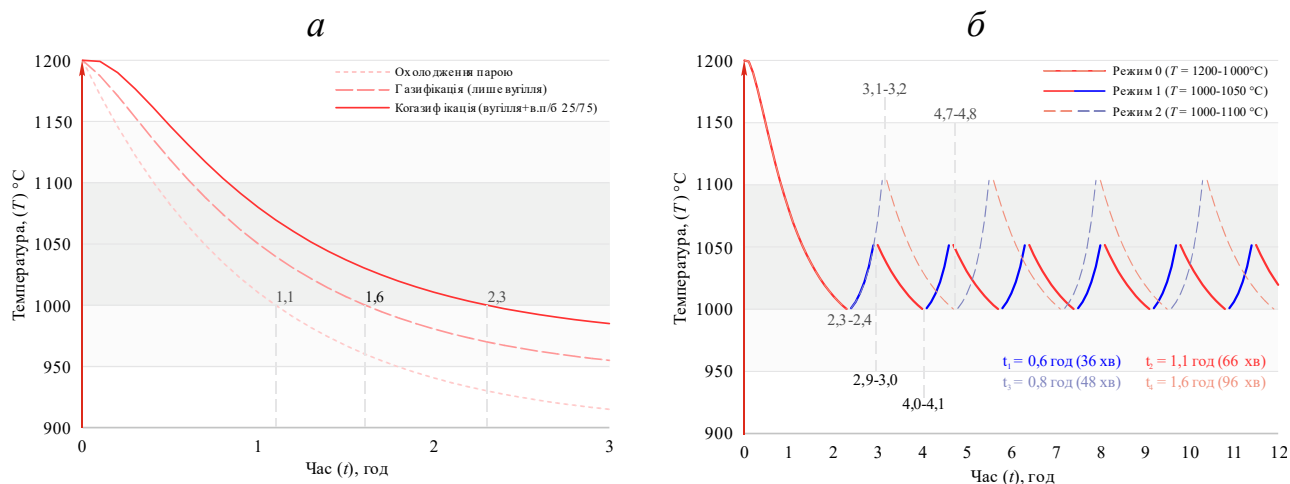


Рисунок 14 – Динаміка зміни температури окислювальної зони підземного газогенератора: (а) – після переходу на дуття із застосуванням пари; (б) – при циклічній подачі дуття за трьома режимами

На першому етапі подається лише парокисневе дуття (10%  $\text{H}_2\text{O}$ , 42%  $\text{O}_2$ , 48%  $\text{N}_2$ ), що призводить до охолодження окислювальної зони з  $1200^{\circ}\text{C}$  до критичних  $1000^{\circ}\text{C}$ . Критична температура спостерігається вже через 2,3 год від початку процесу когазифікації із застосуванням перегрітої пари (режим 0). Падіння температури зумовлене не лише відведенням теплоти з гірського масиву для врівноваження системи, а й протіканням ендотермічних реакцій (зокрема реакції водогазової конверсії), які інтенсивно споживають теплову енергію.

У режимі 1 передбачено підігрів до  $1050^{\circ}\text{C}$ . Подача кисню забезпечує приріст температури за 0,6 год (36 хв), після чого система знову переходить на парокисневе дуття і температура спадає до  $1000^{\circ}\text{C}$  протягом 1,1 год. Така конфігурація дає змогу встановити майже симетричний цикл тривалістю  $\approx 1,7$  год, що забезпечує стабільність роботи підземного газогенератора.

У режимі 2 верхню межу встановлено на рівні  $1100^{\circ}\text{C}$ . Для досягнення цієї температури в зоні окислення знадобиться приблизно 0,8 год (48 хв) кисневої подачі, натомість охолодження до  $1000^{\circ}\text{C}$  займає вже 1,6 год. Повний цикл збільшується до 2,4 год, тобто перевищує тривалість циклу в режимі 1 в 1,4 раза.

З огляду на сукупність факторів, таких як стабільність температурного інтервалу, керованість процесу, енергетичну доцільність і селективність реакцій, режим 1 є оптимальнішим для підтримання ефективного процесу когазифікації.

Встановлено, що оптимізація теплового режиму когазифікації в підземному газогенераторі може бути досягнута шляхом впровадження керованих циклів чергування дуття з урахуванням меж температурної ефективності та конструктивно-технологічних обмежень системи. Відповідно ефективний час ( $t$ ) подачі парокисневого дуття ( $\text{O}_2 - 42\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}_{\text{пара}} - 10\%$ ) у газогенератор при підземній когазифікації визначається циклічністю активізації окислювальної зони кисневим дуттям ( $\text{O}_2 - 42\%$ ) і залежить від теплового ефекту залучених органічних компонентів (суміш вугільного пилу і біомаси у співвідношенні 1:3) із сумарним внеском 63% вуглецю до базового значення вугілля як граничне значення. Це дає змогу прогнозувати роботи підземного газогенератора в температурному діапазоні  $1000 - 1050^{\circ}\text{C}$ .

**Шостий розділ** дисертаційної роботи висвітлює технологічні аспекти реалізації процесу підземної когазифікації вугілля, охоплюючи обґрунтування параметрів посування вогневого вибою, багатокритеріальну оцінку придатності вугільних пластів і розробку рекомендацій щодо практичної реалізації технології підземної когазифікації вугілля.

При застосуванні намагнічування дуття як елемента інтенсифікації необхідно здійснити коригування швидкості посування вогневого вибою. Активність вигазовування вуглецю, спричинена впливом магнітних полів, матиме місце в окислювальній зоні реакційного каналу, в той час як прямий вплив на відновлювальну зону нівелюється.

Для визначення швидкості посування вогневого вибою підземного газогенератора був здійснений порівняльний прогноз розвитку лінії вогневого вибою без застосування та із застосуванням магнітних полів. Зазвичай періодичність реверсування за потужності вугільного пласта 1 м має здійснюватися один раз на 3 доби, тобто посування окислювальної зони на відстань 5,0 м за розрахункового добового посування окислювальної зони 1,66 м при застосуванні повітряного дуття та 2,6 доби за розрахункового добового посування окислювальної зони 1,94 м при застосуванні парокисневого дуття.

