

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії чорних металів
і ливарного виробництва

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної атестаційної роботи бакалавра
зі спеціальності 136 – Металургія

на тему: Дослідження процесу металізації залізорудних матеріалів
біогенним відновником у шахтній печі.

Виконав:
студент групи МТ-22-2

Максим СУШКО

Керівник випускної роботи

Сергій САВЕЛЬЄВ

Нормоконтролер

Сергій САВЕЛЬЄВ

В.о. завідувача кафедри

Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг
2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра: металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою

_____ Сергій САВЕЛЬСВ

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до випускної атестаційної роботи бакалавра

СУШКА МАКСИМА ОЛЕГОВИЧА

1. Тема роботи: Дослідження процесу металізації залізорудних матеріалів біогенним відновником у шахтній печі

керівник роботи: д.т.н., професор Савельєв С.Г.

затверджено наказом по КНУ від «_19_» ____ 02 ____ 2026 р. № 113с

2. Строк подання роботи студентом «_12_» ____ 05 ____ 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: науково-технічна література та сучасні дослідження процесів прямого відновлення заліза; дані щодо складу і властивостей залізорудних окатишів та деревного вугілля; математична модель шахтної печі процесу BIORED типу REDUCTOR.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): хімічні реакції та балансові рівняння моделі; температурний режим і склад газової фази у шахтній печі; процес газифікації деревного вугілля; вплив технологічних параметрів на перебіг процесу (аналіз чутливості моделі); аналіз та узагальнення результатів екологічної оцінки.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація (_9_ стор. формату А4)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	Сучасний стан та перспективи розвитку технологій прямого відновлення залізорудних матеріалів	січень 2026 р.
2	Математичне моделювання процесів прямого відновлення залізорудних матеріалів	січень 2026 р.
3	Результати математичного моделювання процесу прямого відновлення у шахтній печі	січень 2026 р.
4	Експериментальне дослідження процесу відновлення та верифікація моделі	березень 2026 р.
5	Екологічна оцінка процесу bioged	квітень 2026 р.
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	травень 2026 р.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Максим СУШКО
(підпис)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Сергій САВЕЛЬЄВ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до роботи бакалавра на тему «Дослідження процесу металізації залізорудних матеріалів біогенним відновником у шахтній печі»: _55_ с., _12_ рис., _3_ табл., 31 літературне джерело

Об'єктом дослідження є процес металізації залізорудних матеріалів у шахтній печі.

Предметом дослідження є закономірності перебігу процесів відновлення оксидів заліза біогенним відновником та газифікації біомаси в умовах шахтної печі.

У розділі 1 проведено аналіз сучасного стану технологій виробництва заліза та обґрунтовано доцільність використання біогенного відновника у процесах прямого відновлення.

У розділі 2 наведено математичну модель процесу металізації залізорудних матеріалів у шахтній печі з урахуванням газифікації деревного вугілля та тепломасообміну.

У розділі 3 виконано чисельне моделювання процесу та визначено вплив температури, складу газу і реакційної здатності відновника на ступінь металізації.

У розділі 4 проведено експериментальну перевірку моделі методом термогравіметричного аналізу та встановлено її задовільну адекватність.

У розділі 5 Здійснено оцінку екологічного впливу процесу BIORED методом аналізу життєвого циклу та доведено його переваги над традиційною технологією.

МЕТАЛІЗАЦІЯ, ЗАЛІЗОРУДНІ ОКАТИШІ, ШАХТНА ПІЧ, БІОГЕННИЙ ВІДНОВНИК, ДЕРЕВНЕ ВУГІЛЛЯ, ПРЯМЕ ВІДНОВЛЕННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.Р			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Сушко						1	1
Перевірив	Савельєв							
Н. контр.	Савельєв							
Затверди	Савельєв					МТ-22-2		

[illegible]

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	
2.1 Передумови створення математичної моделі.....	
2.2 Основні припущення моделі.....	
2.3 Хімічні реакції та балансові рівняння моделі.....	
3 РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ У ШАХТНІЙ ПЕЧІ.....	
3.1 Температурний режим і склад газової фази у шахтній печі.....	
3.2 Процес газифікації деревного вугілля.....	
3.3 Кінетика та стадії відновлення залізородних окатишів.....	
3.4 Вплив технологічних параметрів на перебіг процесу (аналіз чутливості моделі).....	
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ.....	
5 ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ПРОЦЕСУ BIORED.....	
5.1 Методика оцінки екологічного впливу (LCA-аналіз).....	
5.2 Результати оцінки екологічного впливу процесу BIORED.....	
5.3 Аналіз та узагальнення результатів екологічної оцінки.....	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.3			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ЗМІСТ	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Сушко</i>						1	1
<i>Перевірив</i>	<i>Савельєв</i>							
<i>Н. контр.</i>	<i>Савельєв</i>					МТ-22-2		
<i>Затверди</i>	<i>Савельєв</i>							

ВСТУП

Сучасний розвиток металургійної промисловості супроводжується зростанням вимог до енергоефективності виробництва, раціонального використання природних ресурсів та зниження негативного впливу на довкілля. Чорна металургія належить до найбільш енергоємних галузей промисловості та є одним із значних джерел викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу. Значна частка цих викидів формується під час виробництва чавуну та сталі за традиційною технологічною схемою доменна піч – киснево-конвертерний процес, у якій широко використовуються викопні вуглецевмісні відновники. У зв'язку з цим одним із важливих напрямів розвитку сучасної металургії є пошук і впровадження технологій, що дозволяють зменшити вуглецевий слід металургійного виробництва.

Серед альтернативних технологічних рішень значну увагу приділяють процесам прямого відновлення залізорудних матеріалів, які дозволяють отримувати металізоване залізо без стадії плавлення руди. Порівняно з традиційним доменним виробництвом ці процеси характеризуються нижчим енергоспоживанням, можливістю використання різноманітних відновників та більш гнучкими технологічними схемами. Продукт прямого відновлення — губчасте залізо — широко використовується як шихтовий матеріал у електросталеплавильному виробництві, забезпечуючи стабільний хімічний склад металу та компенсуючи дефіцит високоякісного металобрухту.

Останніми роками значний інтерес викликає застосування альтернативних відновників, зокрема водню та біомаси, що дозволяє зменшити залежність металургійного виробництва від викопних енергоресурсів. Біомаса є відновлюваним ресурсом, а її використання у металургійних процесах розглядається як один із перспективних шляхів зниження викидів парникових газів

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.ВС			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	ВСТУП			
Розробив	Сушко							
Перевірив	Савельєв							
Н. контр.	Савельєв							
Затверди	Савельєв				МТ-22-2			

завдяки короткому вуглецевому циклу біогенного вуглецю. Продукти термічної переробки біомаси, зокрема деревне вугілля, можуть виступати ефективним відновником оксидів заліза та джерелом відновлювальних газів у процесах металізації.

Перспективним напрямом розвитку технологій прямого відновлення є поєднання процесів газифікації біомаси та відновлення залізорудних матеріалів у шахтних печах, що дозволяє реалізувати формування відновлювального газу безпосередньо в реакційному просторі агрегату. У таких умовах монооксид вуглецю, який утворюється під час газифікації біогенного вуглецю, може ефективно використовуватися для відновлення оксидів заліза. Це відкриває можливості створення нових енергоефективних та екологічно орієнтованих технологій металізації залізорудної сировини.

У зв'язку з цим дослідження процесів металізації залізорудних матеріалів із використанням біогенних відновників у шахтних печах є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на вдосконалення існуючих технологій прямого відновлення та зниження їхнього екологічного впливу.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Металургійна промисловість є одним із найбільших промислових джерел викидів парникових газів у світі. За сучасними оцінками, сталеплавильна галузь відповідає приблизно за 7 % глобальних викидів парникових газів та близько 10 % антропогенних викидів CO₂, що підтверджується як міжнародними дослідженнями, так і роботами українських науковців [1, 2]. Основна частка цих викидів формується під час виробництва сталі за традиційною технологічною схемою доменна піч – киснево-конвертерний процес, яка забезпечує близько 70 % світового виробництва сирової сталі [1]. Для доменних печей характерний високий рівень вуглецевих викидів: у середньому 1,5–1,8 т CO₂ на 1 т отриманого чавуну [3]. Такий рівень емісії обумовлений значним використанням викопного вуглецю у вигляді коксу та пиловугільного палива, що застосовуються як джерело тепла та відновника в процесі доменної плавки.

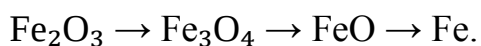
З огляду на глобальні тенденції до декарбонізації промисловості, зростання дефіциту енергоресурсів та посилення негативного впливу парникового ефекту, інтеграція відновлюваних джерел енергії у традиційні металургійні процеси набуває особливої актуальності. Крім того, підготовчі стадії доменного виробництва — коксування вугілля та агломерація залізорудної сировини — характеризуються значними капітальними витратами, високим енергоспоживанням і негативним екологічним впливом. У зв'язку з цим протягом останніх десятиліть активно розробляються альтернативні бездоменні технології виробництва заліза, серед яких важливе місце посідає процес прямого відновлення залізної руди. Ця технологія розглядається як перспективний напрям отримання металізованого заліза з відносно нижчим рівнем викидів CO₂ порівняно з традиційними доменними процесами [4–6].

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.01.ПР			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Сучасний стан та перспективи розвитку технологій прямого відновлення залізорудних матеріалів	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Сушко</i>						1	12
<i>Перевірив</i>	<i>Савельєв</i>					МТ-22-2		
<i>Н. контр.</i>	<i>Савельєв</i>							
<i>Затверди</i>	<i>Савельєв</i>							

Продукт процесу прямого відновлення — губчасте залізо — має низку технологічних переваг. Зокрема, він характеризується високим вмістом металевого заліза, відносно стабільним хімічним складом та низьким вмістом небажаних домішок. Завдяки цьому губчасте залізо може ефективно використовуватися як шихтовий матеріал у електродугових печах, частково компенсуючи дефіцит високоякісного металобрухту, який традиційно застосовується у сталеплавильному виробництві [7]. У сучасних умовах зростання попиту на сталь та обмеженості ресурсів якісного брухту використання губчастого заліза набуває дедалі більшого значення для забезпечення стабільності сировинної бази електросталеплавильного виробництва.

Серед різноманітних технологій прямого відновлення залізної руди особливу увагу привертають газові процеси прямого відновлення, у яких відновлення оксидів заліза здійснюється відновлювальними газами, що містять переважно монооксид вуглецю (CO) та водень (H_2). У порівнянні з процесами прямого відновлення на основі твердого палива такі технології характеризуються меншим питомим енергоспоживанням, вищою ефективністю використання відновлювального потенціалу газу та нижчими питомими викидами CO_2 . Це зумовлено більш рівномірним розподілом газового потоку в реакційному об'ємі агрегату, інтенсивним тепло- і масообміном між газовою та твердою фазами, а також можливістю точного регулювання температурного режиму та складу відновлювального газу.

Найбільшого промислового поширення серед газових технологій прямого відновлення набули шахтні процеси, які реалізовані у технологічних схемах MIDREX та HYL/ENERGIRON. У цих процесах залізорудні окатиші або кускова руда завантажуються у вертикальну шахтну піч і рухаються вниз під дією сили тяжіння, тоді як відновлювальний газ подається у нижню частину агрегату і рухається назустріч потоку твердого матеріалу. Така протитечійна схема руху фаз забезпечує ефективне використання тепла і відновлювального потенціалу газу та створює сприятливі умови для послідовного відновлення оксидів заліза за схемою

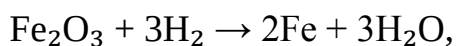


Відновлювальний газ у цих технологіях, як правило, отримують шляхом реформінгу природного газу, внаслідок чого утворюється суміш CO і H₂ з високим відновлювальним потенціалом. Температура газу, що подається у зону відновлення, зазвичай становить 900–1050 °C, що забезпечує інтенсивний перебіг реакцій відновлення та досягнення високого ступеня металізації залізорудного матеріалу. У результаті процесу утворюється губчасте залізо з типовим ступенем металізації 90–95 %, яке може безпосередньо використовуватися як шихтовий матеріал у електродугових печах або піддаватися гарячому брикетуванню з отриманням гарячебрикетованого заліза.

Завдяки високій технологічній ефективності та відносно низькому рівню викидів парникових газів газові шахтні процеси прямого відновлення отримали значне поширення у світовій металургійній практиці. За статистичними даними, у 2019 році приблизно 74 % світового обсягу виробництва губчастого заліза було отримано саме у газових шахтних печах [8]. Це підтверджує провідну роль даних технологій у сучасному виробництві металізованого заліза та їх важливе значення у подальшому розвитку низьковуглецевих технологій чорної металургії.

