МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ННІ/факультет	Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра	Хімічних технологій та інженерії
Спеціальність	161 Хімічні технології та інженерія
Форма навчання	денна

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Беспалюк Тетяни Олександрівни

на тему: Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків

за матеріалами: КХВ ПАТ « АрселорМіттал Кривий Ріг»

науковий керівник: к.т.н. _____ Десна Н.А.

(підпис)

Робота допущена до захисту в ЕК
Протокол засідання кафедри
від 14.01.2026 р. № 9
Завідувач кафедри _____
(підпис)

к.т.н., доцент *К.О. Шмельцер*

ДУЕТ – 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Хімічних технологій та інженерії
_____ доцент, к.т.н.
Шмельцер К.О.
(підпис) (посада, вчене звання, прізвище ініціали)
«15» листопада 2025 **року**

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Беспалюк Тетяні Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи магістра Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків
керівник кваліфікаційної роботи магістра Десна Наталя Анатоліївна, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу №718-ст від «20» жовтня 2025 р.
2.Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 15.01.2026 р.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи магістра Техніко-економічні показники роботи вуглепідготовчого цеху КХВ ПАТ «АМКР»
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
4.1 Аналітична частина: Розгляд теорій коксоутворення та технологій виробництва металургійного коксу. Обґрунтування існуючих вимог до якості коксу доменного. Аналіз технологічних схем післякамерної обробки коксу, способів його гасіння та сортування.
4.2 Основна частина: Аналіз гранулометричного складу коксу отриманого при різних способах його гасіння та за використанням різних схем сортування. Порівняння основних якісних показників коксу різного розміру шматків, обґрунтування розподілу властивостей коксу за теорією коксоутворення. Обґрунтування запровадження технологій руйнування коксу крупних класів та вибір оптимального обладнання.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Завданням графічний матеріал не передбачений

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	Десна Н.А., доцент		
2 Основна частина	Десна Н.А., доцент		

7. Дата видачі завдання «15» листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	1.12.2025	
2.	Основна частина	19.12.2025	
3.	Оформлення пояснювальної записки	26.12.2025	
4.	Подання роботи до кафедри	15.01.2026	
5.	Захист роботи в ЕК	20.01.2026	

Здобувач _____Беспалюк Т.О.__
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ _____Десна Н.А._____
(підпис) (прізвище та ініціали)

*Примітка. Бланк друкується з обох сторін на одному аркуші.

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	К-сть. ли-сті	№ екз	Приміт-ка
			Документація загальна			
1	А4	ННТІ. 161. ПЗ	Пояснювальна записка	78		

Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	ННТІ 161. КРМ. ПЗ			
Розробив		Беспалюк Т.О.		20.01	Відомість кваліфікаційної роботи магістра	Літ.	Лист	Листів
Керівник		Десна Н.А.		20.01		КР Т	1	1
Консульт.		Десна Н.А.		20.01		ННТІ Каф. ХТІ гр. ХТ-24м		
Н.контр.		Шмельцер К.О.		20.01				
Затв.		Шмельцер К.О.		20.01				

АНОТАЦІЯ

Беспалюк Т.О. Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія». Державний університет економіки і технологій. Навчально-науковий технологічний інститут. Кривий Ріг, 2026.

Кваліфікаційна робота присвячена комплексному дослідженню та обґрунтуванню технологічних рішень для оптимізації якості та гранулометричного складу металургійного коксу на етапі його післякамерної обробки.

Порівняльний аналіз якісних характеристик коксу показав, що великогабаритна фракція (>60 мм) у більшості випадків має гірші експлуатаційні властивості, зокрема знижену міцність і підвищену схильність до руйнування, ніж оптимальні за розміром фракції. Зменшення механічної міцності (M_{25}) та післяреакційної міцності (CSR) такого коксу негативно позначається на газодинамічних умовах роботи доменної печі. Це підтверджує доцільність вилучення великогабаритного коксу зі складу шихти доменної плавки. У зв’язку з цим обґрунтовано впровадження технології цілеспрямованого руйнування (дроблення) великогабаритного коксу як найбільш ефективного способу стандартизації його гранулометричного складу.

У роботі проаналізовано розподіл властивостей (міцності, пористості, реакційної здатності) між різними фракціями коксу, спираючись на теорію коксоутворення.

Ключові слова: кокс, якість коксу, післякамерна обробка, гасіння коксу, дроблення великогабаритного коксу, реакційна здатність (CRI/CSR).

ЗМІСТ

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА 8
1.1 Технологія виробництва коксу 8
1.2 Фізико-хімічні основи коксування [1] 10
1.3 Основні властивості вугілля, що впливають на якість коксу 13
1.4 Технологічні схеми післякамерної обробки коксу 15
1.5 Аналіз існуючих технологічних схем сортування коксу 18
1.6 Сучасні вимоги до якості коксу 19
1.7 Закономірності розподілу показників якості коксу у зв'язку з кінетикою та механізмом коксоутворення 27
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА 33
2.1 Порівняння якісних показників коксу та теоретичне обґрунтування розподілу властивостей 33
2.2 Вплив на механічну міцність коксу 35
2.3 Реакційна здатність (CRI) та індекс післяреакційної міцності (CSR) 36
2.4 Методологія визначення розподілу розмірів частинок коксу та статистична обробка даних 40
2.5 Лазерна дифракція та аналіз зображень для аналізу коксу 44
2.6 Обґрунтування та вибір обладнання для технології дроблення великогабаритного коксу 52
2.7 Вибір обладнання 54
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 63
1.1 Пожежна безпека 63
3.2 Вентиляція 64
3.3 Стічні води 66
3.4 Утилізації відходів коксохімічного виробництва при частковому брикетуванні вугільної шихти 67
ВИСНОВОК 71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 73

ВСТУП

Коксохімічне виробництво є одним із ключових процесів металургійної промисловості, оскільки кокс використовується як основний відновник у доменному виробництві чавуну. Висока якість коксу визначає ефективність металургійних процесів, що робить дослідження факторів, які впливають на його характеристики, вкрай актуальними.

Одним із найважливіших чинників, що впливають на якість коксу, є склад та підготовка вугільної шихти. Вугілля різних марок має різні фізико-хімічні властивості, які впливають на процес коксування та формування кінцевих характеристик коксу, таких як механічна міцність, пористість, реакційна здатність тощо. Крім того, важливу роль відіграють технологічні параметри підготовки вугільної шихти, зокрема ступінь подрібнення, вологість, змішування та інші операції, що визначають якість кінцевого продукту.

Метою роботи є дослідження впливу складу вугільної шихти та умов її підготовки на якісні характеристики коксу. Для досягнення цієї мети буде проведено аналіз основних фізико-хімічних показників вугілля, вивчено вплив різних технологічних параметрів на формування характеристик коксу та розглянуто можливості покращення якості кінцевого продукту.

Актуальність дослідження визначається необхідністю підвищення ефективності коксохімічного виробництва, оптимізації використання сировини та зменшення впливу на навколишнє середовище. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів коксування та поліпшення характеристик коксу для металургійної промисловості.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологія виробництва коксу

Для виробництва коксу застосовують різні марки вугільних концентратів, які у вуглепідготовчій ділянці вуглекоксового цеху подрібнюють і змішують у визначених пропорціях. Після цього вугільну шихту транспортують у вугільні башти, звідки її завантажують у коксові печі виробничої ділянки вуглекоксового цеху.

Виробництво коксу здійснюється при нагріванні вугільної шихти визначеного складу в коксових печах (камерах коксування) до температур 1000 – 1050^{o}C без доступу повітря. Металургійний кокс важливий компонент сировини в доменному процесі і транспортування його економічно невигідне. Загальна схема коксохімічного виробництва наведена на рис. 1.1.

Вихід коксу становить до 75% від маси коксованої сировини. Для коксової сировини (шихти) найважливішою властивістю є спікливість − здатність вугілля при нагріванні без доступу повітря утворювати з різних вугільних фракцій твердий залишок у вигляді міцних шматків. Цією властивістю володіють вугілля марок «Г», «Ж», «К» і «ПС». Однак з цих марок вугілля утворювати металургійний кокс здатне тільки вугілля марки «коксове».

Нагрівання вугільної шихти здійснюється через обігрівальні канали уздовж камер коксування продуктами горіння коксового газу, який утворюється при виробництві коксу як супутня продукція і проходить відповідне очищення на ділянках УХП та сіркоочищення цеху УХП. Продукти горіння коксового газу викидаються в атмосферне повітря через димові труби коксових батарей та іншого паливовикористовуючого обладнання.

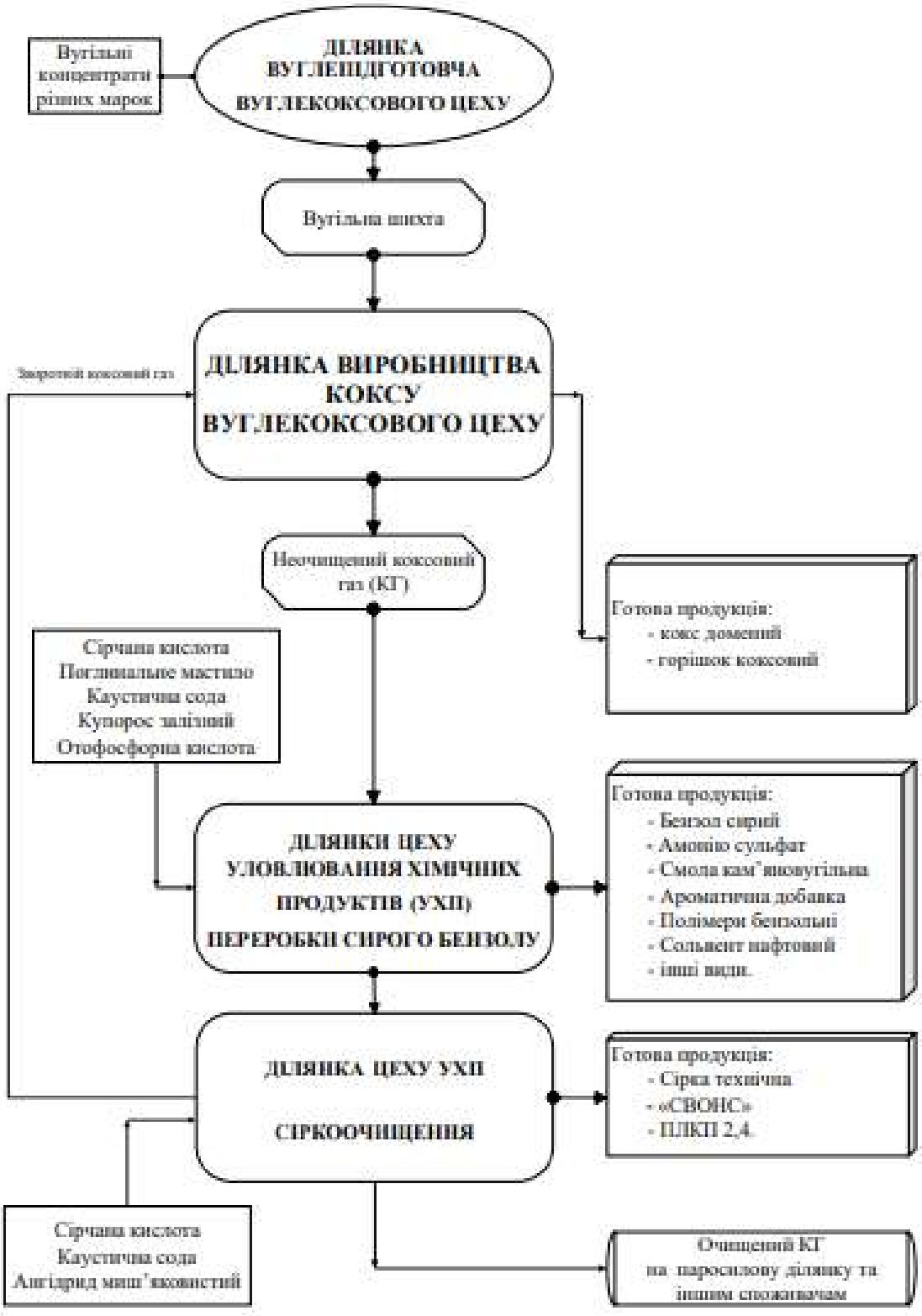


Рис.1.1 - Технологічна схема коксохімічного виробництва

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Готовий кокс видається з камер коксування в гасильний вагон, потім охолоджується на гасильний башті очищеною стічною водою. Далі охолоджений кокс сортується за розміром кусків і відправляється споживачу.

Коксовий газ, який утворюється разом із коксом під час коксування вугільної шихти, містить смолисті речовини, аміак, сірководень, бензольні вуглеводні (бензол, толуол, ксилол тощо), ціаністий водень, фенол, нафталін та інші компоненти. Газ з температурою 700–800°С з камер коксування потрапляє в газозбірники, де відбувається його охолодження. Після цього у цеху уловлювання хімічних продуктів (УХП) з нього вилучають зазначені хімічні сполуки.