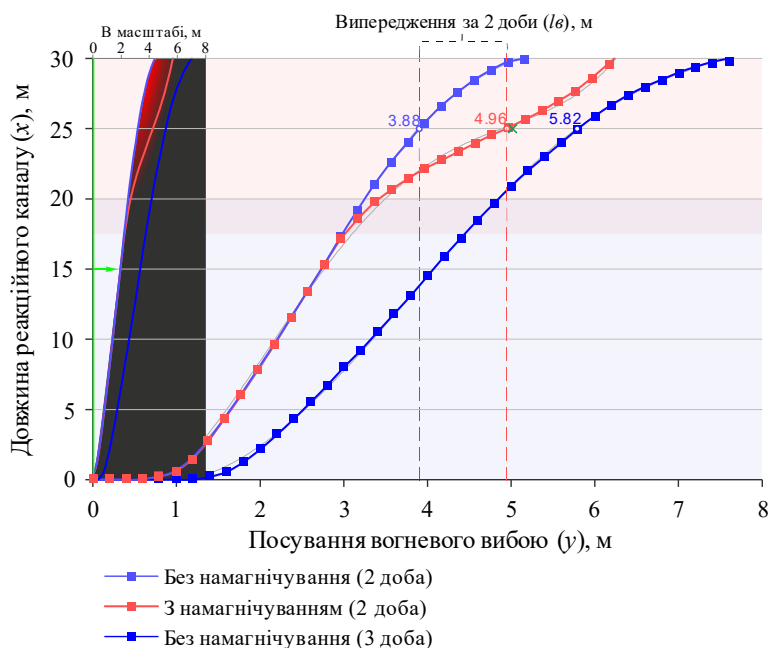


Рисунок 15 – Зіставлення залежностей зміни посування вогневого вибою по довжині реакційного каналу

Встановлено, що застосування намагніченого парокисневого дуття підвищує лінійну швидкість посування вогневого вибою з 1,37 до 1,54 м/добу, збільшуючи площу вигазовування на 12,4%, що забезпечує скорочення інтервалу реверсування з 2,6 до 2,0 діб при віддаленні середини окислювальної зони на довжину 5,0 м від початкового значення. Врахування параметрів реверсування дає змогу запобігти надмірному видовженню реакційного каналу і забезпечить стабільну роботу геореакторної системи при інтенсифікації процесу когазифікації.

Комплексну оцінку придатності вугільних пластів обраної ділянки шахти «Західно-Донбаська» до підземної когазифікації проведено з використанням методу багатокритеріального прийняття рішень (MCDM), зокрема методу індексу переваг (PSI). Запропонований підхід інтегрує геологічні, гідрогеологічні і гірничотехнічні фактори, а також додатковий критерій інтенсифікації процесу газифікації, що дає змогу підвищити точність та об'єктивність оцінки порівняно зі стандартним методом.

Метод PSI підтвердив свою ефективність за рахунок усунення суб'єктивності, що притаманна ваговим оцінкам у традиційних методиках, шляхом статистичної обробки нормалізованих даних та визначення вагових коефіцієнтів на основі варіації критеріїв. На відміну від стандартного середньозваженого методу, який показав відносно рівномірну придатність пластів (0,67 – 0,74), застосування PSI забезпечило більш чітке ранжування і виявило найбільш перспективні пласти для впровадження технології когазифікації (рис. 16). Найвищі інтегральні оцінки отримали пласти  $c_9$  (0,908) і  $c_{10}^B$  (0,876), що зумовлює доцільність їх першочергового освоєння. Максимальна розбіжність між методами становила близько 21%, а середня – 10,5%.

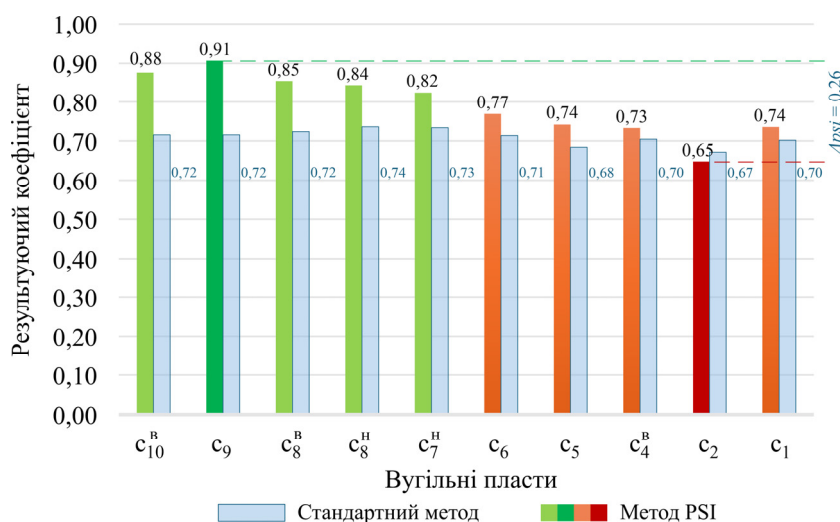


Рисунок 16 – Порівняння отриманих значень коефіцієнтів придатності 10 вугільних пластів до підземної когазифікації вугілля

Отримані результати свідчать про узгодженість рейтингу вугільних пластів за обома методами (стандартним середньозваженим та методом PSI), однак спостерігаються певні відмінності у кількісних оцінках придатності. Основною причиною такої різниці може бути врахування методу PSI нечітких або прихованих впливів окремих факторів через застосування вагових коефіцієнтів, отриманих на підставі варіації нормованих даних. Іншими словами, метод PSI дає змогу «збалансованіше» відобразити відносну важливість кожного критерію, тоді як стандартний метод більш рівномірно розподіляє їхній внесок у загальний показник. З огляду на те, що технологія підземної газифікації (когазифікації) вугілля має на меті здійснювати відпрацювання вугільних пластів з максимальним залученням запасів, пропонується розробляти вугільні пласти в низхідному порядку.

Для реалізації запропонованого способу інтенсифікації процесу когазифікації магнітними полями в натурних умовах у даній роботі запропоновано спосіб підземної когазифікації вугілля, який передбачає буріння дуттьової і газовідвідної свердловин, їх збіжку, розпалювання вугільного пласта і утворення вогневого вибою з подачею різнотипного дуття і вуглецевмісної сировини дуттьовою свердловиною та відведенням продуктів когазифікації на земну поверхню газовідвідною свердловиною. Відмінною особливістю запропонованого способу є попереднє намагнічування парокисневого дуття на поверхні перед його подачею в зону когазифікації, що забезпечує додаткову активацію реагентів і сприяє інтенсифікації протікання термохімічних перетворень у високотемпературній зоні окислення. Як приклад розглянуто ділянку шахти «Західно-Донбаська» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (рис. 17).