Одним із найбільш перспективних напрямів подальшого зниження викидів CO₂ у газових процесах прямого відновлення залізної руди є перехід від традиційного відновлювального газу на основі суміші H₂–CO до використання чистого водню. У сучасних промислових технологіях прямого відновлення відновлювальний газ отримують переважно шляхом каталітичного реформінгу природного газу, внаслідок чого утворюється синтез-газ, що містить водень і монооксид вуглецю. У процесі відновлення оксидів заліза монооксид вуглецю окиснюється до CO₂, що є основним джерелом викидів парникових газів у даних технологічних схемах.

Застосування чистого водню як відновника принципово змінює хімічний механізм процесу. У цьому випадку відновлення оксидів заліза відбувається за реакціями типу



де основним продуктом окиснення відновника є водяна пара, а не вуглекислий газ. Таким чином, за умови використання водню, отриманого із застосуванням відновлюваних джерел енергії (так званого “зеленого” водню), процес прямого відновлення потенційно може бути практично безвуглецевим на стадії відновлення рудної сировини.

У науковій літературі останніх років значна увага приділяється дослідженню кінетики та механізмів водневого відновлення оксидів заліза, а також аналізу технологічних особливостей впровадження водню у промислові процеси прямого відновлення. Дослідження показують, що використання водню може забезпечити високу швидкість відновлення та значний ступінь металізації рудних матеріалів, однак при цьому виникає низка технологічних проблем, пов’язаних із необхідністю підтримання оптимального температурного режиму, контролю структури пористості відновленого матеріалу та забезпечення стабільної роботи реактора.

Паралельно у різних країнах реалізується низка пілотних і демонстраційних промислових проєктів, спрямованих на впровадження водневих технологій у виробництво заліза та сталі. У цих проєктах розглядається можливість використання водню як основного відновника у шахтних печах прямого відновлення, що дозволяє істотно знизити або практично повністю усунути викиди CO_2 на стадії відновлення залізної руди. Відповідні дослідження та техніко-економічні оцінки свідчать про значний потенціал водневих технологій у контексті декарбонізації чорної металургії [9].

Альтернативним напрямом зниження вуглецевого сліду металургійного виробництва є використання біомаси як відновника або джерела вуглецю. Біомаса є відновлюваним та широко доступним ресурсом, а завдяки короткому вуглецевому циклу її біогенний вуглець може розглядатися як кліматично нейтральний, за умови раціонального вирощування та сталого використання біоресурсів. Використання біомаси дозволяє суттєво зменшити внесок металургійної промисловості у глобальні процеси зміни клімату [10, 11].

Дослідження можливостей застосування біомаси у металургії ведуться вже кілька десятиліть. Починаючи з 1970-х років активно вивчаються різні варіанти її використання в рамках традиційної технологічної схеми доменна піч – киснево-конвертерний процес, зокрема:

- інжекція біомаси або продуктів її переробки у доменну піч;
- спільне коксування сумішей кам'яного вугілля та біомаси;
- часткова заміна коксу біомасою як шару шихтового матеріалу [12–14].

Однак екологічний ефект впровадження біомаси у межах традиційної технологічної схеми доменна піч – киснево-конвертерний процес залишається відносно обмеженим. Це пояснюється тим, що конструктивні та технологічні особливості доменної плавки передбачають використання значної кількості коксу як основного структуроутворюючого та енергетичного компонента шихти. Кокс виконує одночасно декілька критично важливих функцій: є джерелом тепла в зоні горіння, забезпечує утворення відновлювального газу, а також формує міцний газопроникний каркас шихтового стовпа, необхідний для стабільного руху газів у печі. Через ці функціональні вимоги повна заміна коксу альтернативними вуглецевмісними матеріалами практично неможлива без суттєвої зміни конструкції та режиму роботи доменної печі.

У більшості досліджених технологічних рішень біомаса або продукти її термічної переробки (біовугілля, біококс, біопаливо) можуть використовуватися лише як часткова заміна викопного вуглецю — наприклад, у вигляді добавки до пиловугільного палива, компоненту коксової шихти або домішки до шихтових матеріалів. Як правило, частка такої заміни обмежується десятками відсотків від загальної кількості вуглецевмісного відновника, оскільки надмірне введення біомаси може призводити до погіршення механічної міцності шихти, зниження стабільності процесу горіння та порушення газодинамічних умов у доменній печі.

Унаслідок цього навіть за активного використання біогенних матеріалів значна частина відновлювального вуглецю у доменному процесі залишається викопного походження, що суттєво обмежує можливості зниження питомих

викидів вуглекислого газу. Тому впровадження біомаси у рамках доменної технології, хоча й дозволяє певною мірою зменшити вуглецевий слід виробництва чавуну, не забезпечує принципового переходу до низьковуглецевого металургійного виробництва. Саме ця обставина стимулює пошук нових технологічних рішень, у яких біогенний відновник може використовуватися значно ширше, зокрема у процесах прямого відновлення залізної руди.

Поряд із дослідженнями у рамках доменного виробництва значна кількість фундаментальних робіт присвячена вивченню відновлення оксидів заліза сумішами з біомасою у лабораторних умовах. Такі дослідження дозволяють оцінити кінетику відновних реакцій, механізми взаємодії та вплив різних видів біогенного відновника на перебіг процесу металізації.

Так, Strezov [15] досліджував процес відновлення залізної руди з використанням тирси як джерела біомаси в інертній атмосфері. Було встановлено, що зі збільшенням частки тирси у суміші ступінь відновлення руди істотно зростає. При вмісті біомаси близько 30 мас. % у продуктах реакції переважно утворюється металеве залізо.

Nata та співавтори [16] проводили дослідження відновлення дегідратованих залізорудних матеріалів у суміші з біогенними смолами. Зразки нагрівали до 900 °C в атмосфері азоту, внаслідок чого відбувалося повне відновлення оксидів заліза осаждением вуглецем у результаті прямого відновлення.

У роботі Zuo та ін. [17] було проаналізовано механізм відновлення гематиту різними твердими відновниками, зокрема біовугіллям, кам'яним вугіллям та доменним коксом, у середовищі аргону. Результати показали, що температура початку реакції відновлення гематиту біовугіллям була щонайменше на 100 K нижчою, ніж при використанні кам'яного вугілля. Крім того, максимальна швидкість реакції для біовугілля виявилася у 1,57 раза вищою, а кінцевий ступінь відновлення перевищував аналогічний показник для кам'яного вугілля приблизно на 13 %.

Bagatini та ін. [18] досліджували процес відновлення окислених окатишів із застосуванням чотирьох різних вуглецевмісних відновників: деревного вугілля, напівкоксу кам'яного вугілля, доменного коксу та нафтового коксу. За результатами експериментів деревне вугілля продемонструвало найкращі відновні властивості серед досліджених матеріалів. Крім того, було встановлено, що швидкість процесу самовідновлення щонайменше до 60 % ступеня перетворення визначається перебігом реакції Бодуара ($C + CO_2 = 2CO$), що було підтверджено аналізом значень уявної енергії активації при різних ступенях конверсії.

Guo та співавтори [19, 20] досліджували процес прямого відновлення композитних окатишів системи “залізна руда – біомаса” в умовах лабораторних експериментів. Відновлення проводилося у газових середовищах, що моделювали реальні умови процесів прямого відновлення, зокрема у водневій атмосфері та в синтез-газі, отриманому з біомаси. Основною метою цих досліджень було встановлення впливу біогенного компонента на структуру окатишів, кінетику відновлення та ефективність процесу металізації оксидів заліза.

Результати проведених експериментів показали, що введення біомаси до складу композитних окатишів істотно змінює мікроструктурні характеристики матеріалу. Зокрема, у процесі нагрівання та термічного розкладу біомаси відбувається виділення летких компонентів і утворення додаткових пор, що призводить до зростання загальної пористості окатишів та збільшення їх питомої поверхні. Формування розвиненої порової структури сприяє інтенсифікації масообмінних процесів між газовою та твердою фазами, полегшуючи проникнення відновлювального газу до внутрішніх зон рудного матеріалу.

Унаслідок цього покращуються кінетичні характеристики процесу відновлення оксидів заліза. Зокрема, спостерігається підвищення швидкості перебігу відновних реакцій, а також зростання ступеня використання відновлювального потенціалу газової фази. Таким чином, використання біомаси у складі композитних окатишів сприяє підвищенню відновлюваності залізорудних

матеріалів, що в кінцевому підсумку забезпечує інтенсифікацію процесу металізації та підвищення ефективності прямого відновлення заліза.

Особливої уваги заслуговує нова концепція організації процесу одержання губчастого заліза, яка поєднує пряме відновлення залізної руди оксидом вуглецю з газифікацією біомаси в межах єдиного реактора шахтної печі [21]. У запропонованій схемі відновлювальний газ формується безпосередньо в реакційному просторі агрегату: монооксид вуглецю (CO) утворюється внаслідок газифікації біомаси за реакцією Бодуара ($C + CO_2 = 2CO$). Відпрацьований газ, що являє собою суміш CO–CO₂, після відповідної підготовки повертається у процес і використовується як рециркуляційний газ, який подається в нижню частину шахтної печі (рис. 1.1).

Запропонований підхід створює передумови для ефективного залучення різноманітних видів біомаси як відновника у процесах прямого відновлення заліза. Важливою перевагою цієї концепції є те, що вона дозволяє відмовитися від використання викопного природного газу або водню, які традиційно застосовуються у сучасних газових процесах прямого відновлення. Крім того, у такій технологічній схемі відсутня потреба у використанні реформера для отримання синтез-газу, як це реалізовано, наприклад, у процесі MIDREX. Також відпадає необхідність у спеціальній підготовці змішаних композитних окатишів, що містять руду та відновник, а також у будівництві окремого реактора газифікації біомаси. Усі основні стадії — генерація відновлювального газу, відновлення оксидів заліза та газифікація вуглецевмісного матеріалу — відбуваються безпосередньо в одному технологічному агрегаті.

На правій частині рисунку 1.1 представлено власне шахтну піч, конструкція якої загалом подібна до типових шахтних агрегатів, що застосовуються у процесах прямого відновлення залізної руди. Реактор має циліндричну верхню частину та конічну нижню зону, що забезпечує стабільний рух матеріалів і газового потоку. Водночас на відміну від традиційних установок прямого відновлення, у

запропонованій схемі у верхню частину печі подається подвійна тверда шихта, що складається з окатишів залізної руди та кускового деревного вугілля.

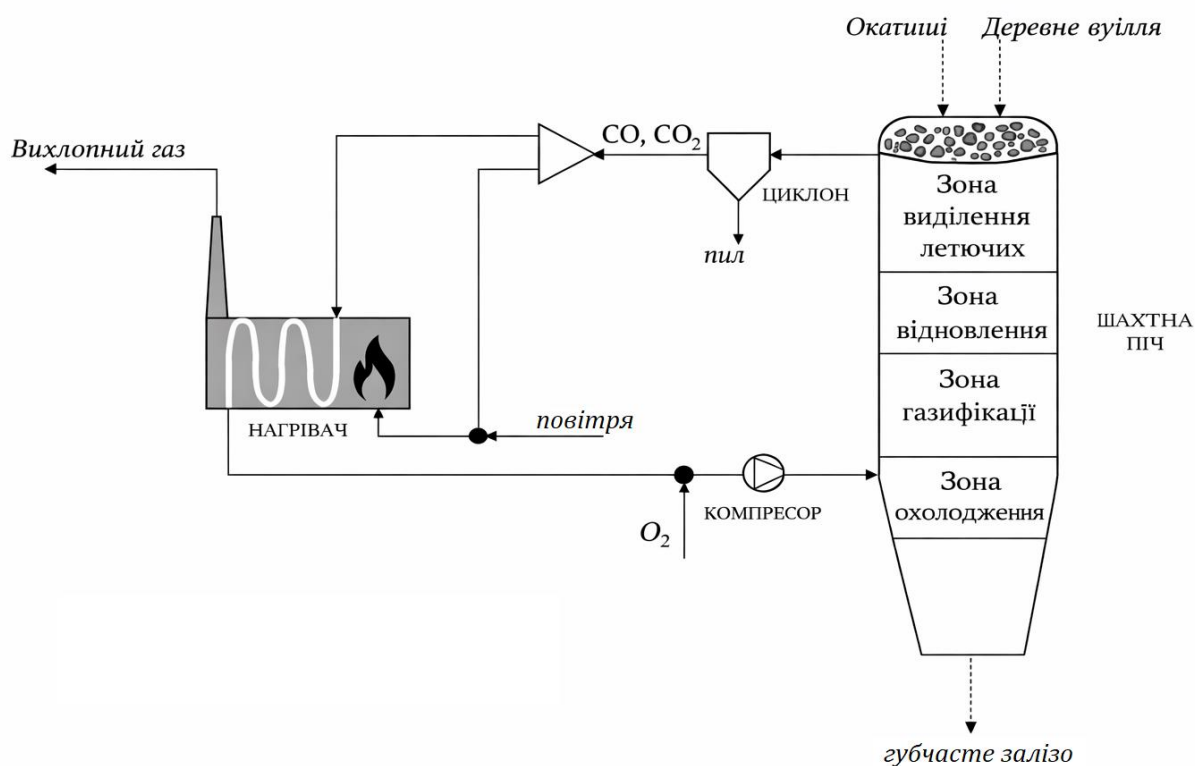


Рисунок 1.1 – Схема прямого відновлення залізної руди з використанням біомаси

Теоретично як відновник можуть застосовуватися різні види біомаси, включаючи необроблену деревину або інші рослинні матеріали. Проте для спрощення моделювання та аналізу процесу в межах даного дослідження було прийнято припущення щодо використання деревного вугілля як основного біогенного відновника.

