

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Лозинського Василя Григоровича

на тему: «*Наукові основи воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля*»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин

Відгук складено на основі вивчення дисертації, опублікованих здобувачем наукових праць, а також документів, що свідчать про реалізацію та впровадження результатів проведених досліджень.

1. Актуальність обраної теми досліджень

Обрана тема дисертаційної роботи є безумовно актуальною в контексті сучасних тенденцій розвитку світової та національної енергетики, які характеризуються одночасною потребою у підвищенні енергетичної безпеки та зниженні вуглецевого сліду. Підземна газифікація вугілля належить до технологій, що дозволяють поєднати видобування та переробку вугілля без традиційних гірничих робіт, з мінімізацією впливу на поверхню та довкілля. В умовах поступового згортання класичного шахтного видобутку та необхідності переорієнтації вуглепромислових регіонів на сучасні технології переробки корисних копалин підземна когазифікація створює можливість збереження промислового потенціалу, робочих місць і водночас переходу до більш екологічно прийнятних схем використання вугілля. Додатковим чинником актуальності є орієнтація України та інших країн на розвиток водневої енергетики, для якої генераторний газ із підвищеним вмістом водню може слугувати важливою сировинною базою.

Важливим аспектом є те, що наявні у світовій практиці підходи до підземної газифікації вугілля ще не забезпечують належного рівня керованості процесів, стабільності фронту вигазовування та селективності утворення цільових компонентів (H_2 , CO та CH_4) за умови реальної геолого-технічної мінливості вугільних пластів. Питання інтенсифікації процесу за рахунок фізичних полів, зокрема магнітної активації парокисневого дуття, досі висвітлені фрагментарно й не мають достатнього комплексу чисельного, аналітичного та експериментального обґрунтування. Так само недостатньо опрацьованими залишаються питання сумісного впливу складу паливної шихти (вугілля/біомаса), режимів дуття, кінетики окислювально-відновних реакцій і теплового стану породного масиву у єдиній моделі підземної когазифікації. У цьому контексті розробка чисельно-аналітичних підходів (CFD-моделювання процесу горіння у каналі пласта, побудова матеріально-теплових балансів, опис впливу магнітних полів на кінетику реакцій) заповнює суттєву науково-прикладну прогалину.

Окремої уваги заслуговує спрямованість дисертаційного дослідження на технологічні та економічні аспекти впровадження підземної когазифікації. Питання вибору придатних вугільних пластів, оцінки їхніх геолого-гідрогеологічних та гірничотехнічних характеристик за допомогою багатокритеріальних методів, розробка

технологічних схем підземного газогенератора та оцінка економічної ефективності процесу термохімічного перетворення вугілля в генераторний газ є надзвичайно важливими для реальної промислової реалізації. Комплексний підхід, що поєднує фундаментальні уявлення про термохімічні процеси, проведення стендових експериментальних досліджень, інструменти чисельного моделювання, методи багатокритеріального аналізу та техніко-економічну оцінку, робить тему дослідження своєчасною і затребуваною як з позицій розвитку наукових основ підземної когазифікації, так і з точки зору практичних завдань модернізації вугільної галузі та формування воднево-орієнтованих технологій.

2. Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і темами

Тема дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з пріоритетними науковими програмами та темами, що виконувались на кафедрі гірничої інженерії та освіти. Дослідження проведено відповідно до плану найважливіших держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України за період 2016 – 2025 рр.: ГП-487 (0116U008041), ГП-489 (0117U001127), ГП-500 (0119U000248), ГП-503 (0120U102084), ГП-511 (0122U001301), ГП-512 (0123U100985), ГП-516 (0123U101757). Здобувач є керівником проєкту молодих вчених (ГП-512) «Когазифікація вуглецевмісної сировини при вигазуванні надтонких вугільних пластів з орієнтацією на отримання водню», 2023 – 2025 рр. Враховуючи вищезазначене, вважаю, що актуальність теми дисертаційного дослідження є важливою для ефективного розвитку енергетичного сектору України.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність та наукова новизна

Наукові положення, що виносяться на захист здобувачем, цілком відбивають отримані наукові результати.

Наукові положення, що виносяться на захист сформульовані автором таким чином.

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.

Результати, що покладені в основу трьох наукових положень, досить широко опубліковані автором у періодичних виданнях і обговорені на наукових конференціях. Положення у зазначеному вигляді декларуються вперше.