Спершу коксовий газ охолоджують до 35°С у первинних газових холодильниках (ПГХ), де з нього конденсуються вода та кам'яновугільна смола, які потім розділяються у відповідних ємностях. Кам'яновугільну смолу згодом транспортують споживачам. Наступним етапом є уловлювання аміаку, з якого отримують сульфат амонію — добриво для сільського господарства. Далі з коксового газу виділяють бензольні вуглеводні для отримання сирого бензолу, який потім очищують до чистих бензольних продуктів. На етапі сіркоочищення у цеху УХП із газу вилучають сірководень, після чого коксовий газ використовують як паливо для нагрівання коксових печей та інших агрегатів, що споживають паливо.

1.2 Фізико-хімічні основи коксування [1]

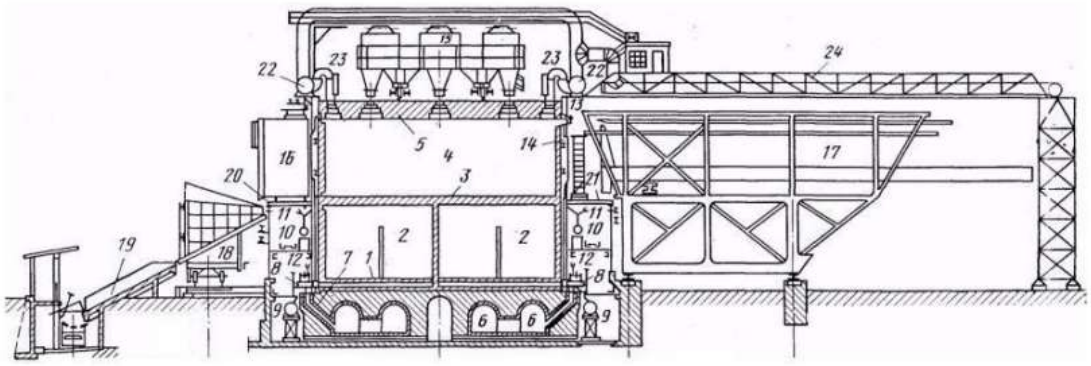
Коксування – це складний двофазний ендотермічний процес, в якому протікають термофізичні перетворення коксованої сировини і хімічні реакції за участю компонентів його органічної частини. Коксування проводять в коксових печах, вони є реакторами періодичної дії з непрямим нагріванням, в яких теплота передається до коксованої вугільної шихти через стінку реактора. Тому термофізичні процеси при коксуванні включають:

– теплопередачу від стінки до матеріалу шихти;

– дифузію продуктів піролізу (парів води і летючих речовин) через шар шихти;

– видалення цих продуктів з шихти.

Коксова піч – реактор періодичної дії, тому температура вугільної шихти в ній змінюється в часі. Отже, змінюється і рушійна сила процесу, тобто різниця температур між гріючими газами та вугільної шихтою. Безпосередньо після завантаження шихти температура її мала і різниця температур велика. Тому в холодну шихту надходить в одиницю часу більша кількість теплоти, і, вугілля під стінами камери починає коксуватися, в той час як внаслідок низької теплопровідності шихти середні шари залишаються холодними. По мірі прогріву шихти її температура зростає і рушійна сила процесу падає при одночасному підвищенні температури по перетину камери. Поперечний розріз типовий коксової батареї наведено на рисунку 1.2.



1 - подові канали; 2 - регенератори; 3 - корнюрная зона; 4 - камери коксування і вертикаль; 5 - верх батареї; 6 - кабана; 7 - димові патрубки; 8 - газовоздушні клапани; 9 - газопровід доменного газу; 10 - газопровід коксового газу; 11 - газорозподільна арматура; 12 - кантовочнимі пристосування; 13 - анкерна стійка; 14 - двері; 15 - углезагрузочная машина; 16 - дверезйомних машина; 17 - коксовиталківателей; 18 - коксотушільний або коксовозний вагон; 19 - дріб'язок рампа; 20, 21 - обслуговує майданчик коксової і машинної сторін; 22 - газосборнік; 23 - стояки для відводу газу; 24 - міст під газопровід

Рис. 1.2 – Поперечний розріз типовий коксової батареї

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Хімічні перетворення при коксуванні можуть бути зведені до реакцій двох типів: первинним і вторинним. До первинних реакцій, що протікають в шихті при її нагріванні, відносяться:

– реакції деструкції складних молекул;

– реакції фенолізації;

– реакції карбонізації органічної частини вугілля;

– реакції відщеплення атомів водню, гідроксильних, карбоксильних і метоксільних OCH_3 груп.

В процесі первинних перетворень з вугільної шихти виділяються первинний газ і пари первинної смоли і утворюється кокс. До вторинних реакцій, які протікають при контакті первинного газу, що виділився, і первинної смоли з нагрітою стінкою печі, відносяться:

– реакції крекінгу алканів

$$C_nH_{2n+2} \rightarrow C_mH_{2m+2} + C_pH_{2p}; \quad (1.1)$$

– реакції полімерізації алкенів

$$3C_nH_{2n} \rightarrow \Delta C_nH_{2n}; \quad (1.2)$$

– реакції дегідрогенізації нафтенів

$$\Delta C_nH_{2n} \rightarrow C_nH_{2n-6} + 3H_2; \quad (1.3)$$

– реакції конденсації ароматичних вуглеводнів, наприклад

$$2C_6H_6 \rightarrow C_{10}H_8 + C_2H_4; \quad (1.4)$$

– реакції утворення карбенів з подальшим перетворенням їх у напівкокс і кокс.

Продуктом вторинних перетворень є складна суміш газоподібних і пароподібних при температурі коксування речовин різної природи – прямий коксовий газ (ПКГ).

Послідовність процесів, що протікають в шихті при підвищенні температури в печі, може бути представлена наступним чином:

– 250 °С – відщеплення H_2O, CO, CO_2, H_2;

– 300 °С – початок виділення КВС, виділення пірогенетичної води;

– 350-500 °С – пластифікація вугільної шихти;

– 500-550 °С – розкладання органічної частини вугілля з виділенням первинного газу і парів первинної смоли, спікання твердого залишку з утворенням напівкоксу;

– 600-700 °С – розкладання напівкоксу і повне виділення летких речовин;

– 700 °С – зміцнення твердої маси і утворення коксу.

1.3 Основні властивості вугілля, що впливають на якість коксу

Вологість. Сумарна вологість вугільної сировини складається з двох ключових фракцій: зовнішньої (поверхневої) та внутрішньої (гігроскопічної). Надмірна кількість вологи негативно позначається на якості кінцевого коксу, призводячи до зменшення його механічної стійкості, зростання загальної пористості та неоднорідності гранулометричного складу. Концентрація вологи у шихті також є визначальним фактором для таких технологічних параметрів, як насипна щільність, час, необхідний для коксування, а також об'єм і якість хімічних побічних продуктів. З огляду на це, максимальна частка вологи у вугільних концентратах підлягає обов'язковому нормативному контролю.

Зольність. Мінеральні компоненти, що містяться у вугіллі, визначаються показником зольності. Ці мінеральні включення виступають баластом у вугільній шихті, погіршуючи спікливі властивості вугілля та модифікуючи його здатність до коксування. Зростання зольності коксу, що утворюється, спричиняє зниження його опору механічним впливам, зменшує питому масу горючого матеріалу і вимагає додаткових енергетичних витрат на розплавлення зольного залишку. Економічні наслідки є значними: підвищення вмісту золи в коксі лише на один відсоток

призводить до скорочення ефективності доменного виробництва на 2,5-2,7 % та збільшення питомих норм споживання коксу для виплавки чавуну на 2,0-2,5 %.

Сірчистість. Сірка у вугільних концентратах представлена як органічними, так і мінеральними сполуками. Рівень сірчистості вихідного вугілля безпосередньо корелює з вмістом сірки в кінцевому коксі. Сірка, що залишається в коксі, потрапляє в активну фурменну зону доменної печі, де вступає в реакцію з розплавом, спричиняючи забруднення металу. Необхідність десульфурації (видалення сірки) під час доменного циклу призводить до зростання питомої витрати коксу та зниження загальної продуктивності агрегату.

Вихід летких речовин. При нагріванні вугілля без доступу повітря відбувається його розкладання з утворенням газоподібних, рідких продуктів і твердого вуглецевого залишку. Газоподібні й рідкі продукти називаються леткими речовинами. Вихід летких речовин є одним з важливих показників, що характеризують технологічні властивості вугілля. Цей показник значною мірою визначає віднесення вугілля до тієї або іншої групи або марки в класифікації.

Спікливість. Кокс отримують виключно з кам'яного вугілля. Проте не всі його різновиди є придатними для коксування; обов'язковою є наявність спікливості. Спікливість — це внутрішня властивість вугілля, яка дозволяє його розрізненим частинкам при нагріванні без доступу кисню трансформуватися у твердий залишок, представлений міцними грудками. Ця характеристика властива вугіллю таких марок як Г, Ж, К, та ПС, які в температурному діапазоні 350 – 450 ℃ переходять у пластичний, рідкотекучий стан.

Коксівність. Коксівністю називається здатність вугілля самостійно або в суміші з іншим вугіллям за певних умов підготовки й нагрівання до високих температур утворювати грудковий пористий матеріал – кокс, що володіє певною крупністю й механічною міцністю.

Сучасні коксохімічні заводи (КХЗ) використовують вугільні суміші (шихту) з ретельно підібраним співвідношенням марок:

- Газове (Г) — 30 - 35 %;
- Жирне (Ж) — 25 - 35 %;
- Коксівне (К) — 10 -15 %;
- Слабоспікливе (ПС) — 10 - 20 %.

Така збалансована шихта при піролізі забезпечує оптимальний вихід летких газоподібних продуктів і, що головне, гарантує формування міцного монолітного коксу, необхідного для ефективного перебігу сучасного доменного процесу.

1.4 Технологічні схеми післякамерної обробки коксу

Післякамерна обробка коксу включає в себе охолодження (гасіння) гарячого коксу після випалу в коксових печах. Існують два основні способи гасіння:

Мокре (водяне) гасіння — занурення кусків гарячого коксу у воду з метою швидкого охолодження та гасіння. Такий спосіб досить простий і поширений, проте він призводить до втрат енергії (тепла коксу), а також може негативно впливати на фізико-хімічні властивості коксу. При мокрому гасінні кокс вбирає вологу, що погіршує його механічну міцність, знижує вміст летких речовин і сприяє утворенню пилу.

Сухе гасіння (Dry Coke Quenching, CDQ) — реалізується за допомогою охолодження коксу інертним газом у спеціальних камерах із рекуперацією тепла. Цей спосіб дозволяє зберегти високу механічну міцність коксу, покращує його структурні характеристики, забезпечує енергоефективність за рахунок використання відновленого тепла (наприклад, для виробництва пари чи електроенергії). Крім того, сухе гасіння знижує емісію пилу та шкідливих газів у атмосферу.

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз мокрого та сухого гасіння коксу

Критерій	Мокре гасіння (МГК)	Сухе гасіння (СГК)
1. Принцип процесу	Охолодження відбувається шляхом безпосереднього інтенсивного зрошення гарячого коксу великою кількістю води у спеціальній башті гасіння.	Охолодження здійснюється циркуляцією інертного газу (зазвичай азоту, продуктів горіння або суміші N_2, CO, CO_2) у замкненому контурі.
2. Швидкість охолодження	Надзвичайно висока (від 1000 ˚С до 100 ˚С за 1-2 хвилини).	Повільна та контрольована (зазвичай 1-3 години).
3. Вплив на якість коксу	Головний недолік: Різкий термічний шок призводить до утворення тріщин та мікродефектів у структурі, що знижує його механічну міцність (зниження індексу М40, зростання М10). Вологість: Висока, зазвичай 3-5 % (іноді до 6-8%).	Головна перевага: Поступове, рівномірне охолодження запобігає термічному шоку. Це зберігає внутрішню структуру коксу, підвищуючи його механічну міцність та стійкість до стирання. Вологість: Надзвичайно низька, менше 0,5-1 %.
4. Енергетична ефективність	Втрата енергії: Вся теплова енергія (близько 10-15 % від загального теплового балансу коксування) безповоротно втрачається з парою.	Енергозбереження: Теплова енергія коксу утилізується для генерації високотемпературної пари, яку можна використовувати для виробництва електроенергії або в технологічних процесах.