Рух матеріальних потоків у печі відповідає типовій схемі роботи шахтних агрегатів прямого відновлення. Тверда шихта опускається вниз під дією сили тяжіння, тоді як газовий потік рухається назустріч — у висхідному напрямку, забезпечуючи інтенсивний тепло- та масообмін між фазами. У таких умовах

відбувається послідовна реалізація кількох взаємопов'язаних процесів: нагрівання матеріалу, виділення летких компонентів біомаси, газифікація вуглецю та відновлення оксидів заліза до металевого стану.

Ліва частина рисунку 1.1 ілюструє газову рециркуляційну систему, що забезпечує замкнений цикл використання технологічного газу. Газ, який виходить із верхньої частини печі, піддається попередній підготовці перед повторним використанням. Ця підготовка включає очищення від пилу та повторне нагрівання до необхідної температури.

Частина вихідного газу з верхньої частини печі — а саме надлишковий об'ємний потік, що перевищує витрату газу, який подається через фурмовий пояс у нижній частині шахти — спрямовується на спалювання. Теплота, що виділяється під час цього процесу, використовується для нагрівання основної частини рециркуляційного газу, температура якого підвищується приблизно від 400 до 1100 °С перед повторним введенням у піч.

У разі необхідності для подальшого підвищення температури газу, що подається в нижню частину печі, у систему може додатково вводитися невелика кількість кисню. Це дозволяє гнучко регулювати тепловий режим агрегату та забезпечувати необхідні умови для інтенсивного перебігу відновних реакцій.

Проведений аналіз науково-технічної літератури дозволяє сформулювати низку узагальнюючих положень щодо сучасного стану та перспектив розвитку технологій відновлення заліза.

1. Металургійна промисловість є одним із найбільших джерел антропогенних викидів парникових газів, причому основна їх частка формується у процесі виробництва сталі за традиційною схемою доменна піч – киснево-конвертерний процес. Високий рівень викидів CO₂ обумовлений значним використанням викопного вуглецю як джерела тепла та відновника.

2. У зв'язку з глобальними тенденціями декарбонізації металургійного виробництва інтенсивно розвиваються альтернативні технології бездоменного виробництва заліза. Одним із найбільш перспективних напрямів є процеси прямого

відновлення залізної руди, які характеризуються нижчим рівнем енергоспоживання та викидів CO₂ порівняно з доменним виробництвом.

3. Газові технології прямого відновлення, зокрема шахтні процеси, що реалізовані у промислових установках, забезпечують значну частку світового виробництва губчастого заліза. Отриманий продукт — металізоване залізо (DRI) — є важливою сировиною для електросталеплавильного виробництва, оскільки дозволяє частково компенсувати дефіцит високоякісного металобрухту.

4. Одним із перспективних шляхів подальшого зниження вуглецевого сліду у виробництві заліза є використання альтернативних відновників, зокрема водню або біомаси. Біомаса завдяки короткому вуглецевому циклу розглядається як кліматично нейтральне джерело вуглецю та може використовуватися як відновник або сировина для отримання відновлювального газу.

5. Результати експериментальних досліджень, представлених у науковій літературі, свідчать про високу реакційну здатність біовуглецю та інших продуктів термічної переробки біомаси у процесах відновлення оксидів заліза. Встановлено, що використання біомаси може знижувати температуру початку відновлення, підвищувати швидкість реакцій та сприяти збільшенню ступеня металізації рудних матеріалів.

6. Перспективним напрямом розвитку технологій прямого відновлення є поєднання процесів газифікації біомаси та відновлення залізної руди в одному реакторі шахтного типу з рециркуляцією газової фази. Такий підхід дозволяє відмовитися від використання викопного природного газу, окремих агрегатів для газифікації та додаткової підготовки композитної шихти.

Таким чином, аналіз літературних джерел підтверджує актуальність дослідження процесів металізації залізорудних матеріалів із використанням біогенного відновника у шахтних печах та обґрунтовує доцільність подальших досліджень у цьому напрямі.

Метою роботи є дослідження процесу металізації залізорудних матеріалів із використанням біогенного відновника в умовах шахтної печі та оцінка можливості

ефективного поєднання процесів газифікації біомаси і відновлення оксидів заліза в одному реакторі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розглянути фізико-хімічні особливості процесів газифікації біомаси та відновлення оксидів заліза у шахтних печах.
2. Дослідити умови перебігу реакцій відновлення залізорудних окатишів оксидом вуглецю, що утворюється під час газифікації біомаси.
3. Проаналізувати вплив температурного режиму та складу газової фази на ступінь металізації залізорудних матеріалів.
4. Оцінити технологічні та екологічні переваги використання біогенного відновника у процесах прямого відновлення заліза.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Передумови створення математичної моделі

Математична модель досліджуваного процесу розроблена на основі раніше створеної моделі REDUCTOR. Ця модель призначена для імітаційного моделювання роботи стандартної шахтної печі прямого відновлення залізорудної сировини, що працює на газоподібному відновнику. Модель описує основні фізико-хімічні процеси, які відбуваються в агрегаті, зокрема рух газової та твердої фаз, теплообмін між ними, а також перебіг хімічних реакцій відновлення оксидів заліза [22, 23]. Принципова схема моделі наведена на рисунку 2.1.

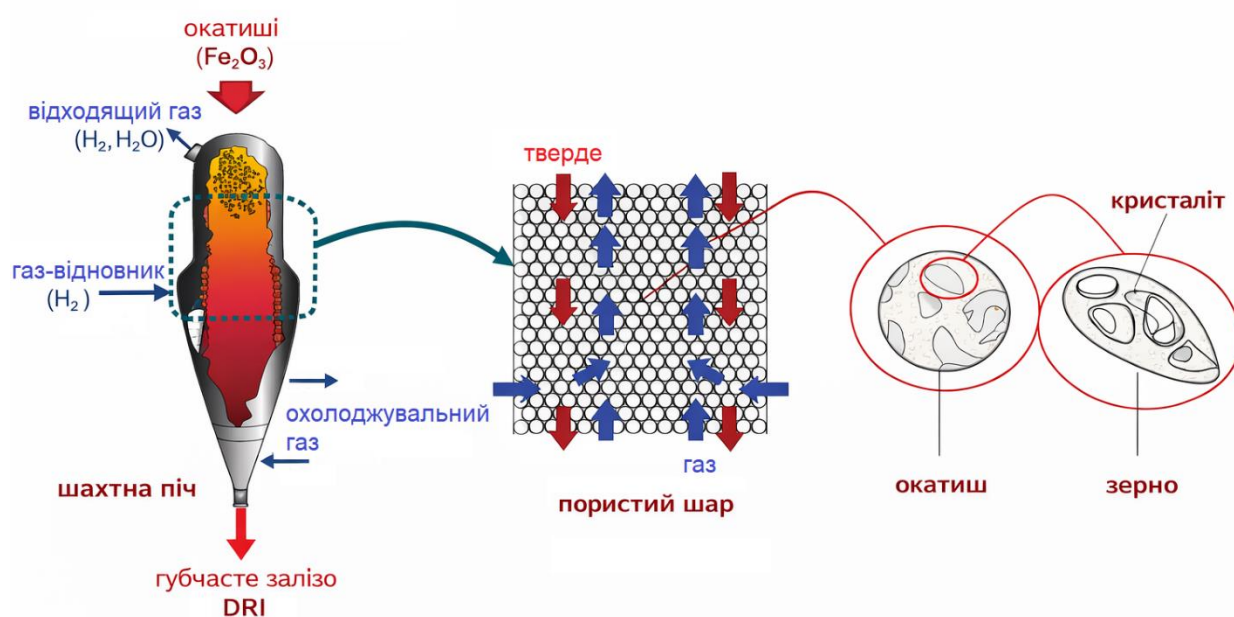


Рисунок 2.1 – Схема, що ілюструє принцип роботи стандартної моделі
REDUCTOR

Для моделювання процесу BIORED до базової моделі було внесено низку

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.02.ММ			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Математичне моделювання процесів прямого відновлення залізорудних матеріалів	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Сушко						1	6
Перевірів	Савельєв					МТ-22-2		
Н. контр.	Савельєв							
Затверди	Савельєв							

модифікацій. Насамперед у розрахунках враховано наявність двох типів твердих матеріалів — залізорудних окатишів та частинок деревного вугілля, тоді як у вихідній версії моделі розглядалися лише окатиші. Це дозволяє більш адекватно описати взаємодію залізорудної сировини з твердим вуглецевмісним матеріалом у реакційному просторі шахтної печі.

Крім того, до моделі було додано хімічні реакції, пов'язані з перетворенням біомаси, зокрема виділення летких речовин та газифікацію вуглецю. У результаті цих процесів утворюються газоподібні продукти, такі як CO, CO₂, H₂ та H₂O, які беруть участь у формуванні відновлювального газового середовища. Для спрощення математичного опису геометрії агрегату шахтну піч у моделі прийнято повністю циліндричною, без урахування конічних ділянок, характерних для промислових установок.

Поведінка залізорудних окатишів у процесі відновлення описується за допомогою кінетичної моделі одиничного окатиша, розробленої Ranzani Da Costa та співавторами [22]. Ця модель враховує послідовні стадії відновлення оксидів заліза та особливості масопереносу і хімічної кінетики у структурі окатиша під час перебігу реакцій.

Еволюція частинок деревного вугілля під час нагрівання та подальших хімічних перетворень представлена на рисунку 2.2. При підвищенні температури частинки деревного вугілля спочатку зазнають виділення летких речовин, у результаті чого утворюються гази, зокрема CO, CO₂, H₂ та H₂O. Після завершення цієї стадії відбувається газифікація твердого вуглецю, яка супроводжується взаємодією вуглецю з діоксидом вуглецю та утворенням монооксиду вуглецю у газовій фазі. Отриманий CO надходить у газовий потік і бере участь у відновленні оксидів заліза в реакційному просторі печі.

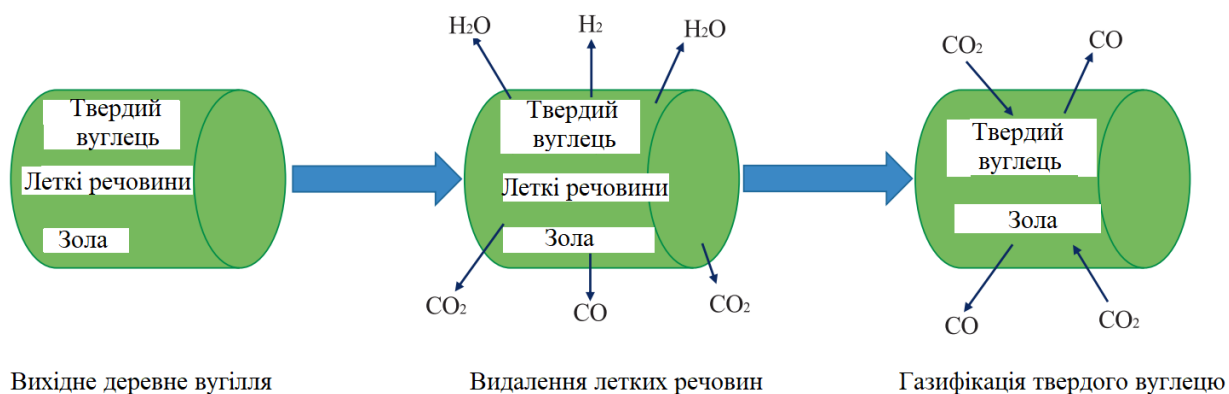


Рисунок 2.2 – Схема еволюції зерна деревного вугілля

Таким чином, запропонована модифікована математична модель дозволяє описати взаємопов'язані процеси руху газової та твердої фаз, тепло- і масопереносу, а також хімічні реакції відновлення залізорудних матеріалів і газифікації біогенного вуглецю в умовах шахтної печі.

2.2 Основні припущення моделі

Основні припущення, прийняті під час розроблення моделі, були також використані при моделюванні роботи шахтної печі з використанням біомаси як відновника. Розроблена модель є стаціонарною та двовимірною, що дозволяє враховувати зміну параметрів як за висотою, так і за радіусом реакційного простору агрегату. Тверда фаза переміщується вниз у режимі поршневого руху, тоді як газова фаза проходить крізь пористий шар шихтових матеріалів.