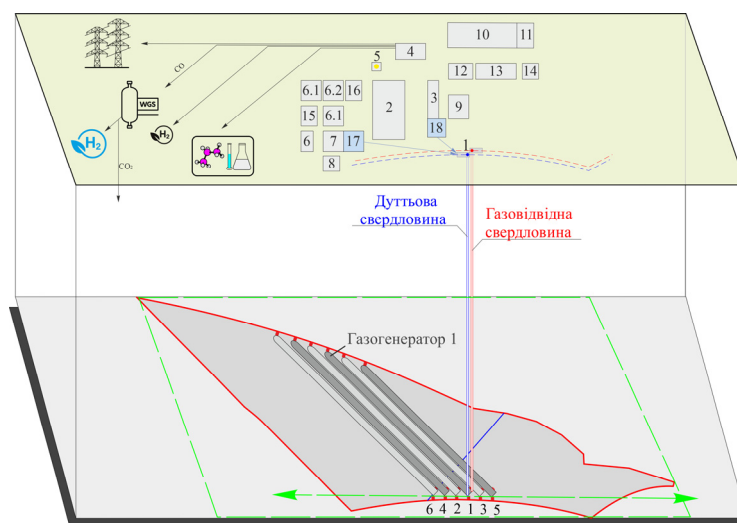


Рисунок 17 – Розташування споруд на поверхневому комплексі станції підземної когазифікації вугілля: 1 – свердловини з установками для переміщення довгомірних труб; 2 – адміністративно-побутовий комплекс; 3 – блок підготовки газових сумішей; 4 – установка очищення та розподілу генераторного газу; 5 – димова труба; 6 – вузол водопостачання; 6.1 – насосна; 6.2 – резервуари; 7 – котельня, паро-генераторна; 8 – склад закладного матеріалу; 9 – газонакопичувачі; 10 – компресорна; 11 – високовольтна комірка; 12 – трансформаторна підстанція; 13 – хімічна лабораторія; 14 – побутові приміщення; 15 – матеріальний склад; 16 – резервуар-дистилятор; 17 – система намагнічування парокисневого дуття; 18 – блок підготовки вуглецевмісних сумішей

Система намагнічування парокисневого дуття і блок підготовки вуглецевмісних сумішей є додатковими елементами, необхідними для реалізації технології воднево-орієнтованої підземної когазифікації. Система намагнічування здійснює магнітну активацію парокисневих потоків з індукцією 500 Е ( $\approx 40$  кА/м), що забезпечує зниження енергії активації реакцій окислення в підземному газогенераторі. Блок підготовки вуглецевмісних сумішей забезпечує попереднє дозування і змішування пилової вугільної і біомасової фракцій, формуючи оптимальний склад палива. Для мінімізації викидів парникових газів передбачається впровадження системи уловлювання та утилізації  $\text{CO}_2$  (CCS/CCU). Завдяки цьому отриманий водень (як виділений, так і після реакції WGS) класифікується як «блакитний водень», що відповідає концепції низьковуглецевої енергетики та декарбонізації виробництва.

Економічну ефективність розробленої технології оцінено за методологією інкрементального порівняння показників, яка ґрунтується на визначенні умовної одиниці ефективності (УОЕ) для кожного варіанта технологічної реалізації. Методика передбачає порівняння тільки тих статей доходів і витрат, які змінюються між альтернативами, за винятком постійних і загальних витрат, що не впливають на різницю економічних результатів.

На рис. 18 наведено порівняння сумарних економічних показників для базового варіанту – підземна газифікація вугілля та інноваційного варіанту – підземна когазифікація вугілля з використанням додаткової вуглецевмісної сировини та попереднього намагнічування дуття.

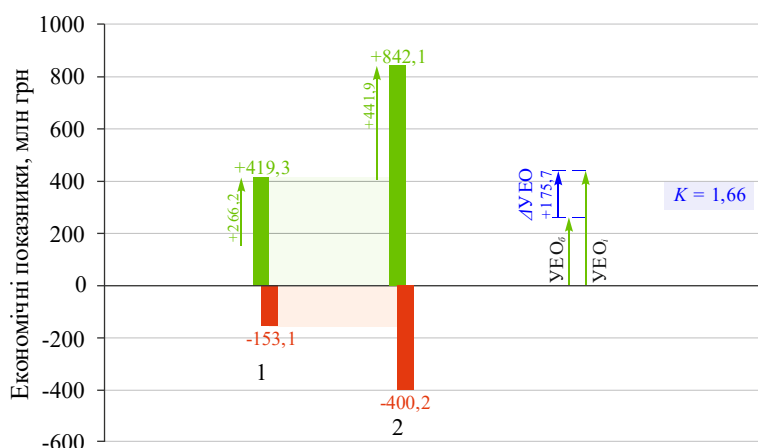


Рисунок 18 – Порівняння сумарних економічних показників та умовної одиниці ефективності: 1 – базовий варіант (підземна газифікація вугілля); 2 – інноваційний варіант (підземна когазифікація вугілля)

Встановлено, що впровадження технології підземної когазифікації вугілля з використанням додаткової вуглецевмісної сировини та попереднього намагнічування парокисневого дуття забезпечує суттєве підвищення виробничої та економічної ефективності порівняно з базовою технологією підземної газифікації. За рахунок збільшення швидкості вигазовування і підвищення виходу горючих компонентів генераторного газу, зокрема водню (з 0,174 до 0,364 м<sup>3</sup>/кг основного вугілля), тривалість експлуатації газогенератора скорочується на 11,5%. Дохід від реалізації водню зростає більш ніж у 2 рази (з 114 до 239 млн грн), окрім цього сумарний вихід додаткової електроенергії зростає майже в 2 рази (з 44,2 до 87,4 тис. МВт·год), що обумовлює додаткову прибутковість навіть за умови зростання окремих витратних статей.

Інкрементальний аналіз показав, що індекс переваги інноваційного варіанту становить 1,66, що відповідає +66% додаткового нетто-внеску відносно базової технології, із запасом економічної міцності 175,9 млн грн на один газогенератор. Аналіз чутливості підтвердив стійкість економічної переваги до коливань ключових ринкових факторів, адже навіть у найгіршому варіанті (-10% ціни реалізації та +10% витрат) зберігається індекс переваги 1,53 і додатковий економічний ефект понад 110 млн грн. Таким чином, розроблена технологія забезпечує високий рівень інвестиційної привабливості та операційної стабільності.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено нову актуальну наукову проблему з розробки наукових основ воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля, які ґрунтуються на закономірностях зміни параметрів термохімічних процесів у реакційному каналі при формуванні високотемпературної зони окислення підземного газогенератора, що дає можливість інтенсифікувати вигазовування вугільних пластів і є підґрунтям для подальшого розвитку термохімічного способу перетворення вуглецевмісної сировини в наземних газогенераторних установках замкненого циклу.

Основні наукові та практичні результати полягають у такому:

1. На основі бібліометричного аналізу встановлено, що інтенсивність наукових досліджень у сфері газифікації вугілля характеризується вираженою циклічністю, зумовленою глобальними енергетичними викликами. Зокрема, піки дослідницької та публікаційної активності збігаються з періодами енергетичних криз і різкого підвищення світових цін на нафту, що відображає реакцію наукової спільноти та промисловості на потребу в розвитку альтернативних і енергонезалежних технологій. Виявлена закономірність підтверджує, що газифікація вугілля залишається актуальною і затребуваною технологією, здатною підвищити рівень енергетичної безпеки в умовах нестабільності традиційних енергоносіїв.