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-ε 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 θ зі збільшенням критерію Фур'є Fo , збільшенням кумулятивних теплових втрат ΔQ з часом τ та зменшенням відносних втрат тепла η ;

– 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 активізації 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.

Новизна результатів дослідження не викликає сумнівів.

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

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 467 найменувань, 3 додатків на 27 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 475 сторінок, у тому числі 121 рисунок та 23 таблиці. Вважаю, що характер змісту дисертаційної роботи відповідає її обраній назві.

Дисертаційну роботу викладено логічно, аргументовано та грамотною технічною мовою. Текст роботи супроводжується пояснювальними рисунками та таблицями, результати розрахунків винесено в додатки, що вказує на її цілісність та структурованість. Дисертаційна робота має чітку структуру і побудована на основі структуро-логічної схеми проведення досліджень.

Перший розділ дисертації вирізняється ґрунтовністю та високим рівнем системності при аналізі сучасного стану проблеми підземної газифікації вугілля. Автор послідовно розкриває передумови розвитку технології та її роль у формуванні альтернативних джерел енергетичної сировини, що підтверджує актуальність обраної тематики. Значний науковий рівень підтверджує проведений бібліометричний аналіз, який не лише відображає динаміку публікаційної активності, а й виявляє ключові драйвери наукового інтересу, зокрема зв'язок між хвилеподібністю публікаційної активності та глобальними енергетичними кризами. Висвітлена автором регіональна структура наукових колаборацій є репрезентативною та чітко відображає провідну роль наукових шкіл. Методологічно коректно виконаний систематичний огляд рецензованих статей (PRISMA) та використання інструментів семантичного аналізу (VOSviewer, Elicit) свідчать про високий рівень володіння автором сучасним науковим інструментарієм і забезпечують надійну основу для формування переліку ключових напрямів інтенсифікації процесу газифікації. Критичний огляд існуючих способів інтенсифікації підземної газифікації, представлений у підрозділах 1.3.1 – 1.3.10, демонструє всебічність підходу та здатність автора до аналітичного узагальнення великого масиву теоретичних і практичних напрацювань. Розгляд традиційних та інноваційних напрямів представлено порівняно та критично, з визначенням їхніх сильних сторін, обмежень та потенціалу для подальших досліджень. Особливо варто відзначити науково обґрунтовані висновки щодо перспективності когазифікації та застосування магнітних полів, що логічно випливають зі здійсненої автором семантичної візуалізації та тенденцій сучасної наукової думки. Узагальнення

результатів розділу є структурованим, аргументованим і повністю корелює з поставленою метою та сформульованими завданнями дисертації, забезпечуючи міцне теоретичне підґрунтя для подальших експериментальних та модельних досліджень у наступних розділах роботи.

Другий розділ дисертації містить послідовно викладений теоретичний та експериментальний матеріал, що дозволяє ґрунтовно описати термохімічні процеси утворення генераторного газу та фактори, які визначають їх інтенсивність. Результати експериментальних досліджень подані структуровано і логічно, що дає змогу чітко оцінити вплив конструктивних та технологічних рішень на ефективність процесу газифікації. Показано, що вдосконалення системи подачі дугтя, застосування гнучких трубопроводів та ін'єкційного закладання покрівлі забезпечують підвищення виходу генераторного газу та прискорення руху вогневого вибою. Переконаливо виконано порівняльний аналіз експериментальних і розрахункових даних, який підтвердив високу точність прогнозування складу газу. Використання моделі типу Міхаеліса-Ментена для опису залежності швидкості посування вибою від концентрації O_2 є методологічно вдалим рішенням і дозволило визначити оптимальні параметри дугтя. Загалом матеріал розділу демонструє наукову обґрунтованість та прикладну цінність отриманих результатів.

Третій розділ дисертації містить цілісний науковий аналіз механізмів впливу магнітних полів на процес газифікації вугілля та охоплює як теоретичні аспекти, так і аналітичні дослідження кінетики реакцій. Автор послідовно обґрунтовує фізичну природу активації пароповітряної суміші шляхом інтеркомбінаційних переходів молекул води та кисню, подає кількісні залежності зміни енергії активації та констант швидкості реакцій. Значну увагу приділено методиці аналітичного дослідження, що дає можливість відтворити взаємодію реагентів дугтя і вуглецевмісної сировини у магнітному полі в умовах, близьких до натурних. Автор робить обґрунтований висновок про доцільність застосування магнітних полів і електромагнітного нагрівання як засобів зниження енергії активації, підвищення констант швидкості реакцій і загальної ефективності газифікації. Представлений матеріал створює переконливу наукову основу для оптимізації процесу ПГВ та впровадження фізичних методів інтенсифікації у промислову практику.