Початкові залізорудні окатиші мають діаметр 1,5 см та складаються із щільних зерен Fe_2O_3 діаметром приблизно 19 мкм із густиною 5275 кг/м³. Між окремими зернами утворюється внутрішня пористість окатиша, яка становить 0,33, із середнім розміром пор близько 6 мкм. Пористість шару шихти в печі вважається сталою і рівною 0,5 протягом усього процесу. Теплові ефекти хімічних реакцій повністю сприймаються твердою фазою, причому температурні градієнти всередині окатишів не враховуються. Реакції 1–6 приймаються реакціями першого

порядку відносно газоподібних реагентів. Вюстит у моделі розглядається як сполука $\text{Fe}_{0,95}\text{O}$ (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Основні реакції, що враховуються в моделі

№	Реакції
1	$3\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{ТВ})} + \text{CO}_{(\text{Г})} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{ТВ})} + \text{CO}_{2(\text{Г})}$
2	$\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{ТВ})} + 16/19 \text{CO}_{(\text{Г})} \rightarrow 60/19\text{Fe}_{0,95}\text{O}_{(\text{ТВ})} + 16/19\text{CO}_{2(\text{Г})}$
3	$\text{Fe}_{0,95}\text{O}_{(\text{ТВ})} + \text{CO}_{(\text{Г})} \rightarrow 0,95\text{Fe}_{(\text{ТВ})} + \text{CO}_{2(\text{Г})}$
4	$3\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{ТВ})} + \text{H}_{2(\text{Г})} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{ТВ})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{Г})}$
5	$\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{ТВ})} + 16/19\text{H}_{2(\text{Г})} \rightarrow 60/19\text{Fe}_{0,95}\text{O}_{(\text{ТВ})} + 16/19\text{H}_2\text{O}_{(\text{Г})}$
6	$\text{Fe}_{0,95}\text{O}_{(\text{ТВ})} + \text{H}_{2(\text{Г})} \rightarrow 0,95\text{Fe}_{(\text{ТВ})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{Г})}$
7	$\text{CO}_{2(\text{Г})} + \text{C}_{(\text{ТВ,окат.})} \leftrightarrow 2\text{CO}_{(\text{Г})}$
7'	$\text{CO}_{2(\text{Г})} + \text{C}_{(\text{ТВ,дер.вуг.})} \leftrightarrow 2\text{CO}_{(\text{Г})}$
8	$\text{C}_{0,21}\text{O}_{0,51}\text{H}_{1,74} \rightarrow 0,56\text{H}_{2(\text{Г})} + 0,23\text{H}_2\text{O}_{(\text{Г})} + 0,06\text{CO}_{(\text{Г})} + 0,11\text{CO}_{2(\text{Г})} + 0,04\text{CH}_{4(\text{Г})}$

У першому наближенні моделювання процесу BIORED було прийнято додаткові спрощувальні припущення. Зокрема, у розрахунках враховується лише циліндрична частина шахтної печі, без урахування інших конструктивних зон агрегату. Також прийнято, що між частинками деревного вугілля та залізородними окатишами відсутні прямі фізичні та хімічні взаємодії.

Початкові частинки деревного вугілля прийнято циліндричної форми з діаметром 10 мм і довжиною 15 мм та густиною 750 кг/м^3 . Результати технічного аналізу деревного вугілля мають такий склад: твердий вуглець — 74,5 %, леткі речовини — 25 %, зола — 0,5 %.

Об'ємні частки окатишів і деревного вугілля у шарі шихти вважаються постійними, як і швидкості їх переміщення. Це є прямим наслідком припущення про незмінність пористості шару по всій висоті печі. Крім того, вважається, що частинки деревного вугілля не руйнуються та не утворюють дріб'язку внаслідок стирання або механічних впливів.

Останнє припущення є певним спрощенням, прийнятим на початковому етапі моделювання. Проте подібні умови (за поверхневою швидкістю газу, тиском та характеристиками частинок) є близькими до умов, що реалізуються у верхній частині доменних печей, які працюють на деревному вугіллі, де подібні режими експлуатації застосовуються у промисловій практиці.

2.3 Хімічні реакції та балансові рівняння моделі

У математичній моделі шахтної печі враховано комплекс хімічних реакцій, що описують відновлення оксидів заліза в окатишах, а також термічне розкладання і газифікацію зерен деревного вугілля. Основні реакції, прийняті в моделі, наведено в таблиці 2.1. Вони охоплюють як процеси відновлення оксидів заліза газовими відновниками, так і реакції, пов'язані з перетвореннями вуглецевої складової біомаси.

Відновлення оксидів заліза розглядається як послідовний багатостадійний процес, що включає перетворення гематиту (Fe_2O_3) у магнетит (Fe_3O_4), далі у вюстит ($\text{Fe}_{0,95}\text{O}$) і, зрештою, у металеве залізо (Fe). У моделі враховано дві групи відновних реакцій: відновлення монооксидом вуглецю (CO) — реакції 1–3, а також відновлення воднем (H_2) — реакції 4–6. Проте результати моделювання показують, що реакції за участю водню відіграють другорядну роль і мають помітний вплив лише у верхній частині реактора, де водень утворюється внаслідок виділення летких речовин із деревного вугілля під час його термічного розкладання (реакція 8).

Важливою складовою моделі є також опис процесів газифікації вуглецю, зокрема реакції Бодуара (7 і 7'). Ці реакції по-різному впливають на тверді компоненти шару. За відносно низьких температур у верхній частині шахтної печі можливе осадження вуглецю на поверхні окатишів, що пов'язано з перебігом зворотної реакції Бодуара. Натомість у нижній зоні печі, де температура значно вища, домінує пряма реакція газифікації вуглецю деревного вугілля діоксидом

вуглецю, у результаті якої утворюється монооксид вуглецю. Саме цей газ є одним із основних відновників оксидів заліза у шарі шихти. Кінетичні параметри та швидкості перебігу зазначених реакцій прийнято відповідно до даних, наведених у роботі [24].

Для кількісного опису процесів, що відбуваються у реакційному просторі шахтної печі, у моделі використано систему балансових рівнянь збереження маси, енергії та імпульсу. Ці рівняння враховують перенесення газових компонентів у пористому шарі, тепловий обмін між газовою та твердою фазами, а також вплив хімічних реакцій на зміну складу та температури середовища. Чисельне розв'язання системи рівнянь здійснюється за допомогою методу скінченних об'ємів, який забезпечує дискретизацію розрахункової області на окремі контрольні об'єми та дозволяє визначати локальні значення параметрів потоку і температури.

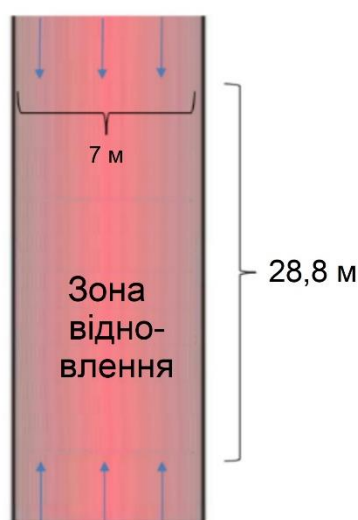
У результаті розв'язання цих рівнянь визначаються просторові розподіли температури, концентрацій газових компонентів, швидкостей газового потоку та ступеня відновлення окатишів уздовж висоти та радіуса реактора.

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє комплексно описати основні фізико-хімічні процеси, що відбуваються у шахтній печі під час прямого відновлення залізорудних окатишів із використанням деревного вугілля. Модель враховує рух газової та твердої фаз у пористому шарі, тепло- і масообмін між ними, а також перебіг реакцій відновлення оксидів заліза, виділення летких речовин і газифікації вуглецю. Використання рівнянь збереження маси, енергії та імпульсу в поєднанні з кінетичними залежностями реакцій забезпечує можливість визначення розподілів температури, складу газової фази та ступеня металізації окатишів у реакційному просторі печі. Це створює основу для подальшого аналізу впливу технологічних параметрів на ефективність процесу BIORED.

3 РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ У ШАХТНІЙ ПЕЧІ

Метою проведеного моделювання було дослідження роботи шахтної печі процесу BIORED з позицій можливого промислового застосування. У зв'язку з цим робочі параметри процесу та геометричні розміри реактора було обрано такими, що відповідають промисловим установкам прямого відновлення заліза. Зокрема, прийнята у розрахунках витрата твердої фази відповідає приблизно 1 млн т залізорудних окатишів на рік, що забезпечує виробництво близько 0,72 млн т металізованого заліза на рік. Основні характеристики реактора наведені на рисунку 3.1.

Залізорудні окатиші - 80 %(мас.)
Деревне вугілля - 20 %(мас.)
T = 20 °C; 40,1 кг/с



CO - 65 %(об.), CO₂ - 35 %(об.)
T = 1100 °C; 2500 моль/с

Рисунок 3.1 – Основні входні дані роботи реактора

Інші входні параметри моделі було визначено на основі попередніх розрахунків методом послідовних наближень. Було встановлено, що для стабільного перебігу процесу на вході газу необхідні висока температура, значна

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.03.РП			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Результати математичного моделювання процесу прямого відновлення у шахтній печі	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Сушко						1	17
Перевірив	Савельєв					МТ-22-2		
Н. контр.	Савельєв							
Затверди	Савельєв							

витрата газового потоку та підвищений вміст CO порівняно з CO₂. У моделюванні розглядалася подача зверху суміші залізорудних окатишів і зерен деревного вугілля за кімнатної температури, тоді як знизу в реактор вводилася газова суміш CO–CO₂ з температурою 1100 °C.

Хоча математична модель є двовимірною, рівномірний розподіл газового потоку на вході знизу призводить до практично одновимірного характеру перебігу процесу, тобто значення основних параметрів залишаються майже однаковими по радіусу реактора. У зв'язку з цим результати подальшого аналізу представлені у вигляді зміни параметрів уздовж висоти реактора. У наступних підрозділах розглянуто осьову еволюцію температури, складу газової фази, а також перебіг процесів виділення летких речовин і газифікації деревного вугілля та відновлення залізорудних окатишів.

3.1 Температурний режим і склад газової фази у шахтній печі

На рисунку 3.2 наведено профілі температури газової та твердої фаз у реакторі. Як видно з результатів моделювання, температури газу і твердої фази практично збігаються, що пояснюється ефективним теплообміном між ними. Коефіцієнт теплообміну між газом і твердою фазою перевищує 250 Вт/(м²·К), тоді як відношення теплоємності твердої фази до газової становить менше 0,4. Завдяки цьому температурна рівновага між фазами встановлюється досить швидко.

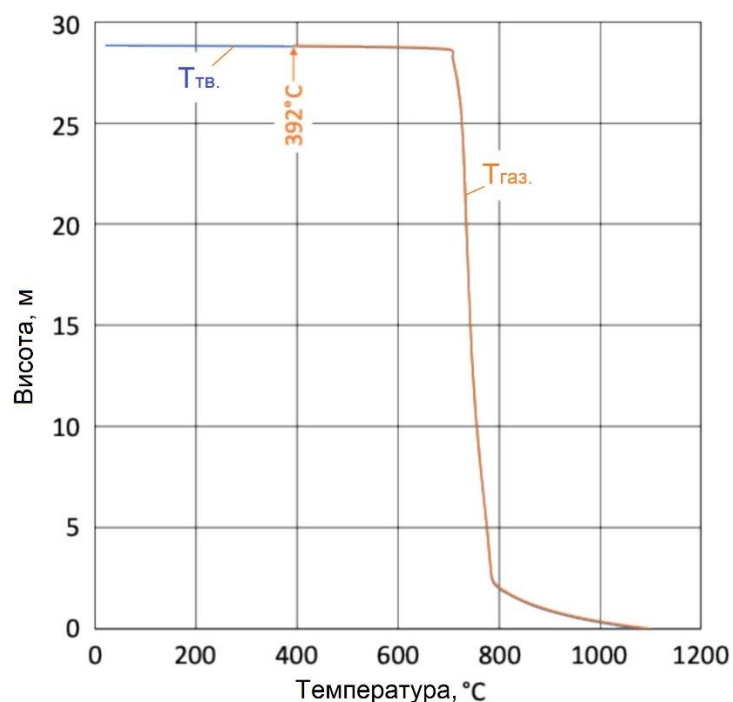


Рисунок 3.2 – Зміна температури по висоті печі

Помітна різниця між температурами газу і твердої фази спостерігається лише у верхній частині реактора, де тверда шихта надходить при кімнатній температурі і швидко нагрівається під дією гарячого газового потоку. Температура відхідного газу на виході з реактора становить приблизно 392 °C.

У більшій частині реакційного простору температура підтримується в межах 700–800 °C. Такий температурний інтервал є достатнім для перебігу реакцій відновлення гематиту до вюститу, але водночас не надто високим для завершальної стадії відновлення вюститу до металевого заліза, оскільки ця реакція за високих температур стає термодинамічно менш сприятливою.