2. За результатами систематичного огляду літературних джерел з технології підземної газифікації вугілля та використання сучасних систем аналізу даних на основі використання штучного інтелекту спрогнозовано перспективні напрями інтенсифікації процесу. Серед них особливе місце займають когазифікація та магнітна активація дуття, які сприяють прискоренню термохімічних реакцій, покращенню якісного складу генераторного газу та підвищенню питомого виходу водню. Зазначені підходи формують наукове підґрунтя для розробки нових концепцій використання вугілля на якісно вищому рівні.

3. Проведені експериментальні дослідження на авторській запатентованій стендовій установці з дотриманням інваріантів і критеріїв подібності дали змогу отримати дані якісного і кількісного складу генераторного газу, які в результаті валідації показали узгодженість з розрахунками матеріально-теплового балансу і даними напівпромислових випробувань. Використання експериментальних даних дало змогу визначити необхідну концентрацію кисню у дутті для забезпечення оптимальної швидкості посування вогневого вибою газогенератора.

4. Адаптовано чисельно-аналітичний підхід до моделювання процесу когазифікації вуглецевмісної сировини в реакційному каналі підземного газогенератора з використанням  $k$ - $\varepsilon$  турбулентної моделі та методу незмішуваного горіння з урахуванням густини розподілу ймовірностей (PDF).

5. Розроблено і протестовано математичну модель теплового балансу реакційного каналу на основі встановлених закономірностей теплової взаємодії високотемпературної зони окислення з вміщуючими породами. Встановлено, що ці закономірності описуються експоненціальним зниженням безрозмірної температури  $\theta$  зі збільшенням критерію Фур'є  $Fo$ , збільшенням кумулятивних теплових втрат  $\Delta Q$  з часом  $\tau$  та зменшенням відносних втрат тепла  $\eta$ .

6. Доведено, що ефективність газифікації вуглецевмісної сировини в температурному діапазоні 800 – 1000°C підвищується за умови магнітної обробки дуттьової суміші, що аналітично описується зниженням енергії активації на 10% під дією магнітного поля напруженістю 500 Е. Активація термохімічного перетворення фізичними полями спричиняє експоненціальне підвищення константи швидкості реакції газифікації у 6,74–7,11, що відображається у значенні фактора  $F$  та відповідає збільшенню частки участі вуглецю на 51,5 – 58,9%. Це дає змогу кількісно оцінити вплив параметрів магнітного поля на кінетику реакцій і обґрунтувати доцільність його застосування для інтенсифікації процесу газифікації.

7. Виявлено лінійну тенденцію зміни концентрації водню в генераторному газі процесу підземної когазифікації при застосуванні парокисневого дуття ( $O_2$  – 42%,  $H_2O_{\text{пара}}$  – 10%) зі зниженням енергії активації з 200,0 до 179,8 кДж/моль. Максимальне значення концентрації водню (10,56%) досягається при вмісті біомаси в шихті  $\geq 75\%$ , забезпечуючи оптимальне співвідношенням  $H_2/CO$  на рівні 0,6. Це дає можливість спрогнозувати теплотворну здатність генераторного газу (LHV) і ефективність ведення процесу воднево-орієнтованої підземної когазифікації. Перевага такого прогнозування полягає в адаптації складу синтез-газу до потреб хімічних технологій без зміни базових параметрів процесу когазифікації.

8. Уточнено ефективний час ( $t$ ) подачі парокисневого дуття ( $O_2$  – 42%,  $H_2O_{\text{пара}}$  – 10%) у газогенератор під час підземної когазифікації, який визначається циклічністю активізації окислювальної зони кисневим дуттям ( $O_2$  – 42%). Режим подачі парокисневого дуття залежить від теплового ефекту залучених органічних компонентів (суміш вугільного пилу і біомаси у співвідношенні 1:3) із сумарним внеском 63% вуглецю до базового значення вугілля як граничне значення. Це дає змогу прогнозувати ефективний період роботи підземного газогенератора в температурному діапазоні 1000 – 1050°C.

9. Визначено, що застосування намагніченого парокисневого дуття підвищує лінійну швидкість посування вогневого вибою з 1,37 до 1,54 м/добу, збільшуючи площу вигазовування на 12,4%. Рівномірне посування забезпечує скорочення інтервалу реверсування з 2,6 до 2,0 діб при віддалені середини окислювальної зони на довжину 5,0 м від початкового значення. Дотримання режиму реверсування дає змогу запобігти надмірному видовженню реакційного каналу і забезпечить стабільну роботу геореакторної системи при інтенсифікації процесу когазифікації.

10. Врахування впливу складу вуглецевмісної сировини, типу дуття, параметрів високотемпературної зони окислення та зовнішніх фізичних впливів на тепловий баланс, кінетику реакцій і стабільність роботи геореакторної системи призвело до розвитку концепції воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля як інтегрованого термохімічного процесу. Відмінність запропонованої концепції від існуючих полягає в комплексному врахуванні взаємозв'язків між способами інтенсифікації та режимами роботи, що забезпечує підвищення її енергоефективності.

11. Удосконалено критерії придатності вугільних пластів до підземної газифікації шляхом врахування додаткового фактора – когазифікації як елемента інтенсифікації процесу. На цій основі запропоновано інтегрований підхід до

оцінки придатності, що базується на багатокритеріальному аналізі з використанням методу індексу переваг (PSI). Застосування запропонованого інструментарію забезпечило обґрунтоване виокремлення перспективних пластів для реалізації технології термохімічного перетворення вугілля на генераторний газ з орієнтацією на отримання водню.

12. Сформовано технологічну схему підземної когазифікації вугілля з орієнтацією на підвищене виробництво водню. Відмінність від існуючих схем полягає в доповненні технологічного процесу, що полягає в попередньому намагнічуванні парокисневого дуття та оптимізації складу додатково залученої вуглецевмісної сировини з обґрунтуванням параметрів керування процесом термохімічного перетворення вугілля на генераторний газ. У межах запропонованої схеми передбачено отримання блакитного водню як проміжного етапу переходу до водневої енергетики, а також акцентовано увагу на можливості вилучення окремих елементів критичної сировини із продуктів газифікації.

13. Розроблено методики і рекомендації та отримано акт впровадження: «Методика прогнозу ефективності процесу підземної когазифікації з орієнтацією на отримання водню» (ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»), «Методика багатокритеріальної оцінки придатності вугільних пластів шахти «Західно-Донбаська» до підземної когазифікації (ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»), «Методика оцінки вискоелективного використання техногенних родовищ вуглезбагачення України» (ПАТ «Львівська вугільна компанія»), «Рекомендації з оптимізації режимів подачі дуттьових сумішей при газифікації вугілля» (ТОВ «ЗАХІД ТРЕЙД РЕСУРС»), «Рекомендації щодо технічного та технологічного удосконалення комплексної утилізації відходів вуглезбагачення на техногенних об'єктах ПАТ «Львівська вугільна компанія» (ПАТ «Львівська вугільна компанія»), акт впровадження «Наукові засади технології воднево-орієнтованої когазифікації вугілля» (ПАТ «Львівська вугільна компанія»).