Продовження табл. 1.1

5.Вплив на навколишнє середовище	Значний: Виділення великої кількості забрудненої пари, що містить пил, сірководень та феноли. Потреба в очищенні стічних вод гасіння.	Мінімальний: Процес практично безвідходний. Відсутність викидів забрудненої пари.
6.Капітальні та експлуатаційні витрати	Капітальні: Низькі. Експлуатаційні: Середні (витрати на воду, очищення стічних вод).	Капітальні: Високі (складне обладнання, градирні, парогенератори). Експлуатаційні: Низькі (компенсуються продажем енергії).
7.Механічна міцність	Нижча через термічний шок.	Вища, краща однорідність шматків.
8.Стійкість до стирання	Вища (більше дрібної фракції).	Нижча (менше дрібної фракції).
9.Вологість	Висока (до 5 %), що знижує корисне навантаження доменної печі.	Дуже низька (<1 %), що підвищує тепловий ККД в доменній печі.
10.Реакційна здатність (CRI/CSR)	Може бути трохи вищою через змінену поверхню.	Краща, що важливо для ефективності доменної плавки.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [2]

Сухе гасіння коксу (СГК) є більш досконалою та екологічно чистою технологією. Хоча вона вимагає більших початкових капіталовкладень, СГК забезпечує значну економічну вигоду за рахунок рекуперації тепла та дозволяє отримати кокс із вищими якісними характеристиками, що критично важливо для інтенсифікації доменного процесу.

1.5 Аналіз існуючих технологічних схем сортування коксу

Сортування коксу — це процес розділення охолодженого матеріалу на стандартні класи крупності (фракції) для подальшого використання. Основна мета — забезпечення споживача продуктом із заданими гранулометричними характеристиками, що є критичним для стабільності та ефективності доменного процесу.

Технологічна схема сортування залежить від вихідної якості коксу (яка, зокрема, формується способом гасіння — СГК чи МГК) та кінцевих вимог споживача.

Таблиця 1.2

Технологічні схеми сортування коксу

Схема	Опис процесу	Основне призначення
Одностадійна (Базова)	Використання 1-2 послідовних сит для відділення доменної фракції від дрібного коксу.	Для підприємств із простим асортиментом продукції. Швидка та малозатратна.
Двостадійна (Стандартна)	1. Грубе сортування: Виділення надкрупної фракції (>80 мм) та дріб'язку (0-25 мм). 2. Тонке сортування: Додаткове розділення дріб'язку на горішок (10-25 мм) та коксовий дріб'язок (0-10 мм).	Забезпечує точнішу гранулометрію доменного коксу та дозволяє продавати дві фракції дрібного коксу.
З дробленням крупних класів	Включає обов'язкове двостадійне сортування із встановленням дробарки перед надходженням на сортувальний комплекс або між стадіями. Надкрупний кокс (>80 мм) примусово дробиться.	Найпоширеніша та обґрунтована: Максимізує вихід якісного доменного коксу та забезпечує оптимальну гранулометрію.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [2]

Найбільш технологічно обґрунтованою є схема, яка передбачає обов’язкове дроблення надкрупної фракції (зазвичай >80 мм). Надкрупні шматки коксу часто мають гірші фізико-механічні показники (через структурну неоднорідність) та можуть погіршувати газопроникність шихти у доменній печі, викликаючи нерівномірний хід плавки. Дроблення перетворює цей матеріал на більш цінний доменний кокс (25-80 мм), підвищуючи загальну частку якісного продукту.

Встановлення дробарок (наприклад, валкових або барабанних) дозволяє стандартизувати гранулометричний склад, мінімізуючи розкид розмірів шматків, що є ключовою вимогою сучасного металургійного виробництва.

Сам процес сортування впливає на якість матеріалу через механічний вплив. Під час перекидання, транспортування та просіювання кокс руйнується. Це призводить до утворення додаткової кількості дрібних фракцій (0-10 мм), які мають бути видалені.

Оскільки сортування базується на розмірі, воно прямо впливає на розподіл якісних характеристик**.** Кокс дрібних класів (менше 25 мм), як правило, має вищу зольність та вологість (через більшу питому поверхню) та гірші показники CRI/CSR порівняно з доменною фракцією.

Таким чином, технологічна схема сортування є не просто розділенням, а активним елементом технологічного процесу, що дозволяє оптимізувати гранулометрію, покращити якісні показники кінцевого продукту та підвищити економічну ефективність коксохімічного виробництва.

1.6 Сучасні вимоги до якості коксу

Кокс є невід'ємним і багатофункціональним енерготехнологічним матеріалом у металургійному виробництві, зокрема в доменній печі. Його функції виходять за рамки простого палива. Насамперед, кокс виконує роль відновника (реагента) та ключового джерела теплової енергії в доменному процесі. Лише незначна його

частина безпосередньо витрачається на процеси відновлення оксидів заліза. Переважна ж маса коксу, потрапляючи у піч, згоряє разом з поданим паливом до діоксиду вуглецю (CO_2), забезпечуючи необхідний температурний режим. Утворений вуглекислий газ, контактуючи з розпеченим коксом, відновлюється до чадного газу (CO), який є основним відновлювальним агентом. Окрім цих енергетичної та реагентної функцій, кокс, як твердий, великофракційний матеріал, виконує надзвичайно важливу структурну функцію, підтримуючи газопроникність стовпа шихти та забезпечуючи рівномірний розподіл газу по всьому поперечному перерізу доменного агрегату.

З огляду на його ключову роль та високу вартість, кокс є найдорожчим компонентом чавуноплавильної шихти, що обумовлює постійну актуальність завдання зниження його собівартості при одночасному збереженні або покращенні якості. Ця складна проблема вирішується в рамках трьох основних стратегічних напрямків:

1. Виробництво коксу з покращеними якісними показниками (підвищення міцності, зниження реакційної здатності).
2. Зниження собівартості через вдосконалення технологій коксування та/або розширення асортименту сировинної бази для його виробництва.
3. Часткова або повна заміна коксу менш дорогими альтернативними енергоносіями (наприклад, пиловугільним паливом).

Сучасні вимоги до якісних характеристик доменного коксу є надзвичайно високими та регламентують як його фізико-механічні, так і хімічні властивості:

Механічна міцність (холодна міцність). Показник M25 (залишок на ситі 25 мм) має бути в діапазоні 88,0 - 90,0 %. Показник M10 (клас менше 10 мм) має бути 6,0 - 6,5 %.

Реакційна здатність та міцність після реакції. CSR (Міцність після реакції) — 60,0 - 75,0 %. CRI (Реакційна здатність) — 25 - 30,0 %.

Гранулометричний склад. Вміст фракції +80 мм (надмірно великий кокс) — не більше 5 %. Вміст фракції -25 мм (дрібниця) — не більше 5 %.

Вологість. Допустимі перепади вологості — не більше 0,5 % в обидва боки.

Хімічні показники. Зольність (вміст мінеральних домішок) — не повинна перевищувати 11 %. Вміст сірки — має бути обмежений на рівні 1,00 %.

Досягнення зазначених високих показників якості коксу здійснюється шляхом реалізації трьох основних технологічних напрямків:

1. Вибір оптимального складу вугільної шихти.
2. Цілеспрямована зміна властивостей вугільної шихти (наприклад, введення добавок).
3. Впровадження спеціальних методів підготовки вугілля (селективне подрібнення, термічна обробка, трамбування, брикетування).

Оптимізація властивостей та складу вугільної шихти відіграє вирішальну роль у формуванні кінцевих показників якості коксу. Хоча універсальні моделі для визначення ідеальних умов отримання високоякісного коксу відсутні, численні дослідження підтверджують можливість прогнозування якості коксу на основі детального аналізу параметрів вихідної сировини. До таких параметрів належать мацеральний склад, показники спікливості та спікання, склад мінеральної частини, ступінь метаморфізму, а також вміст летких речовин та сірки.

Загальновизнаним є факт адитивності показників технічного, петрографічного та пластометричного аналізу вугільної шихти та її окремих компонентів, що є фундаментальною основою для розрахунків.

Згідно із сучасними науковими уявленнями про властивості вугілля та процеси його термохімічної трансформації під час коксування, склад вугільних партій необхідно обирати, ґрунтуючись на:

- Показниках спікання та коксування окремих компонентів.

– Їхніх технологічних властивостях та особливостях, зумовлених конкретною технологією коксування (шарове коксування, застосування трамбування, брикетування, термічна підготовка).

– Врахуванні кінцевих вимог доменного виробництва до характеристик якості коксу (зольність, вміст сірки, механічна міцність, реакційна здатність, міцність після реакції).

Традиційна технологія шарового коксування вимагала вибору складу шихти на основі спікливих властивостей та поведінки вугілля різних технологічних марок. Усереднені вимоги до складу шихти включали [28, 29]:

– Низькометаморфізоване вугілля (15 % мас.), що забезпечує необхідну усадку та подачу коксового кеку.

– Добре спікливе вугілля середньої стадії метаморфізму (50-60 % мас.), яке є спікливою основою шихти.

– Високометаморфізоване вугілля (15-20 % мас.) з низькими спікливими властивостями, яке зменшує розтріскування та сприяє формуванню міцного коксу великого розміру.

Однак, в умовах погіршення якості видобутого вугілля та зміни балансу світових запасів (зокрема, зменшення доступності якісного вугілля середньої метаморфізації), підготовка шихти ідеального складу часто стає економічно невигідною або технологічно неможливою. Це посилює необхідність точного прогнозування якості коксу на основі характеристик вихідних компонентів при варіації складу шихти.

Одним із перших та найважливіших індикаторів якості вугілля, що використовується для характеристики коксування, є його петрографічний склад. Він відображає вміст мікрокомпонентів (мацералів) в органічній частині вугілля: вітриніт, ліптиніт (ексиніт) та інертиніт, які відрізняються походженням та властивостями. Вітриніт традиційно розглядається як основна мацеральна група у вугіллі. Для ідентифікації мацералів застосовується їхня здатність відбивати світло

(блиск), причому показники відбивної здатності зростають у послідовності: ліптиніт < вітриніт < інертиніт.

Сучасні дослідження підтверджують, що вплив петрографічних характеристик вугілля на якість отриманого коксу є критичним, що вимагає прогнозування цієї якості на основі комплексного набору показників. Обов'язковим елементом розрахунку формули вугільної суміші є врахування мацерального складу, відбивної здатності вітриніту та розподілу його компонентів за стадіями метаморфізму, а також оптимального співвідношення між спікливими (когезійними) компонентами (Σ CK) та інертизованими/фузінізованими компонентами (Σ FK). Під час прогнозування виходу та властивостей коксу враховується, що до реакційноздатних, когезійних компонентів відносять мацерали вітриніту, ліптиніту та приблизно 1/3 напіввітриніту, тоді як весь інертиніт та 2/3 напіввітриніту мають фузінізований (інертний) вплив на систему.

Для точного прогнозування якості коксу, крім ключових петрографічних показників, використовуються й інші характеристики вихідного вугілля/шихти. Історично, моделі першого покоління були сфокусовані на прогнозуванні показників холодної механічної міцності (наприклад, M25, стабільність за ASTM, MIKUM в Україні та СНД, DI 150/30 в Японії). Пізніші, більш досконалі моделі другого покоління використовують як ключові параметри якості показники CRI (реакційна здатність) та CSR (міцність після реакції), які краще корелюють з поведінкою коксу в доменній печі.

Важливо зазначити, що універсальні моделі прогнозування якості коксу не були розроблені, оскільки властивості вугілля з різних вугільних басейнів, країн і континентів можуть радикально відрізнятися за хімічним складом, структурою та технологічними властивостями.

В Україні, характеристики спікливості та коксування для вугільних партій та сировинної бази на коксохімічних заводах оцінюються на основі петрографічного

аналізу та кількісно визначаються за допомогою комплексу індикаторів $С_{парт}$ та $К_{парт}$, розроблених фахівцями ДП «УХІН» [27].

У наступній таблиці синтезовано вимоги до стандартних операцій у порівнянні з сучасними високоефективними великими доменними печами (об'ємом >4000 м³).

Таблиця 1.3

Ключові вимоги до якості доменного коксу та їх значення

Метрика	Стандартні вимоги для ДП	Сучасні Вимоги	Значення
CSR	> 57–60%	> 65–70%	Запобігає обваленню коксових колон у високотемпературній зоні горна. Критично важливий для забезпечення високої швидкості вдування вугілля (PCI).
CRI	< 30%	< 23–25%	Контролює швидкість газофікації коксу діоксидом вуглецю, що призводить до утворення дрібної фракції (дрібниці) в горні.
M40(Crush)	> 80%	> 85–88%	Визначає опір коксу механічному впливу під час транспортування та завантаження шихти.
M10(Abrasion)	< 7–8%	< 6.0%	Критично важливий показник, що вимірює утворення пилу та дрібної фракції, які можуть призвести до засмічення (зависання) пічного простору.