Процеси газифікації вуглецю відбуваються переважно у нижній частині реактора, де температура газу на вході є максимальною. Унаслідок того, що реакція газифікації є ендотермічною ($\Delta H = 172$ кДж/моль при 293 К), температура газового потоку швидко знижується приблизно до 800 °C вже на відстані близько 3 м від нижньої частини реактора, незважаючи на те, що початкова температура газу становить 1100 °C.

У подальшому вздовж висоти печі формується практично сталий температурний рівень, що нагадує так звану зону теплового резерву, характерну

для верхньої частини доменної печі. У цій зоні рівновага між процесами газифікації вуглецю та відновлення оксидів заліза забезпечує відносно стабільний температурний режим.

Склад газової фази в реакторі наведено на рисунку 3.3. Компоненти H_2 та H_2O спочатку відсутні у відновлювальному газі і утворюються внаслідок виділення летких речовин із деревного вугілля незабаром після надходження твердої шихти у верхню частину реактора, де холодні частинки деревного вугілля нагріваються гарячим газом. Вміст летких речовин у деревному вугіллі становить приблизно 25 мас.%, а гази піролізу містять близько 56 об.% H_2 і 23 об.% H_2O .

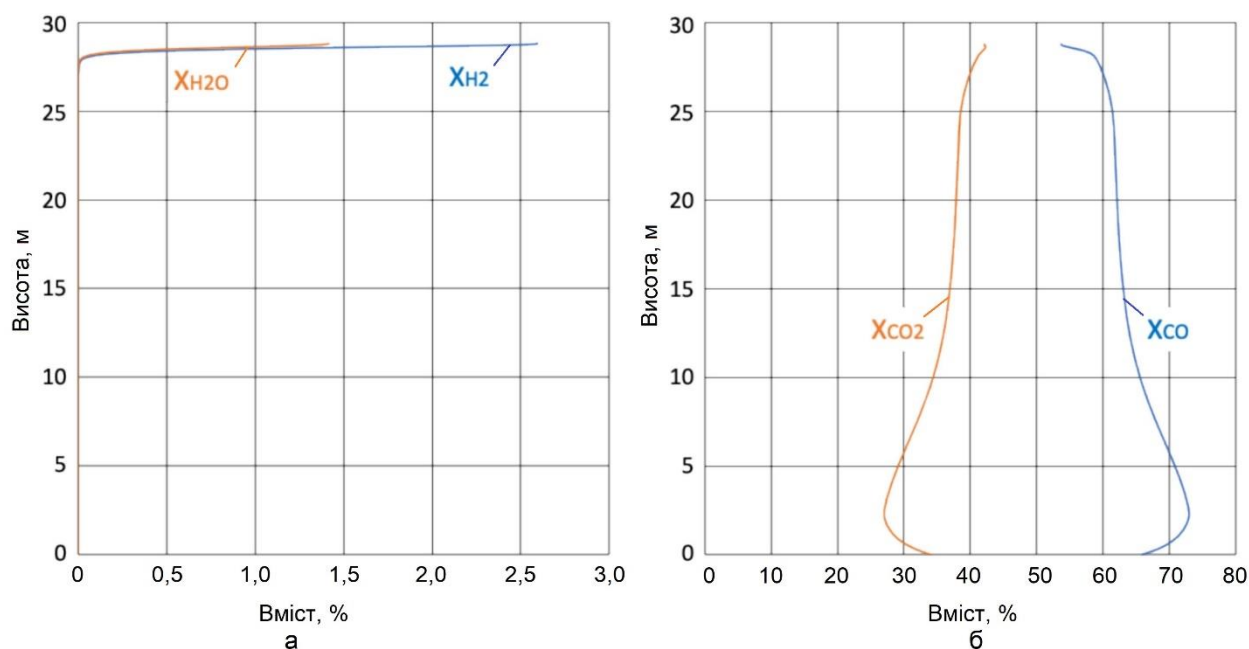


Рисунок 3.3 – Склад газової фази по висоті печі:

а – H_2 та H_2O ; б – CO та CO_2

Реакція виділення летких речовин відбувається досить швидко, що призводить до інтенсивного виділення H_2 та H_2O у верхній частині реактора. Максимальна концентрація водню в газовій фазі досягає приблизно 2,6 %. Водночас частина водню окиснюється до водяної пари під час реакцій відновлення гематиту до магнетиту, тому концентрації H_2 і H_2O визначаються сумарним впливом як процесів виділення летких речовин, так і реакцій відновлення.

Утворення CO та CO₂ під час виділення летких речовин є відносно незначним порівняно з кількостями цих газів, що формуються внаслідок газифікації вуглецю. Газова суміш CO–CO₂, яка становить понад 95 % газової фази у реакторі, визначається насамперед перебігом реакцій відновлення окатишів та оборотної реакції Бодуара.

Відновлювальний газ вводиться у нижню частину реактора, де внаслідок газифікації вуглецю деревного вугілля спочатку спостерігається накопичення монооксиду вуглецю. Це пов'язано з тим, що на початковому етапі швидкість газифікації перевищує швидкість реакцій відновлення. Однак у подальшому це накопичення припиняється, оскільки зі зниженням температури швидкість газифікації зменшується, і споживання CO під час відновлення вюститу перевищує його утворення.

У результаті після досягнення максимального значення концентрація CO поступово зменшується, що відповідає послідовному перебігу стадій відновлення оксидів заліза. У верхній частині реактора спостерігається різке зниження концентрації CO, що відповідає початковій стадії відновлення гематиту до магнетиту.

На виході з реактора відхідний газ все ще містить значні кількості CO та CO₂, що свідчить про можливість рециркуляції цього газу, навіть якщо склад «верхнього» газу дещо відрізняється від складу газу, що подається через фурмову зону (відмінності у частках CO і CO₂, а також наявність невеликих кількостей H₂ і H₂O у верхньому газі). У разі необхідності може бути застосований вузол коригування складу газу, наприклад установка для видалення CO₂ та H₂O.

3.2 Процес газифікації деревного вугілля

У виконаних розрахунках деревне вугілля розглядалося у вигляді кускового матеріалу, що містить приблизно 25 % летких речовин та 75 % твердого вуглецю. Під час проходження твердої шихти через реакційний простір шахтної печі

температура частинок швидко зростає і вже приблизно через 1 м від верхньої частини реактора досягає близько 700 °С. За таких умов відбувається інтенсивне виділення летких компонентів, що супроводжує початковий етап нагрівання деревного вугілля. Як показано на рисунку 3.4, після завершення процесу видалення летких речовин ступінь перетворення деревного вугілля становить близько 25 %, що відповідає частці летких речовин у його складі.

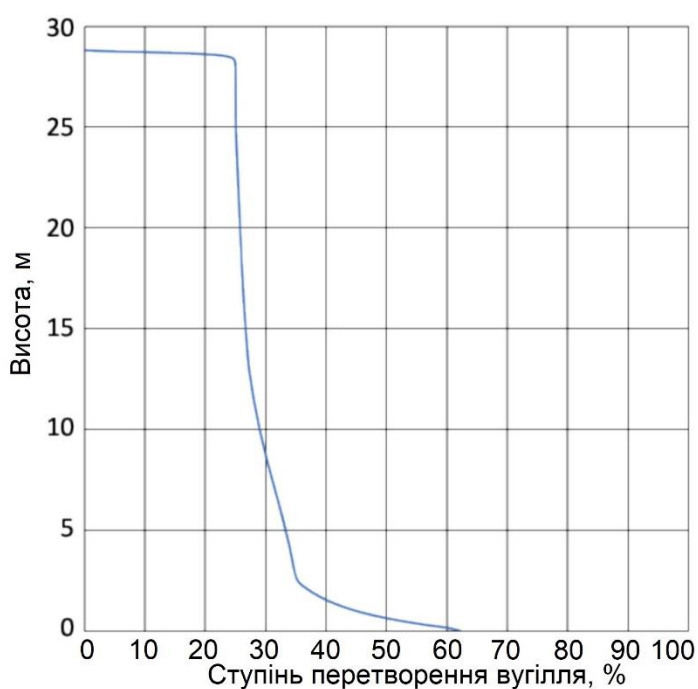


Рисунок 3.4 – Перетворення деревного вугілля по висоті шахтної печі

За даними [25], під час нагрівання суміші вугілля та залізної руди процеси виділення летких компонентів та відновлення оксидів заліза можуть відбуватися одночасно. У розглянутій моделі передбачається використання попередньо піролізованого деревного вугілля, тому утворення біоолії не очікується. Основними газоподібними продуктами виділення летких є CO_2 , CO , H_2 , H_2O та CH_4 [26]. Концентрація метану у газовій фазі є дуже низькою і практично не впливає на перебіг процесу у реакторі. Водночас водень відіграє певну роль у відновленні залізорудних окатишів, оскільки його утворення не можна вважати незначним, а кінетика відновлення оксидів заліза воднем зазвичай швидша, ніж при відновленні монооксидом вуглецю.

Невеликі кількості CO та CO₂, що утворюються під час виділення летких, практично повністю змішуються з основною газовою атмосферою CO–CO₂, яка формується у реакторі. Через протитечійний рух газової та твердої фаз процес виділення летких компонентів обмежується переважно верхнім метром реактора, після чого газовий потік рухається далі вниз і поступово залишає реактор у складі відхідних газів.

Основним джерелом відновлювального газу CO у печі є газифікація твердого вуглецю деревного вугілля. Результати моделювання показують, що реакція Бодуара починає інтенсивно протікати приблизно при температурі 700 °C, що відповідає середній частині реактора. У міру зростання температури швидкість газифікації поступово збільшується, а у нижній частині печі вона значно зростає через більш високі температури твердої фази.

На відміну від процесу видалення летких компонентів, який відбувається дуже швидко, процес газифікації протікає значно повільніше і поширюється вздовж значної частини реакційного простору — понад 10 м висоти реактора. Навіть у нижній частині печі перетворення деревного вугілля не є повним. Розрахунки показують, що приблизно 98 % утвореного CO формується саме внаслідок газифікації твердого вуглецю, тоді як на процес видалення летких припадає лише близько 2 % загального утворення CO.

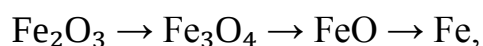
Ступінь перетворення деревного вугілля у нижній частині реактора становить приблизно 0,62, тобто близько 38 % введеного вугілля залишається неперетвореним. Такий залишок доцільно повертати у процес. Одним із можливих способів його відокремлення є магнітна сепарація, що дозволяє розділити металізовані залізні окатиші та залишки деревного вугілля після виходу матеріалу з реактора.

Слід зазначити, що властивості деревного вугілля можуть суттєво відрізнятися залежно від виду біомаси та умов її піролізу. Унаслідок цього різні типи біовуглецю можуть мати різну реакційну здатність у процесах газифікації, що безпосередньо впливає на ефективність утворення відновлювального газу. Для

оцінювання впливу кінетики газифікації на роботу реактора у межах моделювання було проведено порівняння дубового деревного вугілля з іншими типами біовуглецю, дані щодо яких наведені у науковій літературі.

3.3 Кінетика та стадії відновлення залізорудних окатишів

Після надходження у верхню частину шахтної печі залізорудні окатиші інтенсивно нагріваються гарячим газовим потоком. Вже протягом першого метра висоти реактора температура частинок значно зростає, що призводить до майже миттєвого початку процесу відновлення оксидів заліза. Відновлення залізорудних окатишів відбувається послідовно у три основні стадії:



і охоплює практично всю висоту шахтного реактора (рис. 3.5). Подібний поетапний характер відновлення суміші залізної руди та вуглецевого відновника також відзначено у дослідженнях [25].

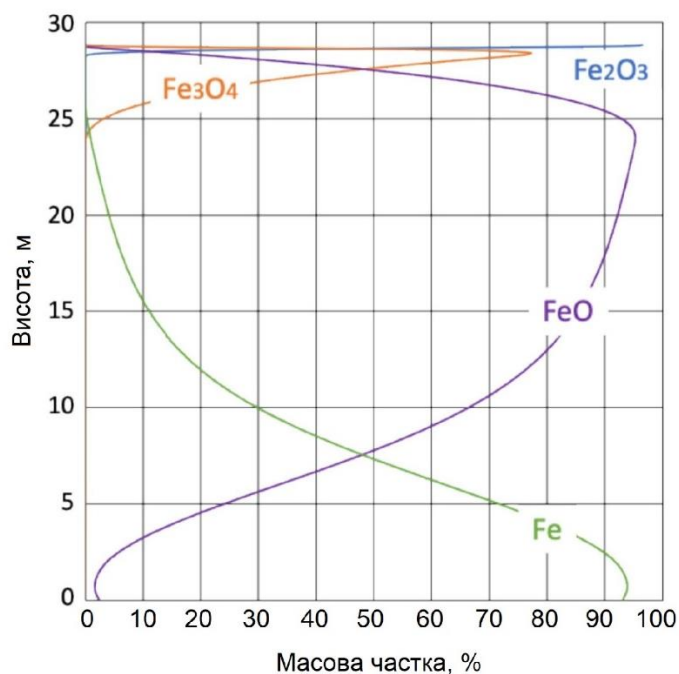


Рисунок 3.5 – Зміна складу окатишів в процесі відновлення

Перша стадія – відновлення гематиту до магнетиту – протікає дуже швидко. У моделюванні встановлено, що ця реакція практично повністю завершується вже в межах першого метра реактора. Така висока швидкість пояснюється тим, що реакція відновлення гематиту монооксидом вуглецю є термодинамічно сприятливою навіть за відносно низьких температур, близько 500 °С. Додатковим фактором прискорення цього процесу є наявність водню, який утворюється під час виділення летких речовин із деревного вугілля. Водень активно бере участь у відновленні гематиту і практично повністю витрачається на стадії переходу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$.