У четвертому розділі подано ґрунтовне обґрунтування застосування CFD-методів для моделювання процесів горіння у реакційному каналі вугільного пласта. Автором коректно використано моделі енергії, в'язкості, дифузійного горіння та PDF-підхід. Запропонована чисельно-аналітична схема створює цілісну основу для прогнозування температурних, газодинамічних та хімічних характеристик процесу. Результати моделювання подані системно і дають можливість комплексно оцінити розвиток температурних полів, розподіл газових компонентів і поведінку потоку впродовж тривалого процесу горіння. Автор встановлює закономірності формування високотемпературної зони, квазістаціонарного режиму горіння, зміни теплоємності порід, споживання O_2 та утворення CO , CH_4 і H_2 . Окремо проаналізовано динаміку швидкостей, турбулентності й густини газів. Сукупність отриманих даних формує

науково і методично обґрунтовану картину процесу спалювання вуглецевмісної сировини.

П'ятий розділ висвітлює результати дослідження когазифікації вугілля та вуглецевмісної сировини, в якому послідовно розкрито хімічні, термодинамічні та технологічні аспекти процесу. Детально проаналізовано вплив біомаси на реакційну здатність шихти, умови ініціювання процесу та формування генераторного газу. У розділі послідовно представлено аналітичні підходи до оцінки теплових втрат, їх зв'язок з теплопровідністю порід та регуляторними можливостями дуття. Представлено результати аналітичних розрахунків, матеріально-теплових балансів і CFD-моделювання, які дозволяють оцінити вплив типу дуття, частки біомаси та енергії активації на склад синтез-газу і теплову ефективність когазифікації. Автор визначає межі доцільного додаткового залучення вуглецю, представляє номограму оптимізації складу шихти та обґрунтовує умови досягнення цільового співвідношення H_2/CO для подальшого хімічного синтезу. Важливим елементом є аналіз часових характеристик роботи газогенератора та визначення режимів комбінування дуття, що забезпечують підтримання стабільного температурного інтервалу та ефективність процесу.

Шестий розділ є логічним завершенням роботи, в якому проведено комплексний технологічний аналіз процесу підземної когазифікації вугілля з урахуванням впливу магнітних полів, кінетичних особливостей вигазовування та умов функціонування геореакторної системи. Автор послідовно описує механізм прискорення реакційного фронту під дією магнітно активованого дуття, обґрунтовує корекцію параметрів руху вогневого вибою та формує технічні рішення для підготовки газогенератора. Наведені дані свідчать про здатність магнітної активації підвищувати швидкість вигазовування. Значну увагу приділено методології оцінки придатності вугільних пластів, де застосування багатокритеріального методу PSI забезпечує об'єктивне ранжування пластів і дозволяє визначити найбільш перспективні ділянки для впровадження технології. Узагальнено технічні, технологічні та економічні результати впровадження когазифікації з використанням біомаси та магнітно активованого парокисневого дуття. Автор наводить обґрунтовану технологічну схему, рекомендації щодо організації робіт, підходи до формування поверхневого комплексу й циклограми вигазовування. Важливою складовою є економічний аналіз, який підтверджує суттєве зростання виробничої ефективності – від збільшення виходу водню та електричної енергії до скорочення тривалості роботи газогенератора. Інкрементальний підхід дав змогу кількісно оцінити приріст економічного ефекту.

Дисертація викладена грамотною технічною мовою, гірнича термінологія представлена якісною українською мовою і відповідає вимогам МОН щодо оформлення.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 82 наукові праці, у тому числі: 31 статтю у журналах, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science, з яких 11 відносяться до кuartилів 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. Участь у міжнародних та всеукраїнських конференціях свідчить про ознайомлення наукової спільноти з отриманими результатами.

5. Значення роботи для науки, практики та суспільства

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 активізації 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).

Робота автора орієнтована на реальні підприємства ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» і ДП «Львіввугілля». Це підкреслює практичне значення роботи.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

Порушень принципів академічної доброчесності не виявлено.