Продовження таблиці 1.3

Метрика	Стандартні вимоги для ДП	Сучасні Вимоги	Значення
ASTM Stability	> 55	> 60+	Північноамериканський стандарт, еквівалентний показникам холодної міцності.
Ash	< 12.5%	< 10.0–11.0%	Зола займає об'єм, вимагає додаткової теплової енергії для плавлення та збільшує вихід шлаку.
Sulfur	< 0.80%	< 0.60–0.65%	Безпосередньо впливає на якість чавуну; ускладнює подальше видалення сірки в сталеплавильному виробництві.
Phosphorus	< 0.05%	< 0.03%	Дуже складно видаляється в конвертері (BOF); критичний для виробництва високоякісних марок сталі.
Alkalis (K_2O+Na_2O)	< 0.30%	< 0.15–0.25%	Каталізують деградацію коксу (знижують CSR) та агресивно впливають на вогнетривку футерівку печі.
Mean Size	40–50 mm	50–55 mm	Однорідний розмір фракції створює стабільний порожній простір (пористість) для рівномірного проходження газового потоку.
Moisture	< 5%	< 3–4%	Низька вологість забезпечує стабільність теплового контролю та енергоефективність у печі.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [30]

Міцність коксу після реакції (CSR) та індекс реакційної здатності коксу (CRI) мають обернену залежність. Високоякісне коксівне вугілля (першопрофільне тверде коксівне вугілля) дає кокс з низькою реакційною здатністю (низький CRI), який зберігає свою міцність після часткової реакції (високий CSR). Показник CSR 65+ зараз є стандартною контрактною вимогою для високоякісного морського коксу. Коли CO_2 атакує кокс у шахті печі (реакція «втрати розчину»), він послаблює стінки коксових комірок. Якщо кокс занадто реакційний (високий CRI), стінки швидко стоншуються, і кокс кришиться під вагою шихти, руйнуючи проникність.

Луги (калій та натрій) є одними з найбільш шкідливих домішок. Вони рециркулюють усередині доменної печі, накопичуючись у коксі. Луги діють як каталізатор реакції втрати розчину, штучно збільшуючи CRI та руйнуючи CSR. Сучасні специфікації коксу вимагають надзвичайно низького вмісту лугу (<0,25%), щоб забезпечити його характеристики, як це випробувано в лабораторії.

Однорідність так само важлива, як і абсолютний розмір. Ідеальний діапазон: 40 мм – 80 мм. Дрібні частинки (<20 мм): Суворо обмежені (часто <5%). Дрібні частинки заповнюють порожнечі між великими частинками, перешкоджаючи потоку газу.

Великі грудки (>80 мм): Часто подрібнюються перед завантаженням, оскільки надмірно великі грудки можуть спричинити нерівномірний розподіл і зазвичай мають глибокі тріщини, що призводять до руйнування всередині печі.

Оскільки промисловість рухається до «зеленої сталі», роль коксу розвивається, але не зникає. Відновлення на основі водню зменшує загальну кількість необхідного вуглецю. Однак, оскільки в печі менше коксу, «скелет», який він утворює, має бути ще міцнішим [31]. Вимоги до проникності (CSR) можуть ще більше зрости в доменних печах з впорскуванням H_2.

Суворіші екологічні норми щодо викидів сірки (SOx) змушують виробників коксу використовувати вугілля з низьким вмістом сірки, що посилює глобальну специфікацію для коксової сірки до <0,60%.

1.7 Закономірності розподілу показників якості коксу у зв'язку з кінетикою та механізмом коксоутворення

Кінцевий кокс демонструє гетерогенний розподіл показників якості, що є прямим наслідком кінетичних шляхів та механізмів, які діють під час карбонізації та подальших високотемпературних реакцій. Початкове перетворення вугілля на кокс відбувається через чіткі послідовні стадії, кожна з яких має специфічний вплив на кінцеву якість коксу.

Початкова зона розм'якшення (375–475 °C) характеризується тим, що частинки вугілля втрачають жорсткість і набувають пластичності внаслідок десорбції полярних компонентів та зростання молекулярної рухливості. Ця стадія відбувається з мінімальним виділенням летких речовин, закладаючи основу для подальших перетворень.

Критичною є зона пластичного стану/спікання (450–550 °C). Тут реакції деструктивної дистиляції відбуваються швидко, утворюючи леткі речовини (пари смоли, гази), які захоплюються у в'язкій вугільній масі. Розподіл і вихід цих летких речовин визначають: структуру пор, оскільки гази формують бульбашки, які рухаються до меж частинок, частково виходячи, а частково залишаючись захопленими; щільність і міцність, які контролюються в'язкістю та еластичністю пластичного шару, що регулює злиття бульбашок та формування каналів для виходу газу; а також розвиток коксувального тиску, який мінімізується, коли леткі речовини виділяються у вузьких температурних діапазонах, близьких до максимальної плинності, тоді як заблоковані при нижчих температурах леткі речовини сприяють накопиченню тиску, що корелює з гетерогенністю якості [44].

Характеристики в'язкості вугілля в пластичній стадії є першочерговими; вугілля з високою в'язкістю обмежує газопроникність, змушуючи леткі речовини мігрувати до центру шихти, де вони можуть реконденсуватися та повторно виділятися при вищих температурах, викликаючи пізні піки тиску, пов'язані з нерівномірним розподілом якісних показників.

Ресолідифікація [45] та формування напівкоксу (500–600 °C). В рамках цього механізму, сплавлений шар поступово знову твердіє, перетворюючись на напівкокс у міру виснаження летких реакційноздатних компонентів. Пориста комірчаста структура, характерна для коксу, кристалізується саме на цьому етапі. Це має вирішальне значення для якості: фіналізується пористість, оскільки ущільнення повністю сплавлених структур поблизу температури ресолідифікації (близько 550 °C) спричиняє максимальне розширення трохи холодніших зон, що притискаються до більш жорсткого напівкоксу, сприяючи взаємозв'язку пор; визначається розподіл пор за розмірами, причому максимальні середні розміри пор і стінок пор досягаються у пластичній зоні, після чого відбувається переважно зменшення середнього розміру пор; і розвивається анізотропія, коли форма пор стає анізотропною, з найбільшими розмірами, вирівняними вздовж температурних ізотерм, створюючи спрямовані варіації міцності.

Дослідження, що відстежують пористість при 500 °C і 800 °C, показують, що як уявна, так і істинна щільність зростають з температурою (що свідчить про ущільнення), але розподіл пор за розмірами значно змінюється, причому небезпечне вугілля (з високим коксувальним тиском) демонструє значно більші об'єми пор у діапазоні 10 - 100 мкм при 500 °C порівняно з безпечним вугіллям [45].

Вторинне дозрівання та структурна організація (600–1000 °C). Вище 600 °C відбувається подальше дегідрування з виділенням метану та водню. Карбонові ламелі в напівкоксі безперервно збільшуються в розмірах і ступені організації. Ця стадія ініціює розвиток кристалічної вуглецевої структури, яка визначатиме подальші високотемпературні характеристики реакційної здатності.

Ключову роль у формуванні гетерогенності якості відіграють кінетика газовиділення та проникність пластичного шару. Швидкість виділення летких речовин безпосередньо впливає на якість коксу. Це виділення концентрується у специфічних температурних діапазонах: найбільш швидка еволюція відбувається у пластичній стадії (450-550 °C), повільна триває у 550-700 °C, а мінімальна — вище 700 °C.

Вирішальне значення має часовий розподіл виділення [44]: якщо він стиснений у регіон максимальної плинності (вузький температурний діапазон), гази легко виходять, утворюючи кокс з низькою пористістю та високою міцністю. Навпаки, вугілля з розширеним діапазоном газовиділення продукує леткі речовини як під час максимальної плинності, так і під час ресолідифікації, що призводить до захоплення газу та високої пористості. Вугілля низького рангу з високим вмістом летких речовин виділяє гази поступово у широких діапазонах, тоді як високорангове вугілля концентрує газовиділення у вужчі вікна.

Проникність пластичного шару для проходження газу контролює, чи керується коксоутворення:

а) Кінетичним контролем (Reaction Control), коли швидкість обмежена хімічною кінетикою розкладання (кокс відкладається рівномірно, пористість гомогенна).

б) Контролем масопереносу (Mass Transfer Control), коли швидкість обмежена дифузією попередників у пори (великі пори отримують вищі швидкості відкладення, що призводить до неоднорідної пористості). Хоча для металургійного коксу переважає кінетичний контроль, ефекти масопереносу стають важливими в регіонах обмеженої газопроникності, викликаючи гетерогенний розподіл якості, який спостерігається в системах з високим коксувальним тиском.

Вугільна петрографія є основою для прогнозування розподілу якості, оскільки вугільні мацерали мають різну коксувальну поведінку.

Вітриніт (первинний коксувальний мацерал) формує сполучну матрицю та пластичний шар, є основним чинником міцності.

Інертиніт (проблематичний компонент) виявляє мінімальну пластичність, діє як жорстке включення, обмежує розвиток пор і посилює реакційну здатність коксу (збільшення CRI).

Ліптиніт (вторинний компонент) впливає на в'язкість пластичної маси та коксувальний тиск. Наслідком є те, що показники якості є нерівномірно розподіленими, оскільки мацерали самі по собі гетерогенно розподілені у вугільних частинках. Регіони, збагачені інертинітом, виробляють кокс з вищою реакційною здатністю (CRI), нижчою міцністю після реакції (CSR) і більшою пористістю.

Мінерали вугілля мають два генетичні походження: детритові (кварц, польовий шпат), які концентруються у дискретних шарах, та аутигенні (глини, пірит), диспергувані по всій органічній речовині. Коли вміст золи у вугіллі зростає на 1 %, вміст золи у коксі зростає на 1,29 % через ефект концентрації. Вплив золи на якість є механізмозалежним.

Вплив на реакційну здатність: мінеральні компоненти каталізують газифікацію CO_2 при високій температурі. Швидкість реакційної здатності коксу (CRI) прямо пропорційна вмісту золи (CRI збільшується приблизно на 2,5 % на 1 % збільшення зольності вугілля), причому залізовмісні мінерали є найсильнішими каталізаторами.

Вплив на міцність [45]: зола має подвійний ефект — вона заповнює пори при низькій зольності (<10 %), покращуючи міцність, але створює включення при високій зольності (>12 %), зменшуючи міцність. Це створює нелінійний розподіл якості з оптимальним вікном зольності (зазвичай 8-11 %) для максимальної міцності та мінімальної реакційної здатності.

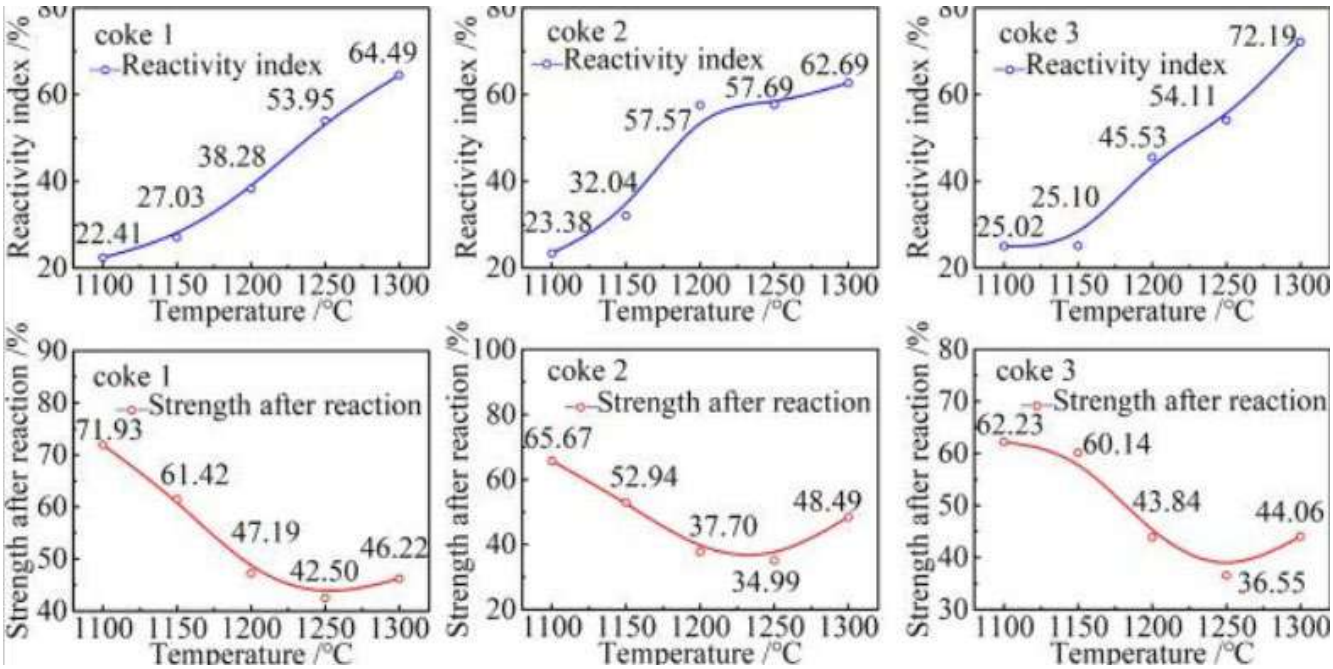


Рис. 1.3 – Вплив CO_2 та температури на відхилення від норми та міцність після реакції

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [45]

Ранг вугілля, виміряний за світловідбивною здатністю вітриніту (R_o), сильно корелює з показниками якості коксу: R_{max} (максимальна світловідбивна здатність) має сильну обернену кореляцію з CRI та пряму кореляцію з CSR. Біреflектанс (R_{bi}) має критичний поріг приблизно 4,0 %: коли $R_{bi} < 4,0$ %, CRI > CSR (низька міцність, висока реакційна здатність); коли $R_{bi} > 4,0$ %, CSR > CRI (висока міцність, низька реакційна здатність) [44].