Наступна стадія – відновлення магнетиту до вюститу – протікає повільніше. Вона відбувається переважно за участю монооксиду вуглецю і займає приблизно наступні чотири метри висоти реактора. Менша швидкість цієї стадії пов'язана як із кінетичними особливостями реакції, так і з поступовим зменшенням рушійної сили процесу у міру зміни складу газової фази.

Найбільш тривалою є заключна стадія відновлення – перетворення вюститу на металеве залізо. Цей процес відбувається значно повільніше за попередні стадії і потребує основної частини реакційного простору печі для досягнення достатнього ступеня металізації окатишів. Отримані результати підкреслюють важливість часу перебування твердої фази у реакторі, який необхідно ретельно підбирати шляхом регулювання швидкості руху твердої шихти або геометричних параметрів печі. Недостатній час перебування може призвести до неповного відновлення оксидів заліза.

Разом з тим, у нижній частині реактора, приблизно на останньому метрі перед виходом матеріалу, спостерігається незначне повторне окиснення металевого заліза. Як показано на діаграмі Шодрона (рис. 3.6), протягом більшої частини шляху руху окатишів у реакторі термодинамічні умови сприяють стабільності металевого заліза. Винятком є саме кінцева ділянка реактора, де умови зміщуються у область стабільності вюститу.

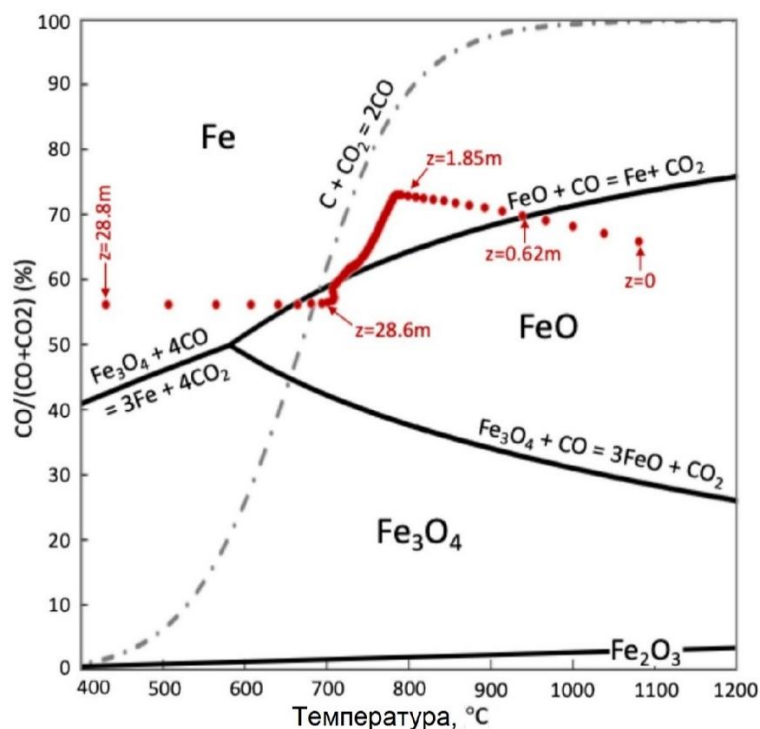


Рисунок 3.6 – Діаграмі Шодрона

У зв'язку з цим важливим технологічним параметром стає співвідношення $\text{CO}/(\text{CO} + \text{CO}_2)$ у газовій фазі. Підтримання достатньо високої частки монооксиду вуглецю дозволяє запобігти небажаному повторному окисненню металізованого продукту у нижній частині шахтної печі та забезпечити стабільне отримання високого ступеня металізації.

3.4 Вплив технологічних параметрів на перебіг процесу (аналіз чутливості моделі)

Початкові результати моделювання показали, що в шахтному реакторі процеси газифікації вуглецю та відновлення оксидів заліза просторово розділені. Газифікація переважно відбувається у нижній частині реактора поблизу входу газу, оскільки для її інтенсивного перебігу потрібні вищі температури. Оскільки реакція газифікації є ендотермічною, її перебіг супроводжується зниженням температури газової фази. У зв'язку з цим найбільш важливими параметрами процесу є

температура та склад газу на вході в реактор. Нижче розглянуто вплив цих параметрів, а також вплив швидкості газифікації деревного вугілля на перебіг процесів у печі. Результати, отримані у попередніх підрозділах, прийнято як базовий варіант (Ref), тоді як результати альтернативних розрахунків позначено як New.

3.4.1 Вплив температури відновлювального газу

На рисунку 3.7 показано вплив підвищення температури газу на вході до реактора з 1100 °C до 1150 °C. Незважаючи на більш високу початкову температуру газового потоку, ендотермічний характер реакції газифікації спричиняє швидке охолодження газу до приблизно 800 °C практично на тій самій висоті реактора, що й у базовому випадку. Температура відхідного газу у верхній частині реактора в обох варіантах практично однакова (394 °C та 392 °C).

Водночас підвищена температура газу у нижній частині печі сприяє інтенсифікації реакції газифікації, що призводить до збільшення утворення монооксиду вуглецю. У результаті загальний вміст CO у газовій фазі стає вищим порівняно з базовим випадком. Це забезпечує більш інтенсивне відновлення оксидів заліза та дозволяє досягти повного відновлення гематиту до металевого заліза (ступінь металізації 100 %) без повторного окиснення. У цьому випадку для завершення процесу достатньо приблизно 15 м висоти реактора (рис. 3.7,в), тоді як у базовому варіанті для цього необхідно близько 28 м (рис. 3.5) і спостерігається незначне повторне окиснення. Таким чином, підвищення температури газу потенційно дозволяє зменшити висоту реактора.

На перший погляд може здатися доцільним використовувати температуру газу на вході понад 1100 °C, проте це пов'язано з ризиком злипання окатишів. За високих температур металізовані окатиші можуть злипатися між собою, утворюючи агломерати, що здатні порушувати або навіть блокувати рух твердої фази у реакторі. Хоча точна гранична температура злипання в літературі визначена недостатньо чітко, у даному дослідженні вона умовно прийнята рівною 1100 °C. Слід зазначити, що температури понад 1000 °C досягаються лише у вузькій зоні приблизно 0,3 м у нижній частині шахти, однак для практичної реалізації процесу необхідні додаткові дослідження для більш точного визначення гранично допустимої температури вхідного газу.

3.4.2 Вплив складу відновлювального газу

Для оцінювання впливу складу відновлювального газу було проведено моделювання зі зменшеним вмістом CO на вході в реактор. У цьому випадку склад газової суміші становив 63 % CO та 37 % CO₂, тоді як у базовому варіанті він дорівнював 65 % CO та 35 % CO₂. Результати розрахунків наведено на рисунку 3.8

Отримані результати показали, що зменшення частки CO практично не вплинуло на температурний режим твердої фази, що свідчить про незначну зміну швидкості газифікації. Однак менший вміст CO зменшує термодинамічну рушійну силу завершальної стадії відновлення, наближаючи реакцію до стану рівноваги.

У результаті перші стадії відновлення, тобто перехід гематиту до вюститу, відбуваються майже так само, як у базовому варіанті. Проте відновлення вюститу до металевого заліза проходить значно повільніше, а процес повторного окиснення посилюється через нижчу концентрацію CO. Як наслідок, ступінь металізації не перевищує приблизно 85 %. Це свідчить про те, що для забезпечення ефективного відновлення оксидів заліза необхідно підтримувати достатньо високий вміст CO у відновлювальному газі.

3.4.3 Вплив реакційної здатності деревного вугілля

Різні види біомаси можуть суттєво відрізнятися за реакційною здатністю у процесах газифікації. Для оцінювання впливу цього фактора у моделюванні було використано кінетичні параметри газифікації, наведені у роботі [27] для деревного вугілля з бука. Відповідно до цих даних, швидкість газифікації такого матеріалу приблизно у десять разів вища, ніж для дубового деревного вугілля, використаного у базовому варіанті.

Результати розрахунків наведено на рисунку 3.9. Вони показують, що підвищення реакційної здатності деревного вугілля призводить до значного зростання швидкості газифікації, а відповідно — до збільшення утворення CO (рис. 3.9,б). При цьому інтенсивна ендотермічна реакція спричиняє більш різке зниження температури газу, яка досягає приблизно 800 °C вже на висоті близько 1 м (рис. 3.9,а), після чого процес газифікації практично припиняється

Характер зміни концентрації CO та перебіг відновлення залізорудних окатишів у цьому випадку є подібним до ситуації з підвищеною температурою вхідного газу (рис. 3.7). Чим більша кількість CO утворюється у реакторі, тим вищою стає швидкість відновлення оксидів заліза. У розрахунковому варіанті повна металізація досягається вже на відстані близько 12 м від місця подачі твердої шихти, причому без подальшого повторного окиснення. За даними [18], реакційна здатність відновника впливає не лише на утворення CO, а й на морфологію металевого заліза, що формується під час відновлення.

Отримані результати підтверджують ключову роль кінетики газифікації деревного вугілля у роботі процесу BIORED. Використане у дослідженні дубове деревне вугілля не було спеціально підготовлене для цієї технології, а умови його піролізу не оптимізувалися для подальшої газифікації при 1100 °C у атмосфері CO–CO₂. Це свідчить про наявність значного потенціалу для цілеспрямованого підбору та підготовки біовуглецю, який може мати реакційну здатність, порівнянну або навіть вищу за значення, наведені у роботі [27], що дозволить підвищити ефективність процесу BIORED.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ

У зв'язку з відсутністю дослідно-промислової або пілотної установки для безпосередньої перевірки працездатності процесу BIORED та перевірки результатів моделювання, у роботі застосовано непрямий метод експериментальної перевірки з використанням термогравіметричного аналізу.

Термогравіметрична установка була оснащена програмованими витратомірами для подачі газів CO та CO₂, що дозволило змінювати температуру та склад реакційного середовища відповідно до локальних умов, які зазнає окатиш під час його руху в шахтній печі. Таким чином, втрата маси зразка у часі, зафіксована у термогравіметричному експерименті, відповідає зміні маси окатиша протягом його часу перебування у реакторі, що забезпечує коректне порівняння з результатами моделювання.

У дослідженні використано залізорудні окатиші для прямого відновлення, хімічний склад яких наведено у таблиці 4.1. Окатиші містять приблизно 95 % гематиту (Fe₂O₃), близько 0,13 % вюститу (FeO) та близько 5 % інертних оксидів.

Таблиця 4.1 – Хімічний склад залізорудних окатишів, %

Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	S	P	Інші
94,92	2,01	0,81	1,40	0,62	0,13	0,003	0,023	0,09

У випадку повного відновлення теоретична втрата маси становить близько 28,6 %, що використовується як зручний кількісний показник для оцінювання ступеня металізації у процесі експерименту. Для спрощення розрахунків та інтерпретації результатів окатиші розглядалися як ідеально сферичні частинки.

Експериментальні дослідження проводилися на термогравіметричній установці SETARAM TG 96. Система подачі газів забезпечувала максимальні

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.04.ЕД			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив	Сушко				Експериментальне дослідження процесу відновлення та верифікація моделі	Літера	Аркцш	Аркцшів
Перевірив	Савельєв						1	5
						МТ-22-2		
Н. контр.	Савельєв							
Затвердн.	Савельєв							

витрати до 0,5 л/хв (н.у.) для CO та 0,36 л/хв для CO₂, що визначало обмеження при відтворенні реальних умов шахтної печі.

Досягнення повної відповідності між умовами, розрахованими для промислової шахтної печі, та умовами термогравіметричного експерименту є неможливим, насамперед через обмеження витрати газу. У зв'язку з цим було застосовано наступний підхід: вибрано максимально можливу експериментальну витрату газу, визначено відповідну швидкість газового потоку (2–9 см/с) та виконано коригування параметрів моделі таким чином, щоб у розрахунках відтворити аналогічні умови.

Крім того, було скориговано швидкість руху твердої фази, з урахуванням висоти шару, для забезпечення часу перебування, що відповідає тривалості експерименту (21 година). Основні характеристики змодельованого режиму наведено у таблиці 4.2. У даному випадку вплив H₂ та H₂O не враховувався, тобто розглядалася спрощена модель умовної шахтної печі, в якій окатиш перебуває в тих самих термохімічних умовах, що і в термогравіметричному експерименті.