7. Дискусійні положення

1. Представлений в першому розділі бібліометричний аналіз проблеми газифікації вугілля є цікавим і оригінальним підходом до визначення актуальності дослідження, який визначає сучасність проблеми та існуючі тренди, та відображає загальні статистичні дані з досліджень. Разом з тим відбиває здебільшого академічний інтерес до проблеми, не приділяючи належної уваги патентам, технічним звітам та відомим технологічним рішенням, обмежується базою Scopus, що не достатньо для оптимістичного висновку що «газифікація вугілля залишається затребуваною технологією, здатною ... забезпечити стратегічний напрям у розвитку низьковуглецевої енергетики».

2. В 3 розділі «кидається в око» непропорційність зростання константи швидкості реакції (6-7 разів) за відносно невеликого зменшення енергії активації (10%) в умовах впливу помірного магнітного поля (500 E), цей ефект потрібно пояснити, чи це тільки вплив поля, чи є інші фактори, наприклад температурний..

3. Аналітичне дослідження теплового нагрівання вугільного пласта в 3.3.2 виконано в надто спрощеній формі, доцільно було б врахувати теплопередачу в навколишньому середовищі, обґрунтувати межові умови. Слід відзначати, що гірська порода може екранувати магнітні поля, отже потрібно доповнити задачу переносу теплоти рівняннями електродинаміки Максвелла, а коректність моделі оцінити порівнянням розрахункових результатів з експериментальними даними або результатами інших авторів.

4. Моделі теплових процесів в п.4.4 (рівняння 4.17 і далі) а також п.5.3 (рівняння 5.16 і далі) є спрощеними і не враховують в явному вигляді тріщинуватості, газо- і гідродинаміки в пористому гірському середовищі, можливих фазових переходів, хімічних реакцій в породі, що обмежує використання отриманих результатів.

5. В четвертому розділі роботи описано налаштування CFD середовища, зокрема сітки, що використовувалось для моделювання, проте низка важливих параметрів невисвітлені, зокрема не визначено значення y^+ і чи використовувались пристінкові функції, чим обґрунтований вибір моделі турбулентності, чи проводилась калібровка моделі, яка модель газу використовувалась і як моделювався тепло- і газообмін з породою. Відповіді на ці питання мають підтвердити коректність результатів.

6. В роботі виявлено низку стилістичних неточностей, друкарських помилок, невдалих позначень та термінів, наприклад: зловживання терміном «активація» (активація молекули, енергія активації, активація дугтя, активація кривизни стінки, тощо), невірні розмірності в (2.4), (2.5), використання застарілої несистемної одиниці напруженості магнітного поля – ерстед, невірне позначення швидкості світла в (3.12), вживання «рішення» замість «розв'язання» тощо.

8. Загальний висновок щодо дисертаційної роботи

Зроблені зауваження та дискусійні моменти не мають принципового характеру та не впливають на наукові положення та загальні висновки по роботі. Дисертаційна робота написана грамотною технічною мовою і логічно побудована. Отримані в ході досліджень наукові результати є новими і оригінальними. Робота містить наукові положення, що характеризуються достатнім рівнем обґрунтованості та достовірності, науковою новизною та значимістю і є практично корисною для ефективної розробки родовищ корисних копалин.

Вважаю, що дисертаційна робота Лозинського Василя Григоровича «Наукові основи воднево-орієнтованої підземної когазифікації вугілля», представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – «підземна розробка родовищ корисних копалин» задовольняє всім вимогам, передбаченим постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 р. № 1197 «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів», затвердженому «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», а також наказу Міністерства освіти і науки України від 23.09.2019 року № 1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», зареєстрованого у Міністерстві юстиції України 8.10.2019 р. за № 1086/34057.

За розкриття нових закономірностей зміни параметрів термохімічних процесів у реакційному каналі при формуванні високотемпературної зони окислення підземного газогенератора, що дає можливість інтенсифікувати вигазування вугільних пластів і є підґрунтям для подальшого розвитку термохімічного способу перетворення вуглецевмісної сировини в наземних газогенераторних установках замкненого циклу. Лозинський Василь Григорович заслуговує на присудження ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05. 15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
зав. каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара

Андрій ДРЕУС

Директор з наукової роботи



Мартин О. М.



26.12.2025

М.В. Петлюковський