Цей поріг вказує на структурну трансформацію. Розподіл рангів у шихті вугілля призводить до гетерогенного коксу, оскільки частини низького рангу дають високореактивний кокс, а частини високого рангу — високоміцний, що призводить до бімодальних розподілів якісних параметрів.

Після формування при 600 °C кокс зазнає глибоких змін зі зростанням температури, причому показники якості розвиваються нелінійно.

Дозрівання вуглецевої структури (в доменній печі при 1100-1500 °C) супроводжується лінійним зростанням висоти шарування кристалітів вуглецю (L_c),

що підвищує механічну міцність, але може спочатку підвищити реакційну здатність.

Реакційна здатність (CRI) в атмосфері CO_2 має складну температурну залежність, досягаючи максимальної швидкості зростання при 1250 °C. Міцність після реакції (CSR) демонструє немонотонну залежність з мінімумом приблизно при 1250 °C (що вказує на максимальну слабкість), після чого починає відновлюватися. Ця закономірність відображає конкурентні механізми: термічний стрес, газифікація CO_2 та відпал, який покращує кристалічність [45].

Зі зростанням температури від 1100 °C до 1500 °C кількість пор збільшується (через термічний стрес, що створює мікротріщини), тоді як їхня округлість зростає (термічно-зумовлене розслаблення концентрації напружень). Висока міцність коксу корелює з мінімальною кількістю пор, низькою пористістю та низькою округлістю пор (кутові форми пор). Це свідчить про глибокий вплив термічної історії.

Аналіз енергії активації (E_a) [45] під час горіння коксу виявляє двостадійний реакційний механізм. Секція низьких температур (633-809 °C) контролюється хімічною реакцією (з E_a = 250-266 кДж/моль), тоді як секція високих температур (709-988 °C) має набагато нижчу E_a = 72-150 кДж/моль}, що вказує на перехід до дифузійно-контрольованого горіння (де лімітуючим стає транспорт кисню). Реакційні відмінності між типами коксу (наприклад, високореакційний кокс має нижчі E_a) походять від складу вугілля та умов коксування.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Порівняння якісних показників коксу та теоретичне обґрунтування розподілу властивостей

Металургійний кокс є важливою сировиною в чорній металургії. Залежно від розміру частинок, металургійний кокс використовується на різних стадіях процесу. Кокс розміром від 25 мм є основною формою для доменних печей; так званий горіховий кокс додається при виробництві чавуну з шарами заліза та флюсу від 10 до 25 мм, а коксовий дріб вважається джерелом енергії для спікання або огрудкування з розміром частинок менше 10 мм [4]. Відповідний вибір коксу покращує виробничу лінію сталі, економить на коксі, мінімізує утворення пилу, зменшує значну кількість викидів парникових газів в атмосферу, а саме CO_2, SO_2 та NO_x, а також оптимізує споживання енергії [5, 6, 7]. Хімічний склад, механічна міцність, термостійкість та розмір частинок є найважливішими параметрами для вибору металургійного коксу [6]. Однак розмір та форма частинок коксу відіграють важливу роль у доменних печах та агломераційних заводах. Середній розмір частинок коксу визначає опір потоку рідини, ефективність проходження висхідних газів та низхідних металевих рідин, а також швидкість виробництва заліза. Формування та проникність коксового шару також тісно пов'язані з розміром частинок та поведінкою горіння в процесі спікання.

Надмірно великий кокс із розміром шматків > 80 мм зазвичай відрізняється низькою термічною стійкістю. Через високі локальні напруження такий кокс схильний до подрібнення Дрібний кокс, шматки якого мають велику площу поверхні, більш схильний до втрати вуглецю за реакції газифікації і, відповідно, до подрібнення, тому для коксу з більш високою реакційною здатністю нижня межа крупності доводиться підтримувати більш високим, зонах печі [8].

Здатність коксу зберігати необхідну крупність при опусканні шихти в печі залежить від його міцності. Руйнування коксу через низьку міцність призводить не тільки до зменшення середнього розміру шматків, але і до утворення дрібязку. Оскільки цей дріб’язок міститься у вільних проміжках в коксовому шарі, в ньому можливе різке збільшення перепаду тиску. Цей перепад тиску здатний вплинути на газодинамічний режим печі, досягти порога. Коксовий дріб’язок, утворений при руйнуванні коксу, може накопичуватися і призводити до значного забиття пор. Результатом може стати псевдозрідження дріб’язку і виникнення канального ходу через високу швидкість газу.

У зоні краплеутворення крізь коксовий каркас стікають рідкі шлак і метал і протікає висхідний потік високотемпературного газу. Висока питома поверхня коксу і/або зниження пористості можуть стати причиною утримання рідини і затоплення шару, утруднення протитечії матеріалів і таким чином перешкоджати. У зоні горіння кокс у вигляді дрібних частинок зміщує зону циркуляції у бік стінки печі, так як дрібний кокс має більш високу реакційну здатність. Коксовий дріб’язок схильний до осадження в пухкому малорухомому шарі за кордоном зони циркуляції і стає серйозною перешкодою для формування зони циркуляції.

Ці два фактори призводять до посилення газового потоку біля стін печі, що супроводжується більшою витратою коксу. У горні печі коксовий дріб’язок здатний істотно знижувати рухливість рідкого шлаку і металу, підвищуючи їх в'язкість, а також зменшуючи обсяг пор у коксі. Це явище, відоме як «брудний» або «засмічений» горн, що є причиною поганого поділу шлаку і металу, слабкого теплообміну в горні, нестабільного складу чавуну та інших порушень ходу плавки.

Велике значення завжди надавали ефективному відсіву дріб’язку на доменних печах. Отвори гуркоту зазвичай мали розмір 20-25 мм, але на деяких заводах розмір збільшили до 33-40 мм і повідомляли про позитивний вплив цього заходу на показники роботи печі [9].

2.2 Вплив на механічну міцність коксу

Механічна міцність коксу, що вимірюється індексами M40 (стійкість до фрагментації) та M10 (стійкість до стирання), залежить від розподілу розмірів вугілля та властивостей використовуваних вугільних фракцій. Менші (тонші) частинки вугілля зазвичай підвищують реакційну здатність коксу та, як правило, знижують параметри механічної міцності, але цей вплив значною мірою залежить від властивостей доданої фракції (наприклад, вміст летких речовин, золи та рівня кисню). Вибір відповідного класу розміру частинок та типу вугілля покращує міцність коксу та придатність для промислового використання.

Дослідження демонструють зв'язок між зменшенням розміру частинок складового матеріалу, що призводить до значно вищої механічної міцності отриманого консолідованого продукту, такого як брикети або композитні зразки. Це покращення значною мірою залежить від досягнення дрібнішої фракції вугілля, зазвичай <45 мкм або в діапазоні 45–63 мкм, що принципово змінює структурні характеристики матеріалу [10].

Основний механізм включає досягнення вищої загальної щільності та когезії в масі. Зі зменшенням розміру частинок питома площа поверхні матеріалу різко збільшується. Ця збільшена площа поверхні є критично важливою, оскільки вона забезпечує набагато більшу кількість потенційних місць зв'язку на межі розділу частинок [11]. Посилення взаємодії між частинками ефективно консолідують масу, що призводить до набагато міцнішого кінцевого продукту та зменшення пористості. Крім того, використовуючи менші зразки та дрібніші фракції, вплив природних площин дефектів або щілин, які є вже існуючими точками слабкості у більших частинках, мінімізується. Отже, ці дрібніші, однорідніші зразки мають менше внутрішніх тріщин, що призводить до вищої міцності на стиск та механічної стійкості. Отримані зразки часто є більш крихкими, але ця характеристика також дозволяє вимірюванню точніше виявити внутрішню міцність самого матеріалу

(наприклад, вугілля), яка не приховується значними внутрішніми структурними дефектами [12].

Поєднання підвищеної ефективності упаковки, вищої щільності, зменшеної пористості та максимізованих місць міжзернового зв'язку є основою для покращення механічних характеристик, що спостерігаються при використанні дрібніших фракцій матеріалу.

Механічна міцність вугілля збільшується зі зменшенням розміру частинок, головним чином завдяки покращеному зв'язку, зменшенню пористості та зниженню частоти внутрішніх тріщин.

Зразки вугілля з великими/крупнішими частинками мають більше дефектів, тому вони слабші при механічних випробуваннях. Оптимізація розміру частинок вугілля для конкретних промислових застосувань (брикетування, коксування, спалювання) вимагає балансування щодо покращення механічних властивостей з потенційними недоліками в обробці та реакційній здатності [10, 11, 12].

Точне налаштування розміру частинок вугілля є важливим для максимізації його механічних характеристик та експлуатаційної стійкості в різних промислових умовах.

2.3 Реакційна здатність (CRI) та індекс післяреакційної міцності (CSR)

Індекс реакційної здатності коксу (CRI) вимірює відсоткову втрату ваги при нагріванні зразка коксу при 1100°C в чистій атмосфері CO_2 протягом 2 годин. Це відображає схильність коксу до реакцій газифікації. Міцність коксу після реакції (CSR) визначається шляхом барабанного обертання прореагованого коксу в I-подібному барабані протягом 600 обертів та вимірювання відсотка матеріалу, що залишається на сітці 10 мм, що вказує на здатність коксу протистояти руйнуванню та зберігати структурну цілісність після хімічної реакції [13].

Великий кокс (>50 мм). Великі шматки коксу демонструють низьку реакційну здатність зі значеннями CRI зазвичай у діапазоні 20,5%, у поєднанні з високою міцністю після реакції зі значеннями CSR близько 70%. Ці шматки зазнають мінімальної втрати ваги (приблизно 12%) під час газифікації, оскільки більші розміри частинок обмежують дифузію CO_2 всередину, що робить реакцію переважно поверхневою. Товстіша структура та менш розвинена мережа пор забезпечують кращу механічну міцність після хімічної атаки. У промислових операціях більші шматки можуть потрапляти глибше в доменну піч до того, як відбудеться значна деградація, що сприяє кращому підтримці проникності в нижніх областях [14].

Середній кокс (25-50 мм). Шматки середнього розміру представляють стандартний розмір частинок для випробувань (19-21 мм), який використовується в промисловій процедурі випробування CRI/CSR [14]. Ці шматки зазвичай демонструють помірну реакційну здатність зі значеннями CRI близько 24% та помірну міцність після реакції зі значеннями CSR близько 65%. Втрата ваги під час газифікації в середньому становить близько 25%, що представляє збалансовану проміжну поведінку між великими та малими частинками. Цей клас розміру є найчастіше використовуваним у доменних операціях і представляє рівновагу між реакційною здатністю та вимогами до міцності для експлуатаційної ефективності.

Дрібний кокс (<10 мм). Дрібні шматки коксу демонструють високу реакційну здатність зі значеннями CRI близько 28,5% у поєднанні зі значним зниженням міцності після реакції зі значеннями CSR приблизно 48%. Ці частинки зазнають втрати ваги приблизно на 42% під час газифікації, зазнаючи набагато більшої хімічної деградації. Високе співвідношення площі поверхні до об'єму та більша доступність CO_2 до внутрішніх пор призводять до рівномірної газифікації по всій матриці частинок, а не до реакції, обмеженої поверхнею [15]. Це призводить до суттєвого ослаблення та підвищеної схильності до фрагментації. У доменній печі

надмірно дрібні частинки погіршують проникність та викликають експлуатаційні проблеми, включаючи зниження розподілу газу та проблеми з дренажем.

Дрібнодисперсний коксовий порошок (<1 мм). Ультрадрібний коксовий порошок демонструє дуже високу реакційну здатність зі значеннями CRI, що досягають 45%, та надзвичайно низьку міцність після реакції зі значеннями CSR до 15%. Ці частинки зазнають втрати ваги, що перевищує 65%, і в основному використовуються в дослідницьких застосуваннях, а не в промисловій практиці, оскільки вони не відображають фактичну поведінку коксу доменної печі [15].

Залежність розміру частинок та індексу реакційної здатності коксу (CRI), міцності коксу після реакції (CSR) зображені на рис.2.1.