Таблиця 4.2 – Вхідні дані моделювання для перевірки за допомогою термогравіметричного експерименту

Параметр	Значення
Висота, м	0,45
Діаметр, м	3,5
Витрата твердих компонентів, кг/с	0,23
Витрата газу, моль/с	14,68
Температура твердих компонентів, °C	20
Температура газу, °C	1200

Зміна температури та складу газової фази наведена на рисунку 4.1. Розрахункова температурна крива, що використовувалася як заданий режим експерименту, добре узгоджується з фактично виміряною температурою. Склад газу відповідає як результатам моделювання, так і параметрам газової суміші, що

подавалася в експерименті. Слід зазначити, що ці умови відрізняються від базового варіанту моделювання і є менш сприятливими для досягнення повного відновлення.

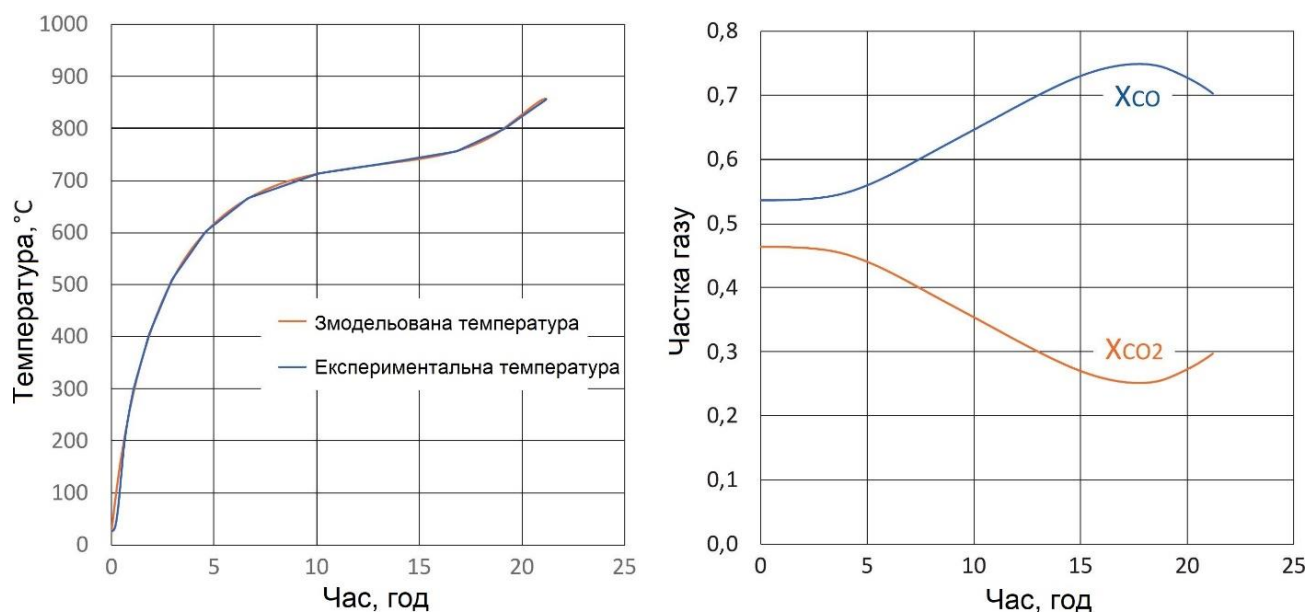


Рисунок 4.1 – Зміна температури та складу газової фази під час термогравіметричного експерименту

Дослідний зразок складався з одного окатиша масою близько 7 г, розміщеного у дротяному платиновому тиглі. Перед початком експерименту робочий об'єм установки було двічі продуто для видалення повітря. Після цього в реактор подавалася газова суміш, склад якої відповідав складу газу у верхній частині змодельованої шахтної печі. Далі проводився нагрів печі відповідно до заданого температурного режиму з одночасною подачею газу заданого складу.

На рисунку 4.2 наведено зовнішній вигляд окатишів до (гематит) і після (металізований окатиш) відновлення. Встановлено, що, окрім зміни кольору, істотних змін геометричних параметрів або структури частинок не спостерігається.

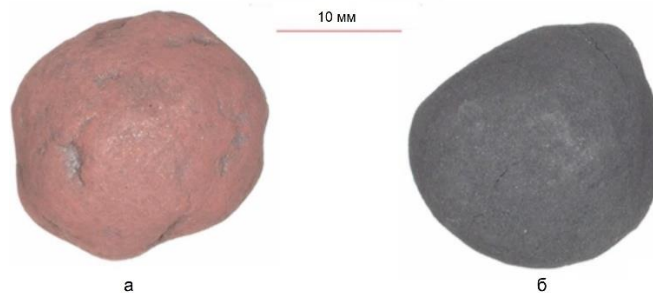


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд окатиша:

а – до відновлення; б – після відновлення

На рисунку 4.3 наведено порівняння експериментальної втрати маси, отриманої за допомогою термогравіметричного аналізу, з розрахунковими даними, а також зміни масових часток оксидів заліза та металевого заліза. Як експериментальні, так і розрахункові криві чітко відображають послідовність трьох стадій відновлення.

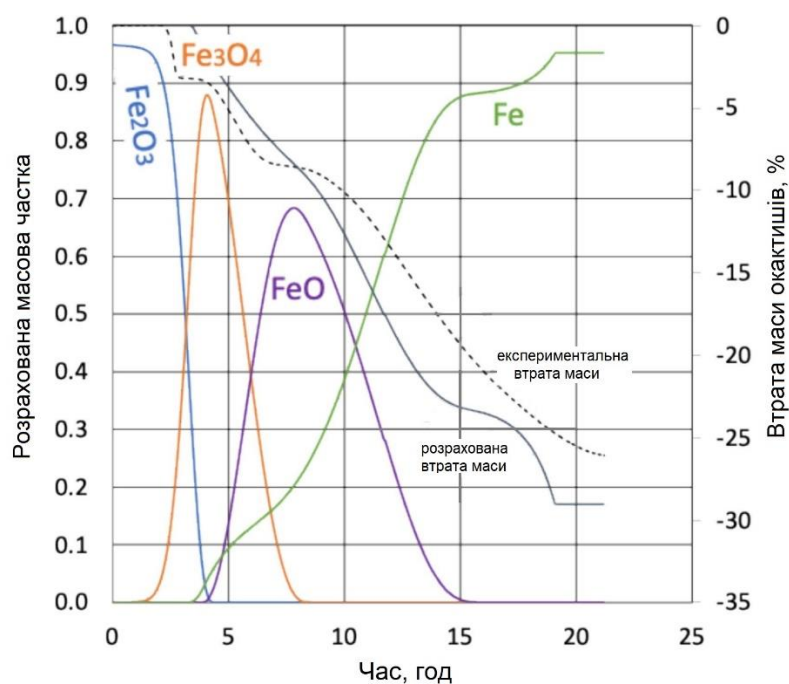


Рисунок 4.3 – Експериментальна та змодельована втрата маси окатишами

Зокрема, піки вмісту Fe_3O_4 та FeO на розрахункових кривих відповідають завершенню перших двох плато на експериментальній кривій. Експериментально

зафіксовані втрати маси приблизно 3 % та 8 % добре узгоджуються з теоретичними значеннями для переходів $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ та $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{FeO}$ відповідно.

Разом з тим, на завершальній стадії спостерігаються певні розбіжності. Експериментальна втрата маси досягає приблизно 26 %, що дещо менше за теоретичне значення 28,6 %, яке відповідає повному видаленню кисню. Це свідчить про неповне відновлення вюститу до металевого заліза в умовах експерименту.

Розрахункові дані показують завершення процесу відновлення приблизно через 16 годин, після чого частка металевого заліза зростає з 90 до 96 % за рахунок газифікації осажденного вуглецю (у проміжку 15–19 год), що не фіксується експериментально. Наявність цього вуглецевого осаду також пояснює початкову затримку втрати маси у розрахунковій кривій.

Слід зазначити, що кінетичні параметри реакції відновлення вюститу до заліза у моделі були запозичені з робіт, присвячених відновленню воднем або сумішами $\text{H}_2\text{--CO}$ [23], і можуть потребувати уточнення для умов відновлення чистим CO . У цьому контексті доцільним є проведення додаткових експериментальних досліджень для підвищення точності моделі.

Таким чином, незважаючи на окремі кількісні розбіжності, загальна узгодженість між експериментальними та розрахунковими результатами є задовільною, що дозволяє вважати математичну модель адекватною та підтвердженою експериментально непрямым методом.

5 ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ПРОЦЕСУ BIORED

5.1 Методика оцінки екологічного впливу (LCA-аналіз)

Для оцінювання потенційних екологічних переваг процесу BIORED було проведено аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) відповідно до вимог стандартів ISO. Метод LCA є комплексним підходом, що дозволяє оцінити сукупний вплив технологічної системи на довкілля протягом усього її життєвого циклу — від видобутку сировини до отримання кінцевого продукту. Даний підхід широко застосовується як у наукових дослідженнях, так і в промисловій практиці.

У літературі представлено значну кількість робіт, присвячених порівняльному аналізу різних технологій виробництва сталі [28]. У даній роботі проведено атрибутивний LCA-аналіз технологічного маршруту «технологія BIORED–електродугова піч» (далі BIORED–EAF), результати якого порівнювалися з традиційною схемою «доменна піч–кисневий конвертер» (далі BF–BOF).

Важливо враховувати, що результати LCA значною мірою залежать від регіональних умов. З огляду на те, що процес BIORED передбачає інтенсивне використання біомаси, виробництво доцільно розміщувати у регіонах із достатніми локальними біоресурсами, щоб уникнути імпорту сировини.

Крім того, оскільки процес передбачає переробку залізної руди у DRI, оптимальним є розташування виробництва поблизу родовищ залізної руди, що дозволяє мінімізувати транспортні витрати та створює можливість реалізації продукції у вигляді металізованого заліза. Для забезпечення коректності порівняння аналогічні географічні умови мають бути прийняті і для сценарію BF–BOF.

Оскільки процес BIORED забезпечує отримання губчастого заліза (DRI), яке

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.05.ЕО			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Екологічна оцінка процесу bioired	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив	Сушко						1	5
Перевірив	Савельєв							
Н. контр.	Савельєв							
Затвердив	Савельєв					MT-22-2		

є проміжним продуктом, до складу дослідження було включено також стадію виплавки сталі в електродуговій печі (EAF). Аналогічно для традиційного маршруту враховано стадію переробки чавуну у сталь у киснево-конвертерному агрегаті (BOF).

У якості функціональної одиниці прийнято виробництво 1 т рідкої сталі, що забезпечує можливість коректного порівняння різних технологічних маршрутів.

У дослідженні використано підхід cradle-to-gate, який охоплює всі стадії — від видобутку сировини до отримання рідкої сталі на виході металургійного виробництва (рис. 5.1).

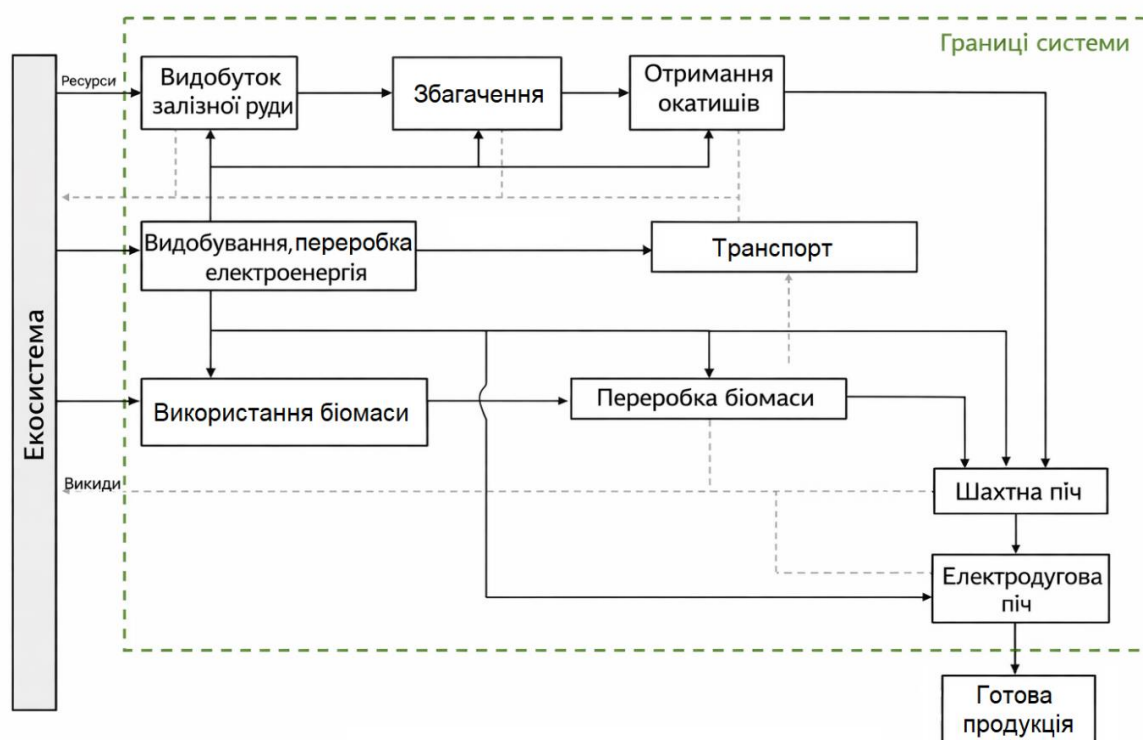


Рисунок 5.1 – Структурна схема процесів та межі системи

Фаза будівництва виробничих потужностей не враховувалася, оскільки її внесок у загальний екологічний вплив є незначним порівняно з експлуатаційною фазою при великих обсягах виробництва.