14. Впровадження технології підземної когазифікації вугілля з використанням додаткової вуглецевмісної сировини і попереднього намагнічування парокисневого дуття забезпечить збільшення виходу водню з 0,174 до 0,364 м<sup>3</sup>/кг і скорочення тривалості експлуатації газогенератора на 11,5%. Дохід від реалізації водню збільшиться з 114,4 до 239,0 млн грн, а сумарний вихід додаткової електроенергії – з 44,2 до 87,4 тис. МВт·год. Індекс переваги інноваційного варіанту становить 1,66 із запасом економічної міцності 175,7 млн грн на один газогенератор, що підтверджує високу інвестиційну привабливість та операційну стабільність технології.

**Основні положення і результати дисертації опубліковані в наступних роботах:**

1. **Lozynskyi, V.** (2025). Multi-criteria assessment of coal seams suitability for co-gasification using the preference selection index. *Heliyon*, 11(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e43368>

2. Saik, P., **Lozynskyi, V.**, Yankin, D., Lysyy, N., & Cherniaiev, O. (2025). Substantiation into the efficiency of the coal gasification process with a focus on hydrogen production. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 85-92. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/085>

3. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., **Lozynskiy, V.**, Sala, D., Hankus, Ł., Magdziarczyk, M., & Smoliński, A. (2025). Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*, 15(1), 9075. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
4. **Lozynskiy, V.** (2024). Numerical simulation of carbonaceous raw material combustion in a coal seam channel. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 109-124. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.109>
5. **Lozynskiy, V.H.**, & Falshtynskiy, V.S. (2024). Analytical justification of the thermochemical interaction between blast reagents and carbon-containing products under the influence of magnetic fields. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 30-36. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/030>
6. Bazaluk, O., Sobolev, V., Molchanov, O., Burchak, O., Bezruchko, K., Holub, N., Tereshkova, O., Kulivar, V., Fedorenko, E., & **Lozynskiy, V.** (2024). Changes in the stability of coal microstructure under the influence of weak electromagnetic fields. *Scientific Reports*, 14, 1304. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51575-w>
7. Koveria, A., Kieush, L., Saik, P., **Lozynskiy, V.** (2024). Metallurgical Coke Production with Biomass Additives. Part 2. Production and Characterization of Laboratory Biocokes. *Studies in Systems, Decision and Control*, (510), 287-306. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_15)
8. **Lozynskiy, V.** (2023). Critical review of methods for intensifying the gas generation process in the reaction channel during underground coal gasification (UCG). *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 67-85. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.067>
9. Saik, P., **Lozynskiy, V.**, Anisimov, O., Akimov, O., Kozhanov, 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>
10. **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>
11. Falshtynskiy, V., Saik, P., **Lozynskiy, V.**, Toleulov, 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>
12. 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>
13. 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>
14. 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/10.33271/nvngu/2020-4/039>

15. 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>
16. **Lozynskiy, V.**, Medianyuk, V., Saik, P., Rysbekov, K., & Demydov, M. (2020). Multivariate solutions for designing new levels of coal mines. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 35(2), 23-32. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.2.3>
17. 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), 155-172. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.137>
18. **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. *Inzynieria Mineralna*, 19(2), 289-300. <http://doi.org/10.29227/IM-2018-02-36>
19. **Lozynskiy, V.**, Dychkovskiy, R., Saik, P., & Falshtynskiy, V. (2018). Coal Seam Gasification in Faulting Zones (Heat and Mass Balance Study). *Solid State Phenomena*, (277), 66-79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.66>
20. 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>
21. Dychkovskiy, R.O., **Lozynskiy, V.H.**, Saik, P.B., Petlovanyi, M.V., Malanchuk, Ye.Z., & Malanchuk, Z.R. (2018). Modeling of the disjunctive geological fault influence on the exploitation wells stability during underground coal gasification. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1183-1197. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.012>
22. 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>
23. 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>
24. 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>
25. **Lozynskiy, V.**, Saik, P., Petlovanyi, M., Sai, K., & Malanchuk, Ye. (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>
26. Falshtynskiy, V.S., Dychkovskiy, R.O., Saik, P.B., **Lozynskiy, V.G.**, & Cabana, E.C. (2017). Formation of thermal fields by the energy-chemical complex of coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 36-42.

27. Saik, P.B., Dychkovskiy, R.O., **Lozynskiy, V.G.**, Malanchuk, Z.R, & Malanchuk, Ye.Z. (2016). Revisiting the underground gasification of coal reserves from contiguous seams. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 60-66.

28. **Lozynskiy, V.G.**, Dychkovskiy, R.O., Falshtynskiy, V.S., Saik, P.B., & Malanchuk, Ye.Z. (2016). Experimental study of the influence of crossing the disjunctive geological fault on thermal regime of underground gasifier. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 21-29.

29. 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>

30. 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>

31. Saik, P., Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., & **Lozynskiy, V.** (2015). Revisiting the preservation of uniformity advance of combustible face. *Mining of Mineral Deposits*, 9(4), 487-492. <https://doi.org/10.15407/mining09.04.487>

32. **Lozynskiy, V.**, Falshtynskiy, V., Saik, P., & Lozynska, M. (2025). Substantiation of the parameters for underground gasifier combustion face advance considering the influence of magnetic fields on the gasification process intensification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1491(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012041>

33. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., & **Lozynskiy, V.** (2025). Aspects of co-utilization of solid waste and coal through underground gasification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1457(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012002>

34. **Lozynskiy, V.**, Falshtynskiy, V., Kozhantov, A., Kieush, L., & Saik, P. (2024). Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012045>

35. 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>

36. 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>

37. 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), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012031>

38. Saik, P., Maksymova, E., **Lozynskiy, V.**, Cabana, E., & Petlovanyi, M. (2021). Synergistic approach as an innovative basis for obtaining a natural gas substitute. *E3S Web of Conference*, (230), 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001022>
39. Saik, P., **Lozynskiy, 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>
40. Saik, P., Dychkovskiy, R., **Lozynskiy, 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>
41. Petlovanyi, M., **Lozynskiy, 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>
42. Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., **Lozynskiy, V.**, & Saik, P. (2015). Analytical, laboratory and bench test researches of underground coal gasification technology in National Mining University. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 97-106. <https://doi.org/10.1201/b19901-19>
43. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., **Lozynskiy, V.**, & Saik, P. (2015). Development the concept of borehole underground coal gasification technology in Ukraine. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 91-95. <https://doi.org/10.1201/b19901-18>
44. Bondarenko, V., **Lozynskiy, V.**, Sai, K., & Anikushyna, K. (2015). An overview and prospectives of practical application of the biomass gasification technology in Ukraine. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 27-32. <https://doi.org/10.1201/b19901-6>
45. **Лозинський, В.** (2024). Чисельний аналіз температури стінки підземного каналу при спалюванні вугільного пилу. *Збірник наукових праць НГУ*, (79), 69-86. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.069>
46. 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>
47. 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>
48. 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>
49. 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>