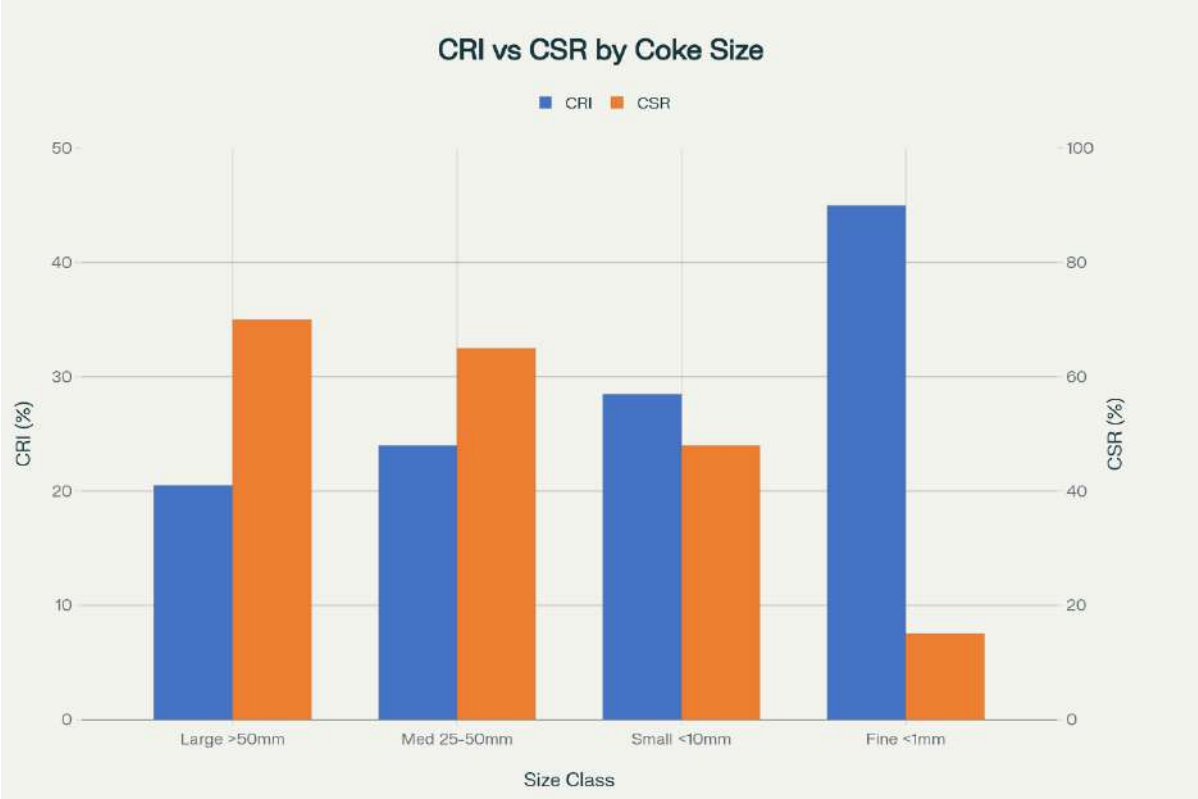


Рисунок 2.1 – Зворотна залежність між індексом реакційної здатності коксу (CRI) та міцністю коксу після реакції (CSR) для різних класів розміру частинок

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [14,15]

Дослідження з використанням відстеження окремих частинок виявляє критичну гетерогенність реакційної здатності в межах одного зразка коксу під час випробувань. Шматки коксу, розташовані в нижньому шарі (безпосередньо піддаються впливу чистого CO_2), втрачають масу приблизно на 47,29%, тоді як ті, що у верхньому шарі (під впливом газу, збагаченого CO, з реакцій нижче), втрачають масу лише на 13,85%. Ця різниця в 33,44 відсоткових пункти демонструє, що ефекти каналування газу та локальні градієнти концентрації CO_2 суттєво впливають на реакційну здатність окремих шматків. Два нижні шари постійно зазнають найбільшого зниження, зі значеннями CRI в діапазоні 35-50% для цих положень, тоді як верхні шари показують значення нижче 20% [13].

Дані показують фундаментальну обернену залежність між реакційною здатністю та пост-реакційною міцністю: вищі значення CRI корелюють з нижчими значеннями CSR. Це відбувається тому, що значна втрата ваги внаслідок газифікації CO_2 принципово послаблює коксову матрицю, незалежно від початкової якості [13]. Деградація впливає на:

– розширення пористої структури всередині вуглецевої матриці;

– стоншення клітинної стінки та збільшення пористості;

– утворення тріщин у точках концентрації напружень;

– зниження механічної міцності при стискаючих та абразивних напруженнях.

У доменній печі розподіл коксу за розмірами відіграє вирішальну роль: оптимальним вважається кокс, що містить понад 85% частинок розміром більше 40 мм, тоді як частинки розміром менше 25 мм становлять лише 4,54% коксу належного розміру. Під час роботи печі розмір коксу значно зменшується — на 43-63% до рівня поду — при цьому відсоток дрібних частинок (<10 мм) коливається від 20 до 49% залежно від умов печі. Менші частинки, що утворюються внаслідок механічного та хімічного розкладання, погіршують газопроникність, а проникність створює експлуатаційні обмеження.

Використання стандартизованих частинок розміром 19-21 мм у тесті CRI забезпечує відтворюваність, але може не повністю відображати поведінку розподілених за розміром популяцій коксу в реальних доменних печах [16]. Крім того, дослідження показують, що широко використовуваний тест CRI за 100% CO_2 не точно прогнозує реакційну здатність коксу в реальних умовах доменної печі, де присутні водень (H_2) та водяна пара (H_2O), що значно збільшує швидкість газифікації.

2.4 Методологія визначення розподілу розмірів частинок коксу та статистична обробка даних

Розподіл розмірів частинок (РРЧ) [32] є однією з найважливіших фізичних характеристик коксу, що безпосередньо впливає на його технологічні властивості та економічну цінність у металургії, електродній промисловості та інших сферах. Точне визначення РРЧ має вирішальне значення для контролю якості та оптимізації процесів.

Хоча для дуже дрібних порошків застосовуються такі методи, як лазерна дифракція або седиментаційний аналіз, для відносно великих та грубих матеріалів, таких як кокс, ситовий аналіз залишається основним, найбільш стандартизованим та практичним методом.

Ситовий аналіз — це гравіметричний метод поділу матеріалу на фракції за розміром шляхом послідовного просіювання через сита зі стандартними та каліброваними розмірами отворів.

Систематичне та відтворюване визначення РРЧ коксу забезпечується суворим дотриманням міжнародних та національних стандартів. Основними нормативними документами, що регулюють ситовий аналіз коксу, є [32]:

- ASTM D5709 (Standard Test Method for Sieve Analysis of Petroleum Coke): Цей стандарт переважно використовується для нафтового коксу та охоплює

широкий діапазон розмірів частинок, типово від 75 мкм до 75 мм. Він деталізує вимоги до обладнання, підготовки зразка та процедури просіювання.

– ISO 12984 (Coke — Determination of the distribution of particle size): Застосовується, зокрема, для кальцинованого коксу. Діапазон застосування цього стандарту зазвичай встановлюється для розмірів частинок від 0,25 мм до 16 мм.

Відповідно до цих стандартів, усі сита повинні відповідати специфікаціям, наприклад, ASTM E11 або ISO 3310-1 (Технічні вимоги та перевірка сит). Це забезпечує точність розмірів отворів (зазвичай, квадратних) і мінімізує похибки, пов'язані з невідповідністю сит.

Процедура ситового аналізу потребує ретельної підготовки зразка та обладнання.

Підготовка зразка [33]. Відбір репрезентативного зразка коксу є критичним. Згідно зі стандартами, мінімальна маса випробувального зразка (навіска) безпосередньо залежить від максимального номінального розміру частинок у партії. Наприклад, для коксу з максимальним розміром 75 мм може знадобитися зразок масою до 34 кг або більше, щоб забезпечити, що відібраний зразок містить пропорційну кількість найбільших частинок.

Зразок повинен бути висушений до постійної маси (зазвичай при температурі 105±5 °C), щоб виключити вплив вологи, яка може спричинити злипання частинок, а також, щоб кокс був у сипучому стані.

Процес просіювання. Використовується набір (стопка) стандартних сит, розташованих у порядку зменшення розміру отворів зверху донизу. Найбільше сито розміщується нагорі, а під найменшим ситом розташовується піддон (палета) для збору найдрібніших частинок (фракція < нижній розмір сита) [33]. Зазвичай використовується не більше 8 сит для стандартного аналізу.

Зразок поміщається на верхнє сито. Стопка сит встановлюється на механічний вібратор (ситовий струшувач) та піддається вібрації та обертанню протягом стандартизованого часу (зазвичай 5-10 хвилин).

Просіювання продовжується до моменту, коли маса матеріалу, що проходить через будь-яке сито за певний проміжок часу (наприклад, 1 хвилина), стає меншою за встановлений відсоток від загальної маси зразка (наприклад, 0,1 %), або ж матеріал на кожному ситі стабілізується.

Зважування та баланс маси. Після завершення просіювання матеріал, що затримався на кожному ситі, а також матеріал у піддоні, ретельно збирають і точно зважують.

Сума мас усіх отриманих фракцій (залишків на ситах + піддон) порівнюється з початковою масою випробувального зразка. Відхилення (втрата або приріст маси) повинно бути в межах встановленого допуску, який зазвичай становить ±1 % або ±0,3 % від початкової маси, залежно від стандарту. Недотримання балансу вказує на похибку процедури (наприклад, неповне просіювання або втрата матеріалу)[34].

Результати ситового аналізу представляють дискретний розподіл мас. Основне завдання статистичної обробки — перетворити ці дискретні дані на безперервну криву розподілу та виділити ключові параметри, що характеризують властивості коксу.

Обробка починається з обчислення кумулятивних відсотків проходу або залишку, що дозволяє графічно представити РРЧ [35].

1. Відсоток залишку на ситі (Масова частка, R_i):

$$R_i = \frac{M_i}{M_{заг}} \cdot 100\ \%\ , \qquad (2.4.1)$$

де $M_{заг}$ — початкова загальна маса зразка.

Сукупний залишок на ситі (Кумулятивний відсоток, що залишився, $C_{залиш,\ i}$): Відсоток матеріалу, більшого за розмір і-го сита. Це сума R_k для всіх сит від найбільшого до і-го.

$$C_{залиш,i} = \sum_{k=1}^{i} R_k \qquad (2.4.2)$$

Кумулятивний Прохід ($C_{прох}$): Цей параметр є найбільш інформативним. Його розраховують для верхнього розміру отвору (діаметра) кожного сита. $C_{прох,i}$ показує відсотковий вміст у зразку частинок, розмір яких менший за діаметр і-го сита (d_i).

$$C_{прох,\ i} = 100\% - C_{залиш,I} \quad (2.4.3)$$

2. Побудова Кривої. Криву будують, відкладаючи кумулятивний відсоток проходу $C_{прох}$ по осі ординат (Y) та відповідний розмір сита d по осі абсцис (X). Вісь X часто зображують у логарифмічному масштабі, щоб краще відобразити широкий діапазон розмірів.

Аналіз кривої кумулятивного розподілу дозволяє визначити критичні параметри, які є основою для контролю якості та інженерних розрахунків.

Медіанний розмір частинок (d_{50}): Це розмір частинок, для якого $C_{прох}$ становить 50 %. Іншими словами, половина маси зразка складається з частинок, менших за d_{50}, а інша половина — більших. Це найпоширеніший показник "середнього" розміру.

Інші Квантилі (d_{10}, d_{90}): Визначають розміри, відповідні 10 % та 90 % кумулятивного проходу.

d_{10} (тонкий кінець): 10 % маси зразка складають частинки, менші за цей розмір.

d_{90} (грубий кінець): 90 % маси зразка складають частинки, менші за цей розмір.

Для оцінки ширини або однорідності РРЧ використовують коефіцієнт однорідності та діапазон розподілу.

Коефіцієнт однорідності (Uniformity Index, U). Чим ближче U до одиниці, тим більш однорідним (монодисперсним) є матеріал, тобто частинки мають близькі розміри. Велике значення U вказує на широкий (полідисперсний) діапазон розмірів.

Діапазон Розподілу (Span). Span є відносним показником дисперсності. Чим менше значення Span, тим вужчий розподіл розмірів.

Незважаючи на стандартизацію та практичність, ситовий аналіз має певні обмеження, які важливо враховувати [34].

Низька роздільна здатність. Стандартний ситовий аналіз з обмеженою кількістю сит (зазвичай до 8) генерує лише обмежену кількість точок даних (8 точок) для представлення всього розподілу. Це призводить до усереднення в межах фракцій і може не відображати тонкі особливості розподілу.

Визначення за найменшим розміром**.** Ситовий аналіз фактично класифікує частинки не за їхнім об'ємом, а за другим найменшим лінійним розміром (розмір, який визначає здатність частинки пройти через квадратний отвір). Форма частинок, яка є нерівномірною для коксу, може впливати на результат, оскільки видовжені частинки можуть проходити, а компактніші, але з більшою масою, затримуватися.

Ефект перевантаження. Неправильний вибір маси зразка (занадто велика навіска) може призвести до «забивання» сит, що порушує ефективність просіювання та спричиняє неточності. Стандарти чітко обмежують максимальну масу залишку на ситі.