Розглядалися такі категорії екологічного впливу: зміна клімату (з урахуванням і без урахування біогенного CO₂), утворення твердих частинок,

вичерпання запасів викопних ресурсів, споживання прісної води, евтрофікація (забрудненню вод поживними речовинами) та екотоксичність водних екосистем, токсичність для людини, закислення, іонізуюче випромінювання, використання земель, морська екотоксичність, фотохімічне окиснення, руйнування озонового шару тощо.

5.2 Результати оцінки екологічного впливу процесу BIORED

Результати оцінювання екологічного впливу для маршруту BIORED–EAF показують, що найбільший внесок у більшість категорій мають процеси виробництва окатишів, що пов'язано з високотемпературними стадіями їх підготовки. Виняток становлять категорії, пов'язані зі зміною клімату, евтрофікацією та фотохімічним окисненням, де основний внесок припадає на електродугову піч через значне споживання електроенергії.

Виробництво деревного вугілля займає третє місце за рівнем впливу у більшості категорій. Вплив на використання земель виявився відносно невисоким, що пояснюється специфікою методології оцінювання, яка враховує не площу використання, а ступінь впливу на екосистеми.

Безпосередній внесок шахтної печі є відносно незначним, оскільки основним продуктом викидів є біогенний CO₂, який має обмежений вплив на зміну клімату.

Для традиційного маршруту BF–BOF встановлено, що основним джерелом викидів є доменна піч, яка формує до 60 % викидів CO₂. Значний внесок також мають процеси коксування та агломерації.

Порівняння обох технологій (рис. 5.2) показує, що у більшості категорій маршрут BIORED–EAF має значно нижчий екологічний вплив. Зокрема, у категорії «зміна клімату» викиди становлять 242 кг CO₂-екв/т сталі для BIORED–EAF проти 1928 кг CO₂-екв/т сталі для BF–BOF, що узгоджується з літературними даними [31].

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.05.ЕО	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		4

Збільшення впливу для BIORED спостерігається лише в окремих категоріях, що пов'язано з використанням біомаси (землекористування) та електроенергії (іонізуюче випромінювання, водна екотоксичність).

5.3 Аналіз та узагальнення результатів екологічної оцінки

Отримані результати свідчать, що технологічний маршрут BIORED–EAF має потенціал забезпечити зменшення викидів парникових газів до 8 разів порівняно з традиційною схемою BF–BOF. При цьому максимальний ефект досягається за умов використання локальної біомаси, розміщення виробництва поблизу родовищ руди та застосування низьковуглецевої енергетики.

Навіть при використанні енергетичного балансу з вищою вуглецевою інтенсивністю (наприклад, характерного для країн Європи), викиди для BIORED–EAF зростають до 936 кг CO₂-екв/т сталі, але залишаються значно нижчими, ніж для BF–BOF, і навіть нижчими за показники маршруту MIDREX–EAF [31].

Таким чином, процес BIORED можна розглядати як перспективну технологію декарбонізації чорної металургії, що поєднує ефективне використання біомаси та сучасні підходи до виробництва сталі.

ВИСНОВКИ

1. У роботі досліджено новий підхід до виробництва металізованого заліза — процес BIORED, що передбачає використання деревного вугілля як біогенного відновника та реалізується в шахтній печі з рециркуляцією газів. Показано, що така схема принципово відрізняється від традиційних процесів прямого відновлення за складом шихти та організацією газового контуру.

2. Розроблено та адаптовано математичну модель типу REDUCTOR, доповнену врахуванням другої твердої фази (деревного вугілля) та реакцій деволатилізації і газифікації. Моделювання дозволило кількісно описати розподіл температур, складу газової фази та ступеня відновлення по висоті реактора, а також встановити просторове розділення зон газифікації та відновлення.

3. Встановлено, що за температури газу на вході близько 1100 °С та підвищеного вмісту CO ($\approx 65\%$) забезпечується ефективний перебіг процесу з досягненням високого ступеня металізації. Показано, що підвищення температури або реакційної здатності деревного вугілля дозволяє скоротити висоту реактора з ≈ 28 м до 12–15 м та досягти повної металізації ($\approx 100\%$) без повторного окиснення.

4. Досліджено кінетику перетворення деревного вугілля, встановлено, що виділення летких відбувається у верхній частині реактора (≈ 1 м) і забезпечує близько 25 % перетворення, тоді як основне утворення CO ($\approx 98\%$) відбувається внаслідок газифікації твердого вуглецю у нижній частині печі. Ступінь перетворення деревного вугілля на виході становить близько 0,62, що вказує на доцільність його рециркуляції.

5. Експериментальна перевірка моделі за допомогою термогравіметричного аналізу показала задовільну узгодженість з розрахунковими даними. Встановлено відповідність стадій відновлення ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$) та характеру зміни маси, хоча повне відновлення вюститу в експерименті не досягалось ($\approx 26\%$ втрати

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.В								
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ					Літера		Аркцш	Аркцшів
Розробив	Сушко											1	2
Перевірив	Савельєв												
Н. контр.	Савельєв												
Затверди	Савельєв												
					МТ-22-2								

маси проти теоретичних 28,6 %), що вказує на необхідність уточнення кінетичних параметрів.

6. За результатами аналізу життєвого циклу (LCA) встановлено, що технологічний маршрут BIORED–EAF дозволяє знизити викиди парникових газів до 242 кг CO₂-екв/т сталі, що приблизно у 8 разів менше, ніж для традиційного процесу BF–BOF (≈1928 кг CO₂-екв/т). Основною причиною є використання вуглецево-нейтрального біогенного відновника, що підтверджує перспективність процесу для декарбонізації металургії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Iron and Steel Technology Roadmap. Paris: International Energy Agency, 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (дата звернення: 07.04.2025).
2. **Большаков В. І., Тарасов В. К., Семененко Д. М.** Сучасні тенденції розвитку технологій виробництва заліза та сталі в умовах декарбонізації металургії // Метал та лиття України. 2021. № 4. С. 5–14.
3. Wang H., Zhao W., Chu M., Feng C., Liu Z., Tang J. Current status and development trends of innovative blast furnace ironmaking technologies aimed to environmental harmony and operation intellectualization // Journal of Iron and Steel Research International. 2017. Vol. 24. P. 751–769. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(17\)30115-2](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(17)30115-2).
4. Fan Z., Friedmann S. J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy // Joule. 2021. Vol. 5. P. 829–862. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.
5. Sun M., Pang K., Barati M., Meng X. Hydrogen-based reduction technologies in low-carbon sustainable ironmaking and steelmaking: A review // Journal of Sustainable Metallurgy. 2024. Vol. 10. P. 10–25. <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00772-4>.
6. Тарасов В. К., Большаков В. І., Семененко Д. М. Перспективи розвитку бездомених технологій виробництва заліза // Металургійна та гірничорудна промисловість. 2018. № 2. С. 7–13.
7. Yi L. Y., Huang Z. C., Peng H., Jiang T. Action rules of H₂ and CO in gas-based direct reduction of iron ore pellets // Journal of Central South University. 2012. Vol. 19. P. 2291–2296. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1274-0>.

					КНУ.РБ.136.26.113с-14.СВД			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив	Сушко				СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		Літера	Аркцш
Перевірив	Савельєв							Аркцшів
								1
Н. контр.	Савельєв						МТ-22-2	
Затверди	Савельєв							

8. World Direct Reduction Statistics. MIDREX Technologies Inc., World Steel Dynamics, 2019. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-STATSbook2019Final.pdf> (дата звернення: 07.04.2025).

9. Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen ironmaking: how it works // Metals. 2020. Vol. 10. P. 922. <https://doi.org/10.3390/met10070922>.

10. Suopajarvi H., Kemppainen A., Haapakangas J., Fabritius T. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 148. P. 709–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.029>.

11. Кулик М. М., Білецький В. С. Біомаса як альтернативне джерело енергії у промисловості // Енергетика та електрифікація. 2017. № 6. С. 32–37.

12. MacPhee J. A., Gransden J. F., Giroux L., Price J. T. Possible CO₂ mitigation via addition of charcoal to coking coal blends // Fuel Processing Technology. 2009. Vol. 90. P. 16–20. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.007>.

13. Fick G., Mirgaux O., Neau P., Patisson F. Using biomass for pig iron production: a technical, environmental and economical assessment // Waste and Biomass Valorization. 2014. Vol. 5. No. 1. P. 43–55. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9223-1>.

14. Wang C., Mellin P., Lövgren J., Nilsson L., Yang W., Salman H., Hultgren A., Larsson M. Biomass as blast furnace injectant – considering availability, pretreatment and deployment in the Swedish steel industry // Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 102. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.013>.

15. Strezov V. Iron ore reduction using sawdust: experimental analysis and kinetic modelling // Renewable Energy. 2006. Vol. 31. P. 1892–1905. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.032>.

16. Hata Y., Purwanto H., Hosokai S., Hayashi J., Kashiwaya Y., Akiyama T. Biotar ironmaking using wooden biomass and nanoporous iron ore // Energy & Fuels. 2009. Vol. 23. P. 1128–1131. <https://doi.org/10.1021/ef800967h>.

17. Zuo H., Hu Z., Zhang J., Li J., Liu Z. Direct reduction of iron ore by biomass char // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 20. P. 514–521. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0759-7>.

18. Bagatini M. C., Zymła V., Osorio E., Vilela A. C. F. Carbon gasification in self-reducing mixtures // ISIJ International. 2014. Vol. 54. P. 2687–2696. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2687>.

19. Guo D., Hu M., Pu C., Xiao B., Hu Z., Liu S., Wang X., Zhu X. Kinetics and mechanisms of direct reduction of iron ore–biomass composite pellets with hydrogen gas // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40. P. 4733–4740. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.065>.

20. Guo D., Li Y., Cui B., Chen Z., Luo S., Xiao B., Zhu H., Hu M. Direct reduction of iron ore/biomass composite pellets using simulated biomass-derived syngas: experimental analysis and kinetic modelling // Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 327. P. 822–830. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.118>.

21. Wang T., Mirgaux O., Patisson F. Cleaner steelmaking using biomass: A novel ironmaking process // Chemical Engineering Science. 2026. Vol. 319. Art. 122319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122319>

22. Ranzani da Costa A., Wagner D., Patisson F. Modelling a new, low CO₂ emission hydrogen steelmaking process // Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 46. P. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.045>.

23. Hamadeh H., Mirgaux O., Patisson F. Detailed modeling of the direct reduction of iron ore in a shaft furnace // Materials. 2018. Vol. 11. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma11101865>.

24. Wang T. Novel iron ore direct reduction process using biomass: PhD dissertation. University of Lorraine, France, 2022. 112 p. URL: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04128333>.

25. Liu G., Strezov V., Lucas T. A., Wibberley L. J. Thermal investigations of direct iron ore reduction with coal // Thermochemica Acta. 2004. Vol. 410. P. 133–140. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00398-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00398-8).

26. Khasraw D., Spooner S., Hage H., Meijer K., Li Z. Devolatilisation characteristics of coal and biomass with respect to temperature and heating rate for Hisarna alternative ironmaking process // Fuel. 2021. Vol. 284. P. 119101. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119101>.

27. Klose W., Wolki M. On the intrinsic reaction rate of biomass char gasification with carbon dioxide and steam // Fuel. 2005. Vol. 84. P. 885–892. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.016>.

28. Norgate T., Langberg D. Environmental and economic aspects of charcoal use in steelmaking // ISIJ International. 2009. Vol. 49. P. 587–595. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.587>.

29. Burchart-Korol D. Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study // Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 54. P. 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.031>.

30. Li F., Chu M., Tang J., Liu Z., Wang J., Li S. Life-cycle assessment of the coal gasification–shaft furnace–electric furnace steel production process // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 287. P. 125075. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125075>.

31. Tanzer S. E., Blok K., Ramírez A. Can bioenergy with carbon capture and storage result in carbon negative steel? // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2020. Vol. 100. P. 103104. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103104>.