50. 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: [https://jdmi.donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/06/Saik\\_JDMI\\_2\\_17.pdf](https://jdmi.donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/06/Saik_JDMI_2_17.pdf)

51. **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. <https://doi.org/10.33271/DUT.008>

52. Falshtynskiy, V., Saik, P., Dychkovskiy, R., & **Lozynskiy, V.** (2021). Optimization of energy efficiency of heat recuperator on the basis of underground coal gasification. *Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions*, 276-293. Petroșani, Romania: Universitas Publishing. <https://doi.org/10.31713/m1017>

53. 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. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/152333>

54. **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

55. Саїк, П.Б., **Лозинський, В.Г.**, & Янкін, Д.С. (2024). *Трубопровід для підземної газифікації твердого палива*. Патент на корисну модель UA №159882, Опубл. 16.07.2025. Бюл. №25. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1866376/>

56. 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/>

57. **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/>

58. 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/>

59. 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/>

60. Фальштинський, В.С., Саїк, П.Б., **Лозинський, В.Г.**, & Дичковський, Р.О. (2021). *Спосіб утилізації відходів при підземній газифікації твердого палива*. Патент на винахід UA №124678, Опубл. 27.10.2021. Бюл. №43. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1635210/>

61. 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/>
62. Фальштинський, В.С., Саїк, П.Б., **Лозинський, В.Г.**, & Дичковський, Р.О. (2020). *Спосіб утилізації відходів при підземній газифікації твердого палива*. Патент на винахід UA №140150, Опубл. 10.02.2020. Бюл. №3. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1414530/>
63. Фальштинський, В.С., Саїк, П.Б., Дичковський, Р.О., **Лозинський, В.Г.**, & Кабана, Е.К. (2018). *Спосіб утилізації відходів при газифікації вугілля*. Патент на винахід UA №125703, Опубл. 25.05.2028. Бюл. №10. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/362235/>
64. 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/>
65. **Lozynskyi, V.**, Lozynska, M., & Bas, I. (2024). Modeling the material and heat balance of the co-gasification process. In *Ukrainian School of Mining Engineering*, (pp. 39-42). Skhidnytsia, Ukraine. Retrieved from: <https://doi.org/10.33271/usme17.039>
66. 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/>
67. Lozynskyi, V., & Kieush, L. (2023). Prospective directions in thermochemical conversion of coal into syngas. In *Ukrainian School of Mining Engineering*, (pp. 9-10). Skhidnytsia, Ukraine. <https://doi.org/10.33271/usme16.009>
68. 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>
69. 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>
70. Саїк, П., & **Лозинський, В.** (2021). До питання відбору тепла при газифікації вугілля. У *Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: Міжгалузеві диспути* (с. 306-310). Київ, Україна. [https://openscilab.org/wp-content/uploads/2021/03/suchasni-vikliki-i-aktualni-problemi-nauki-osviti-ta-virobnictva-mizhgaluzevi-disputi\\_2021\\_02\\_26.pdf](https://openscilab.org/wp-content/uploads/2021/03/suchasni-vikliki-i-aktualni-problemi-nauki-osviti-ta-virobnictva-mizhgaluzevi-disputi_2021_02_26.pdf)
71. Saik, P., **Lozynskyi, V.**, & Lozynska, T. (2020). On the issue of temperature gradient distribution in the rock massif during the study of coal gasification processes. In *Ukrainian School of Mining Engineering*, (pp. 81-82). Berdiansk, Ukraine. <https://doi.org/10.33271/usme14.081>

72. Saik, P., & **Lozynskiy, 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>

73. 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. <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/63a33236-f900-4572-9b1f-8e9e4ed8c3e8>

74. Saik, P., **Lozynskiy, 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.

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

76. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2018). Physical & chemical processes for coal destruction in underground gas generator. In *Materials of the International Scientific and Practical Conference “Physical and Chemical Geotechnologies-2018”* (pp. 16-18). Dnipro, Ukraine. Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/e7014fdf-6042-4025-aff0-97ae4ccc5517>

77. Саїк, П., **Лозинський, В.**, & Демидов, М. (2018). Формування концепції розвитку гірничодобувних підприємств. У *Матеріалах XII міжнародної науково-практичної конференції “Школа підземної розробки”*, (с. 93-94). Бердянськ, Україна. Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/b9f6eb19-795e-4041-a783-9d6e1d08c8df>

78. Saik, P.V., **Lozynskiy, 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. <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/ed203c29-2181-4768-ae57-0800db571512>

79. Саїк, П., **Лозинський, В.**, & Болишева, К. (2017). До питання утилізації твердих побутових відходів у підземних газогенераторах. У *Матеріалах XI міжнародної науково-практичної конференції “Школа підземної розробки”*, (с. 53-54). Бердянськ, Україна. Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/cfe31ad5-7975-4c81-a419-e26221648f3b>

80. 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). Бердянськ, Україна. Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/d682ca56-09e4-49a3-bf9d-5e232fea7047/content>

81. 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>

82. **Lozynskyi, V., & Saik, P. (2015).** Experimental studies of crossing the disjunctive geological faults with underground gasifier. In *XXII Międzynarodową Konferencję Naukowo-Techniczną Górnicze "Zagrożenia Naturalne 2015"*, (pp. 16-17). Targanice k/Żywca, Poland. Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/8721a00a-1ad6-40cb-a523-c6e0cfd3f350>

**Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві:** [58, 64, 75] – створення та випробування експериментальних стендів; [3, 9, 12, 14, 17, 22, 28, 42, 54] – проведення експериментальних досліджень, аналіз та обробка результатів; [5, 6, 10, 32, 34, 51] – дослідження та впровадження фізичних методів інтенсифікації; [12, 26, 36, 47] – формування методики проведення досліджень; [11, 21, 25, 41, 69, 82] – розрахунок та аналіз геомеханічної ситуації навколо підземного газогенератора; [15, 16, 29, 31, 40, 46, 54] – аналіз гірничо-технічних умов; [20, 35, 49, 80, 81] – аналіз трендів вугільної промисловості України; [13, 50, 66, 67, 72, 76] – аналіз хімізму процесу газифікації; [18, 19, 48 65] – обґрунтування параметрів матеріально-теплого балансу процесу газифікації; [39, 71, 73] – оцінка температурного поля навколо вогневого вибою; [2, 7, 23, 27, 38, 44] – аналіз літературних джерел, опрацювання та систематизація даних; [37, 53] – економічна оцінка технології газифікації; [43, 68, 70, 74, 77 – 79] – розробка концепції технології термохімічного перетворення вугілля в генераторний газ; [24, 29, 33, 52, 55 – 57, 59 – 63] – розробка технології та способів підземної газифікації вугілля та вуглецевмісної сировини.