2.5 Лазерна дифракція та аналіз зображень для аналізу коксу

Лазерна дифракція (ЛД) та аналіз зображень (АЗ), зокрема динамічний аналіз зображень (ДАН), являють собою передові оптичні методи визначення розподілу розмірів частинок коксу та їх морфології. Ці методи долають обмеження традиційного ситового аналізу, забезпечуючи детальну та швидку характеристику систем частинок, одночасно фіксуючи морфологічну інформацію, неможливу за допомогою традиційних методів [36].

Лазерна дифракція вимірює розмір частинок, аналізуючи кутову картину інтенсивності світла, розсіяного, коли лазерний промінь проходить через диспергований зразок частинок [37]. Фундаментальний принцип базується на взаємозв'язку між розміром частинок та кутом розсіювання: великі частинки

розсіюють світло під малими кутами відносно лазерного променя, тоді як менші частинки розсіюють світло під більшими кутами.

Інтенсивність розсіяного світла аналізується за допомогою теорії M_i або наближення Фраунгофера [37], залежно від розміру частинок та оптичних властивостей. Теорія M_i застосовується до всіх розмірів частинок, але вимагає знання показника заломлення як частинок, так і дисперсійного середовища. Наближення Фраунгофера застосовується до частинок, значно більших за довжину хвилі лазера (зазвичай >50 мкм), і не вимагає знання показника заломлення, але припускає, що частинки викликають лише дифракцію без заломлення чи відбиття.

Лазерні дифракційні прилади зазвичай охоплюють широкий динамічний діапазон від 0,1 мкм до 3 мм, а спеціальні прилади розширюють вимірювання до 4 мм. У практичному застосуванні для таких матеріалів, як кокс, ефективний діапазон становить від 30 нм до 1000 мкм, що відповідає коефіцієнту вимірювання 400 000 між найменшими та найбільшими частинками.

Час вимірювання надзвичайно короткий. Вологі вимірювання: 1-2 хвилини (включаючи дисперсію, холосте вимірювання, введення зразка, збір даних та автоматичне очищення). Сухі вимірювання: 10-40 секунд залежно від кількості циклів очищення.

Лазерна дифракція створює розподіл розмірів частинок (PSD) на основі об'єму, повідомляючи розмір частинок як діаметр еквівалентних сфер, які б генерували спостережувану картину розсіювання. Розподіл виражається у відсотках об'єму в межах певних діапазонів розмірів, зазвичай представлених графічно з розміром частинок на осі x та кумулятивним або диференціальним відсотком об'єму на осі y [38].

Звичайні вихідні параметри включають [39]:

– D_{10}, D_{50}, D_{90}: Кумулятивні процентилі розподілу, де нижній індекс вказує на відсоток зразка меншого за цей розмір;

– Діапазон: Розраховується як (D_{90} - D_{10}) / D_{50}, характеризуючи ширину розподілу;

– Середній діаметр: Середній розмір частинок;

– Мода: Найчастіше зустрічається розмір;

– D: Середнє значення моменту площі поверхні (підкреслює дрібні частинки);

– D: Середнє значення моменту об'єму (підкреслює грубі частинки);

– Застосування до аналізу коксу.

Для подрібнених та дрібних частинок коксу лазерна дифракція забезпечує швидкий аналіз. Дослідження нафтового коксу показують, що результати лазерної дифракції можна підтвердити спостереженнями скануючої електронної мікроскопії, хоча слід бути обережним щодо проблем агломерації під час вимірювання. Метод успішно вимірює тенденції параметра D_{50} зі збільшенням часу подрібнення та виявляє вплив швидкості подрібнення на зменшення розміру частинок.

Конфігурації вимірювання для коксу включають вологі та сухі вимірювання.

Вологі вимірювання: Суспензія в ізопропіловому спирті (IPA), воді або інших придатних рідинах

Сухі вимірювання: Дисперсія повітряним струменем з використанням стисненого повітря (для частинок >1 мкм)

Критичним обмеженням лазерної дифракції є припущення про сферичну геометрію частинок [40]. Для несферичних частинок, таких як кутасті фрагменти коксу, це припущення вносить значні похибки. Частинки неправильної форми з високими співвідношеннями сторін викликають широкий розподіл розмірів, оскільки як довжина, так і ширина частинок враховуються як окремі вимірювання розміру.

Наприклад, еліпсоїдальні частинки фіксуються з розмірами, систематично меншими за їхні фізичні основні розміри, а коли несферичні частинки вирівнюються в межах поточного зразка, лазерні дифракційні прилади можуть повідомляти про бімодальні розподіли навіть для монодисперсних зразків. Крім того, лазерна дифракція може не виявити надмірно великі частинки, присутні у зразку, оскільки недостатньо великі частинки у змішаних зразках можуть призвести до насичення детектора або пропускання світла нижче 20%, що призводить до переоцінки малих частинок та недооцінки великих частинок [41].

Динамічний аналіз зображень фіксує зображення окремих частинок у режимі реального часу, коли вони падають або протікають через поле вимірювання в контрольованих умовах. На відміну від статичного аналізу зображень та традиційної світлової оптичної мікроскопії, DIA має три ключові відмінності: частинки залишаються в безперервному русі з регулярним обміном, частинки випадковим чином орієнтовані до камери, а виявлення та аналіз повністю автоматизовані [36].

Зображення частинок записуються у вигляді тіньових проекцій та аналізуються в режимі реального часу за допомогою систем камер високої роздільної здатності. Сімейство CAMSIZER використовує систему з двома камерами [38,42]:

Камера ZOOM: Спеціалізована для аналізу дрібних частинок з найвищою точністю

Камера BASIC: Виявляє більші частинки з чудовою статистикою

Спеціалізований алгоритм поєднує інформацію з обох камер, щоб забезпечити точний розподіл розмірів у всьому діапазоні вимірювань без налаштування обладнання або зміни об'єктивів.

CAMSIZER P4 (стандарт для сипучого коксу): від 20 мкм до 30 мм для сипучих, сипких матеріалів. Зокрема, зазначено, що підходить для аналізу

нафтового коксу, а застосування детально описано в спеціальних примітках до застосування для характеристики грубозернистого коксу.

CAMSIZER X2 (для дрібних матеріалів): від 0,8 мкм до 8 мм для порошкоподібних матеріалів, зокрема, зазначено, що підходить для подрібненого вугілля, коксу, графіту та активованого вугілля.

CAMSIZER 3D (розширена морфологія): Розширене поле зору та велика відстань падіння дозволяють аналізувати кожну частинку до 30 разів у різних орієнтаціях, забезпечуючи справжню тривимірну морфологію частинок, а не двовимірні проекції.

Динамічний аналіз зображень (Dynamic Image Analysis, DIA) створює розподіл розмірів частинок на основі чисел, тобто розподіл відображає кількість окремих частинок у кожному діапазоні розмірів. Метод видає низку детальних параметрів, які можна розділити на розмірні та морфологічні. До параметрів розміру належать: D_{10}, D_{50}, D_{90} (перцентильні значення з числового розподілу, де D_{50} – медіана розмірів за кількістю); Середній діаметр (як арифметичне або геометричне середнє); Кількість частинок у зразку; Питома площа поверхні; Оцінка щільності частинок та Аналіз прозорості. Унікальними для DIA є морфологічні параметри, що описують форму: Сферичність (ψ) – відхилення від ідеальної сферичної форми; Співвідношення сторін – співвідношення довжини до ширини (або товщини до довжини в 3D-режимі); Видовження – характеристика голкоподібних або волокнистих частинок; Круглість – округлість контуру частинок у 2D-проекції; Форм-фактор – загальна міра компактності; Співвідношення еліпса – класифікація витягнутих та компактних частинок; та Шорсткість – характеристика текстури поверхні.

CAMSIZER 3D забезпечує покращений 3D-аналіз, де співвідношення сторін, виміряні в тривимірному просторі, менші та розподілені вужче, ніж 2D-проекції, що забезпечує точніше представлення справжня морфологія частинок.

Динамічний аналіз зображень чудово характеризує несферичні частинки шляхом прямого вимірювання проекцій окремих частинок, а не за допомогою алгоритмів, заснованих на розсіюванні світла. Оскільки частинки орієнтовані випадковим чином та вимірюються в русі, метод фіксує репрезентативні морфологічні дані без інтерпретації, що залежить від користувача.

Для частинок коксу (за своєю суттю неправильної та кутастої форми) DIA забезпечує виявлення морфологічних деталей з високою роздільною здатністю. Метод надійно ідентифікує дефекти частинок, агломерати та варіації форми. Наприклад, каталізатори з розбитими сферами легко ідентифікуються за допомогою аналізу співвідношення сторін (значення <0,95 вказують на розбиття), тоді як суміші різних типів частинок можна кількісно визначити на основі їх чітких характеристик форми.

Вузька дисперсія результатів повторних експериментів вказує на те, що розподіл розмірів частинок, отриманий за допомогою DIA, досягає високої надійності. Аналізуючи від сотень тисяч до мільйонів окремих частинок під час одного вимірювання (залежно від щільності та розміру зразка), DIA забезпечує надійну статистичну якість, що перевершує методи на основі вибірки. Час вимірювання для повної характеристики розміру та форми коливається від 2 до 5 хвилин, а для безперервного моніторингу виробництва доступні онлайн-версії [43].

Для сферичних частинок результати лазерної дифракції та аналізу зображень добре узгоджуються та близько відповідають ситовому аналізу. Однак для несферичних частинок, таких як кокс лазерна дифракція зміщує результати в бік більших розмірів частинок через вимірювання об'ємно-еквівалентних діаметрів асферичних форм.

Ситовий аналіз дає ширші розподіли, оскільки частинки проходять через сита вздовж їхньої мінімальної площі поперечного перерізу.

Аналіз зображень забезпечує найточніше представлення фактичних розмірів частинок незалежно від припущень щодо форми.

У практичних дослідженнях, при порівнянні вимірювань кавового порошку, лазерна дифракція (помаранчевий), динамічний аналіз зображень (червоний/зелений/синій) та ситовий аналіз (чорний) показують вимірювані відмінності, що пояснюються впливом форми частинок.

Для аналізу коксу за допомогою лазерної дифракції можуть виникнути проблеми агломерації під час вимірювання розміру частинок, особливо для дрібноподрібненого коксу. Дрібні частинки мають тенденцію до скупчення, штучно збільшуючи видимий розмір частинок. Аналіз зображень дозволяє уникнути цього обмеження, безпосередньо спостерігаючи окремі проекції частинок, а не покладаючись на оптичні картини розсіювання.

Комбінований підхід для комплексної характеристики. Нещодавня методологія наголошує на поєднанні лазерної дифракції та динамічного аналізу зображень для отримання додаткової інформації.

Платформи SYNC та CAMSIZER можуть одночасно виконувати вимірювання лазерної дифракції та динамічний аналіз зображень в одному й тому ж тракті потоку, використовуючи ту саму комірку для зразків та вимірюючи ті самі частинки. Результати демонструють чудову узгодженість для сферичних/регулярних частинок, водночас виявляючи відмінності у розмірах для несферичних матеріалів [42].

Результати розподілу розмірів частинок зазвичай повідомляються з використанням стандартизованих параметрів, визначених у ISO 9276-1 та ISO 9276-2. Розподіли на основі чисел (з DIA) можна перетворити на розподіли на основі об'єму (порівнянні з LD) за допомогою встановлених математичних моделей, хоча перетворення вводить припущення та потенційні систематичні зміщення. І навпаки, дані LD на основі об'єму не можна надійно перетворити на морфологічні параметри, отримані безпосередньо за допомогою аналізу зображень [36].

Аналізуючи різні методи було розроблено таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняння ситового аналізу з альтернативними методами

Характеристика	Ситовий Аналіз (Sieve Analysis)	Лазерна Дифракція (Laser Diffraction, LD)	Аналіз Зображення (Image Analysis, IA)
Принцип	Розділення за найменшим розміром січення (2D) у полі гравітації.	Вимірювання кута розсіювання світла (Фраунгофера/Мі) частинками.	Пряме вимірювання геометричних параметрів частинок на зображенні.
Діапазон розмірів	Від 75 мкм до 75 мм. Обмежений для дуже дрібних частинок.	Від 0,1 мкм до 3,5 мм. Ідеально для тонких порошків.	Від 1 мкм до 10 мм (залежить від оптики).
Одиниця вимірювання	Масовий розподіл.	Об'ємний розподіл.	Числовий розподіл (перетворюється на об'ємний/масовий).
Переваги	Надійність, стандартизованість (ASTM, ISO), простота, економічність.	Висока швидкість, висока роздільна здатність (тисячі точок), можливість автоматизації.	Пряме вимірювання форми, висока роздільна здатність, менша залежність від сферичності.
Недоліки	Низька роздільна здатність (8-10 точок), залежність від форми, повільність, рутинні похибки.	Потребує диспергування (у рідині або повітрі), чутливий до показника заломлення.	Висока вартість обладнання, чутливий до якості зображення та статистики.
Застосування для коксу	Основний метод для контролю поставок та великогабаритного коксу.	Для пилу та дуже дрібних фракцій коксу (наприклад, утилізація шламів).	Для точного вивчення форми та крихкості частинок коксу.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [36 - 43]

2.6 Обґрунтування та вибір обладнання для технології дроблення великогабаритного коксу

Практика дроблення великогабаритного коксу перед його завантаженням у доменну піч є технологічно обґрунтованою і критично необхідною для забезпечення стабільної та ефективної роботи агрегату. Надходження великих фракцій коксу, особливо тих, що перевищують регламентований верхній поріг (зазвичай >60 мм), спричиняє низку значних експлуатаційних проблем, які негативно впливають на основні металургійні та економічні показники.