## АНОТАЦІЯ

*Лозинський В.Г.* Наукові основи воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля. – 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.

Дисертація присвячена вирішенню нової актуальної наукової проблеми з розробки наукових основ воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля, які ґрунтуються на закономірностях зміни параметрів термохімічних процесів у реакційному каналі при формуванні високотемпературної зони окислення підземного газогенератора, що дає можливість інтенсифікувати вигазовування вугільних пластів.

У роботі обґрунтовано методичні, технологічні та фізико-хімічні засади формування ефективного процесу підземної когазифікації вугілля з урахуванням складу дуття, температури та дії зовнішніх фізичних факторів. Встановлено залежності між параметрами парокисневого дуття, температурним полем і складом генераторного газу, а також показано, що намагнічування дуття знижує енергію активації реакцій та підвищує швидкість посування вогневого вибою. Розроблені підходи забезпечують підвищення вмісту водню у генераторному газі та збільшення теплотворної здатності.

Отримані результати комп'ютерного моделювання узгоджуються з результатами аналітичних розрахунків та експериментальними даними й

підтверджують релевантність моделювання для прогнозування ефективності когазифікації. Розроблено практичні рекомендації щодо вибору раціональних режимів роботи підземних газогенераторів, визначення оптимального складу дуття та параметрів управління процесом. Економічна оцінка показала, що впровадження воднево-орієнтованої когазифікації забезпечує підвищення прибутковості, що підтверджує доцільність її промислового впровадження як інноваційної технології низьковуглецевої енергетики.

*Ключові слова:* підземна когазифікація, підземна газифікація, вугілля, водень, генераторний газ, вогневий вибій, підземний газогенератор.

## ABSTRACT

*Lozynskyi V.H.* Scientific foundations of hydrogen-oriented underground coal co-gasification. – 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 that addresses an urgent scientific and technical problem – the development of scientific foundations of underground coal co-gasification with an orientation towards hydrogen production. The methodological and technological approaches proposed in the research are based on the identified patterns of parameter variations in the high-temperature oxidation zone of the underground gasifier and the influence of external physical factors on the kinetics of thermochemical processes. This provides an opportunity to increase gas generation efficiency, ensure the georeactor system thermochemical stability, and substantiate the prospects of utilizing coal resources to produce a strategically important energy carrier – hydrogen.

Based on bibliometric analysis, it has been found that the intensity of scientific research in coal gasification is characterized by pronounced cyclicality, caused by global energy challenges. An analysis of publications in the Scopus database for the period of 1970 – 2025 demonstrates a wave-like dynamics of scientific interest, where peaks of research activity coincide with periods of global energy crises and sharp increases in oil prices, confirming the sensitivity of the scientific community to changes in the energy market. Since 2005, a steady growth in the number of publications has been observed, indicating a renewed interest in underground coal gasification as an innovative technology for coal seam mining. Thus, it is confirmed that coal gasification remains a highly demanded technology capable of enhancing energy security and providing a strategic pathway for developing low-carbon energy.

The underground coal gasification process is considered a multi-stage thermochemical transformation that encompasses pyrolysis, combustion, gasification, and secondary reactions, which determine the composition and calorific value of the producer gas. The key reactions involve the interaction of carbon with oxygen, water vapor, and combustion products, the equilibrium of which strongly depends on temperature, pressure, and the composition of the oxidizing agent. It has been revealed that at a temperature of 950 – 1000°C, the reduction of CO<sub>2</sub> to CO intensifies, whereas elevated pressure promotes CH<sub>4</sub> formation. It has been proven that the ash components

of coal catalyze water-gas reactions, thereby increasing the energy yield. At the same time, the limited extent of the reduction zone complicates the completion of reactions, reducing the process efficiency and highlighting the need for optimization of the thermal regime.

Experimental studies demonstrate that applying injection backfilling of deformed roof rocks reduces losses of oxidizing agents and gas. At the same time, using flexible pipelines with activators ensures uniform advancement of the combustion face, shortens the time to achieve the active regime, and decreases the need for flow reversal. The gasifier design with directed oxidant injection made it possible to increase the degree of coal conversion by up to 12% and enhance the gas calorific value by 18%, thereby expanding the applicability of underground gasification in thin seams.

A comparison of experimental, semi-industrial, and calculated data has revealed a high convergence of results regarding producer gas composition. The MT Balance software provides adequate predictions of CO, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> concentrations with an accuracy of 85 – 95%, which confirms the relevance of laboratory-scale modeling for assessing the efficiency of underground coal gasification.

An analytical analysis of the influence of oxygen in the oxidant stream has revealed a nonlinear dependence of the combustion face advance rate, which the Michaelis-Menten model can describe. It has been determined that the optimal O<sub>2</sub> concentration in the oxidant stream is 42%, since this level ensures the maximum balance between process productivity and economic feasibility. The advance rate of the combustion face increases significantly up to this threshold. However, a further rise in oxygen concentration to 65% leads to saturation and only a marginal increase in velocity. The obtained results provide a scientifically substantiated basis for determining rational operating regimes of underground gasifiers depending on the oxidant composition.

The activation mechanism of steam-air oxidant using magnetic fields has been investigated. It is based on intercombination transitions of oxygen and water molecules from the stable singlet state to the excited triplet state due to electron spin reorientation in an inhomogeneous magnetic field. Effective oxidant activation can be achieved by applying low-intensity permanent magnetic fields in contact with gaseous products and magnetized solid surfaces. Analytical calculations based on the Arrhenius equation confirm the experimental findings, indicating an increase in the gasification reaction rate due to the additional internal energy of molecules.

It has been found that applying magnetic fields in the gasification of carbonaceous feedstock within the temperature range of 800 – 1000°C provides a 10% reduction in activation energy under the influence of a magnetic field with an intensity of 500 E. This also leads to an exponential increase in the reaction rate constant by a factor of 6.74 – 7.11, which is reflected in the higher participation of carbon in gasification reactions, reaching 51.5 – 58.9%. The obtained dependences quantitatively confirm the significant influence of magnetic fields on process kinetics and substantiate their application as a promising direction for the intensification of underground coal gasification. Thus, magnetic activation of the oxidant enhances process efficiency and forms a scientific basis for the development of innovative technological solutions in underground co-gasification.

A numerical–analytical methodology has been developed for modeling the combustion of coal dust in the reaction channel of a coal seam, taking into account the geometric, physicochemical, and thermohydrodynamic parameters of the medium. Applying a CFD-based approach using Ansys Fluent made it possible to adequately describe multiphase turbulent flow, heat transfer, diffusion, and chemical reactions, ensuring high accuracy of spatial-temporal prediction of temperature fields, gas component concentrations, and flow dynamics. The developed computational model reproduces the actual configuration of the reaction channel. In contrast, using the non-premixed combustion and PDF model for turbulent fluctuations ensured the correct simulation of diffusion combustion processes. The determined maximum temperatures (1400 – 1540°C) are formed in the inlet part of the channel during the first 12 hours of gasifier operation, after which a quasi-stationary regime occurs with a gradual decrease in temperature to 490 – 520°C in the distal section of the reaction channel (10 – 30 m). The effective temperature interval for co-gasification (900 – 1200°C) is reached after 12 hours of combustion and is maintained throughout the entire operational cycle.

The patterns of the spatial-temporal distribution of the chemical composition of the gas phase and flow dynamics have been investigated. Oxygen is found to be consumed intensively within the first 3 – 6 m of the channel, while the active combustion zone is limited to 10 m in length. The main reaction products are formed near the inlet, where the mass CO fraction reaches its maximum ( $\approx 11\%$ ) at a distance of 6 – 8 m, whereas  $\text{CH}_4$  and  $\text{H}_2$  are generated within 0 – 5 m along the channel and subsequently decrease due to secondary reactions.

An analytical model of temperature propagation in an anisotropic rock mass has been developed, considering thermal conductivity. For argillite ( $\alpha = 0.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), the temperature at a depth of 0.5 m does not exceed 300°C even after 48 hours, while for sandstone ( $\alpha = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) it reaches 700 – 800°C within only 12 hours. The results obtained provide a comprehensive understanding of the interaction between thermal and gas-dynamic processes in the reaction channel. They create a basis for predicting the efficiency of underground gasifier operation.

A mathematical model of the reaction channel thermal balance has been developed and tested, based on the identified patterns of thermal interaction between the high-temperature oxidation zone and the surrounding rocks. These are expressed by the exponential decrease in the dimensionless temperature  $\theta$  with increasing Fourier number  $\text{Fo}$ , the growth of cumulative heat losses  $\Delta Q$  with time  $\tau$ , and the reduction of relative heat losses  $\eta$ .

The analysis of the material and thermal balance shows that the application of steam-oxygen oxidant ( $\text{O}_2$  – 42%,  $\text{H}_2\text{O}$  – 10%) provides a lower calorific value of the producer gas of 9.27 – 9.70 MJ/m<sup>3</sup>. In contrast, an increase in the carbon fraction in the feedstock enhances the gas yield and total calorific value but reduces the chemical efficiency.

Critical limits of additional carbon input ( $\Delta C$ ) have been determined, at which the process efficiency does not decrease below two-thirds of the maximum value, taking into account the standard error, and amount to 7.5% for air-blown, 52.0% for oxygen-blown, and 63.0% for steam-oxygen-blown gasification. A nomogram for optimizing the feedstock composition has been constructed to ensure maximum energy yield and stable operation of the co-gasification process.

Based on computer modeling in the ANSYS Fluent software environment, for the first time, quantitative dependences have been determined between feedstock composition, oxidant type, activation energy of reactions, and key parameters of producer gas under underground co-gasification conditions. It has been proven that substitution of coal dust with biomass (up to 75%), combined with steam-oxygen oxidant ( $O_2 - 42\%$ ,  $H_2O - 10\%$ ), provides an increase in hydrogen content from 4.0% to 8.25%, the total concentration of combustible components from 28.0% to 37.8%, and LHV from 6.36 to 7.7 MJ/m<sup>3</sup>. Modeling the effect of reducing the activation energy from 200.0 to 179.8 kJ/mol, as an equivalent to the influence of a magnetic field, has revealed a further increase in  $H_2$  to 10.56%, CO to 17.60%, and LHV to 7.98 MJ/m<sup>3</sup>.

It has been found that co-gasification of coal dust with biomass at a 25/75 ratio ensures stabilization of the oxidation zone temperature above 1000°C for 2.3 hours, which exceeds the corresponding indicators for coal gasification alone. A cyclic alternation of oxidant regimes (steam-oxygen/oxygen) are proposed to maintain the operating temperature range of 1000 – 1050°C.

It has been determined that magnetic activation of steam-oxygen oxidant during underground coal co-gasification intensifies thermochemical reactions by lowering the activation energy in the high-temperature oxidation zone. It is shown that the influence of an inhomogeneous magnetic field on oxygen and water vapor molecules promotes the formation of triplet states, increases their reactivity, and accelerates the rate of coal conversion. With magnetic activation of the oxidant, the combustion face advance rate increases from 1.37 to 1.54 m/day. This allows for a reduction of reversal intervals from 2.6 to 2.0 days while maintaining the stability of the georeactor system, preventing excessive elongation of the reaction channel.

The proposed technological scheme is oriented toward enhanced hydrogen production, under which the  $H_2$  yield doubles (from 0.174 to 0.364 m<sup>3</sup>/kg), accompanied by a reduction in gasifier operating time by 11.5%. This results in increased revenue from hydrogen sales from 114 to 239 million UAH and an increase in total electricity production from 44.2 to 87.4 thousand MWh.

Incremental economic analysis confirms the attractiveness of investment in innovative technology. The preference index is 1.66 with an economic resilience margin of 175.9 million UAH per gasifier. Even in the worst-case scenario (–10% in product sale price and +10% in raw material and/or energy costs), the index remains at 1.53 with an additional effect exceeding 110 million UAH.

A comprehensive assessment of the suitability of coal seams at the “Zakhidno-Donbaska” mine for the implementation of co-gasification was carried out using the PSI method, which eliminates the subjectivity of weight coefficients and enables more accurate ranking of coal seams. Unlike the standard weighted average method, which indicates relatively uniform suitability of the selected seams (0.67 – 0.74), the use of PSI provides a clearer ranking and identifies the most promising seams for introducing co-gasification technology. The highest integral scores obtained for seams  $c_9$  (0.908) and  $c_{10}^v$  (0.876) confirm their mining priority. The maximum discrepancy between the methods is about 21%, with an average of 10.5%.

*Keywords:* underground co-gasification, underground gasification, coal, hydrogen, producer gas, combustion face, underground gasifier.

**ЛОЗИНСЬКИЙ Василь Григорович**

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВОДНЕВО-ОРІЄНТОВАНОЇ  
ПІДЗЕМНОЇ КОГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ**

(Реферат)

Підписано до друку 04.12.2025. Формат 60×90/16.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,9.  
Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. №26

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