Найважливішою проблемою є погіршення проникності шихти доменної печі. Коли великі частинки коксу завантажуються в піч, пустоти (фракція пустот) стають нерівномірними та недостатніми для оптимального потоку газу. Це призводить до прориву відновлювальних газів та поганого контакту газу з твердою речовиною, що безпосередньо знижує ефективність використання відновлювальних газів та тепла. Дослідження показали, що збільшення розміру коксу безпосередньо корелює з погіршенням ефективності реакції та теплообміну. Зокрема, ефективність реакції та ефективність теплообміну знижуються приблизно на 0,2% та 3% відповідно на кожні 1 мм збільшення розміру коксу [17, 18].

Вплив великого розміру коксу на коефіцієнт відновлювача (RAR) є кількісно вимірним та значним. Чисельний аналіз показує, що збільшення середнього розміру коксу на 1 мм призводить до збільшення RAR приблизно на 1 кг/тонну гарячого металу. І навпаки, коли розмір коксу належним чином контролюється та оптимізується, покращення розміру коксу на 5 мм може зменшити коефіцієнт палива на вимірні величини. Це створює прямий економічний стимул для подрібнення великого коксу для підтримки постійного, помірного розміру [17].

У зоні поду (deadman) частинки коксу зазнають суттєвої деградації під час експлуатації. Промислові аналізи доменних печей показують, що розмір коксу

зменшується на 36-63% порівняно з завантаженим розміром, при цьому кінцевий середній розмір коксу в deadman коливається від 20 до 33 мм. Однак ця деградація не є рівномірною, і початкове збільшення розміру може призвести до надмірного утворення дрібних частинок з більшою швидкістю, ніж оптимально. Порожнистість у зоні коксування, яка є критично важливою для дренажу розплавленого заліза та проникності шлаку, значно залежить від початкового розподілу розмірів коксу. Неправильний розподіл розмірів створює зони з низьким вмістом порожнистості (до 10,7% на краях зон коксування), що перешкоджає потоку розплавленого матеріалу та збільшує час дренажу [19, 20].

Великі шматки коксу сприяють підвищенню тиску коксування під час роботи печі. Цей внутрішній тиск створює навантаження на стінки печі та вогнетривкі матеріали, зменшуючи термін служби печі та експлуатаційну стабільність [17]. Крім того, кількість необхідних летків збільшується, коли присутні великі шматки коксу, оскільки дренаж розплавленого матеріалу на рівні коксового шару стає проблематичним.

У сучасній металургійній практиці загальновизнано, що ефективний діапазон розмірів коксу для завантаження доменної печі становить від 40 до 60 мм для основного коксу (коксу з ковпака), із середнім цільовим значенням від 45 до 55 мм. У деяких спеціалізованих сферах застосування кокс у діапазоні 20-40 мм (горіховий кокс або дрібний кокс) використовується спеціально для завантаження рудного шару з метою покращення кінетики хімічних реакцій. Мінімальний корисний розмір для доменного коксу зазвичай встановлюється на рівні 10-20 мм, нижче якого вміст дрібних частинок стає проблематичним, а проникність значно погіршується.

Нещодавні дослідження підкреслюють, що добре контрольований розподіл розмірів є абсолютно необхідним для підтримки проникності та забезпечення ефективного проходження газів через шихту. Дрібні частинки менше 5-6 мм є особливо шкідливими, оскільки вони сильно знижують газопроникність і можуть

спричинити експлуатаційні проблеми, такі як утворення струпів та збільшення витрат палива. Типові специфікації передбачають менше 3% дрібних частинок менше 5 мм у шихті доменної печі [21].

2.7 Вибір обладнання

Для первинного дроблення великого коксу, що вивантажується з печі (зазвичай шматки розміром 100-150 мм), щокові дробарки є найбільш підходящим обладнанням для первинного дроблення. Щокові дробарки використовують V-подібну камеру, де матеріал стискається між нерухомою щелепою та коливальною щелепною пластиною, що приводиться в рух ексцентриковим валом. Схема подібної дробарки зображена на рис. 2.2. Вони спеціально розроблені для первинного дроблення твердих, крихких матеріалів, таких як кокс, і забезпечують стабільний коефіцієнт подрібнення з передбачуваним розміром продукту.

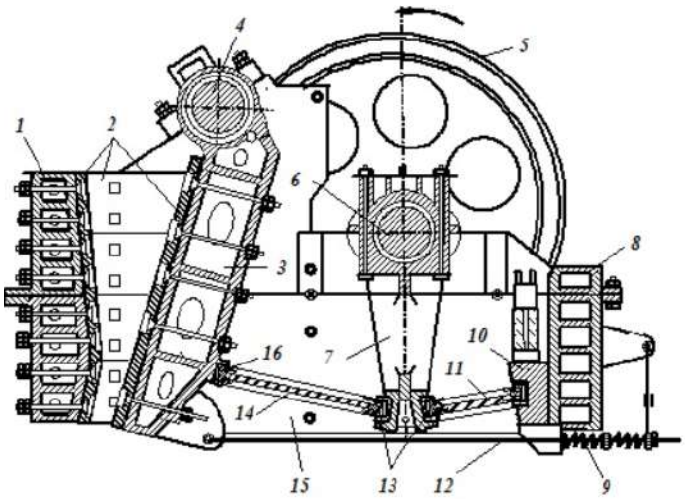


Рисунок 2.2 – Щокова дробарка з простим рухом щоки типу ЩДП:
1 – передня стінка; 2 – змінні футерувальні плити; 3 – рухома щока; 4 – вісь; 5 – маховик; 6 – ексцентрикове заточення валу; 7 – шатун; 8 – задня стінка; 9 – пружина; 10 – упорна деталь; 11,14 – розпірні плити; 12 – тяга; 13,16 – вкладиші; 15 – бокові стінки.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [46]

Перевагами щокових дробарок для дроблення коксу є:

– надійна конструкція, здатна витримувати суворі умови, властиві дробленню коксу;

– високі сили стиснення, що підходять для твердості металургійного коксу;

– проста, надійна механічна конструкція з низькими вимогами до обслуговування;

– енергоефективна робота (0,3-1,1 кВт·год/тонна);

– підходять для подрібнення коксу від 100-150 мм до 40-60 мм за один прохід;

– виробляють однорідні, кутасті частинки, придатні для використання в доменній печі.

Для вторинного дроблення з метою досягнення кінцевих специфікацій розміру та однорідності розміру рекомендуються конусні дробарки або двозубі валкові дробарки.

Конусні дробарки працюють за принципом стиснення з обертовою мантією всередині стаціонарної увігнутої чаші. Принципова схема зображена на рис. 2.3. Вони чудово створюють рівномірний розподіл розміру частинок з чудовим контролем форми. Вони особливо ефективні для матеріалів середньої твердості, таких як кокс, на стадіях вторинного дроблення та виробництва гравійних та добре відсортованих заповнювачів. Їх застосовують в ситуаціях, що вимагають точного регулювання закритої сторони (CSS) для кінцевого розміру продукту [22].

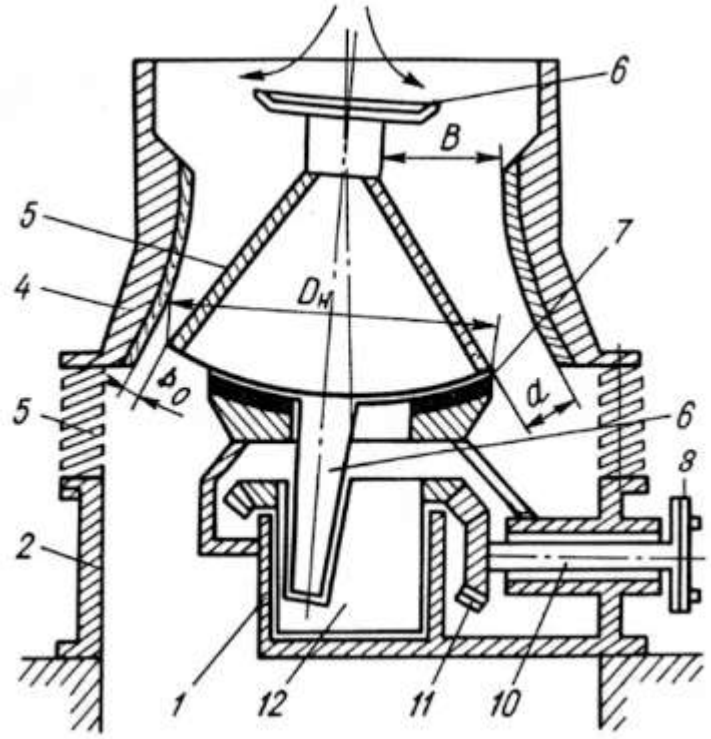


Рисунок 2.3 – Конусна дробарка:

1 – циліндричний стакан; 2 – станина; 3 – амортизатори; 4 – конічна чаша; 5 – конус; 6 – тарілка; 7 – пішипник; 8 – вал; 9 – муфта; 10 – привідний вал; 11 – конічні шестирні; 12 – ексцентриковий стакан.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [47]

Багатоциліндрові гідравлічні конусні дробарки мають наступні характеристики:

– велику силу дроблення, що підходить для твердих коксових матеріалів;

– високу частоту коливань, що забезпечує безперервне дроблення;

– широкий діапазон регулювання розвантаження для гнучкості в сортуванні продукту;

– опорна конструкція головного вала з використанням сферичної конфігурації плиток для довговічності.

Альтернативою можуть стати молоткові дробарки, особливо для середніх операцій. Вони працюють за принципом ударного дроблення, де швидко обертові молотки вдаряють по матеріалах з високою швидкістю. Переваги включають:

– здатність обробляти більші розміри сировини (до 1200 мм);

– можливість одноступеневого дроблення без вторинного дроблення;

– нижчі капітальні витрати для малих та середніх виробничих потужностей;

– підходять як для грубого, так і для дрібного дроблення.

Двозубі валкові дробарки є економічними та практичними для дрібного дроблення, особливо підходять для коксу з високим вмістом вологи (хоча металургійний кокс зазвичай має низький вміст вологи). Вони вимагають помірного зносу та обслуговування.

Найефективніша система дроблення поєднує обладнання в послідовних етапах:

Етап 1: Первинне дроблення (щокова дробарка)

Вхід: кокс з перехідної печі (100-150 мм)

Вихід: кокс розміром 40-80 мм

Продуктивність: велика пропускна здатність, що підходить для потреб промислової доменної печі

Етап 2: вторинне дроблення (конусна дробарка)

Вхід: кокс 40-80 мм з первинного етапу

Вихід: оптимізований кокс 20-60 мм з вузьким розподілом розмірів

Продуктивність: помірна пропускна здатність, висока точність

Етап 3: просіювання та класифікація (вібраційні грохоти)

Розділення на фракції за розміром:

Коксовий ковпак (30-80 мм) для завантаження центральної печі

Горіховий кокс (10-30 мм) для завантаження рудного шару

Коксовий дріб (<10 мм) для повернення до дробарки або зовнішнє використання

Ця триступенева система забезпечує стабільний розподіл розмірів продукту в межах специфікацій та мінімальне утворення дрібних частинок.

Впровадження технології великогабаритного дроблення коксу забезпечує численні кількісні переваги. Завдяки підтримці оптимального розподілу розмірів коксу мінімізується співвідношення відновника. Дослідження показують, що контроль розподілу розмірів коксу може зменшити співвідношення палива на 20-35 кг на тонну гарячого металу порівняно з печами, які отримують нестабільний розподіл розмірів [17, 22].

Підвищена продуктивність доменної печі. Краща проникність та використання газу дозволяють підвищити виробничі показники при тому ж об'ємі печі. Коефіцієнт використання газу покращується приблизно на 2,5% при збереженні стабільності розміру коксу порівняно з погіршеними умовами.

Зниження робочого тиску та навантаження на вогнетривкі матеріали завдяки оптимізованому розподілу розмірів коксу подовжує термін служби печі та зменшує витрати на заміну вогнетривів.

Ця технологія підтримує гнучкість у використанні ресурсів. Технологія дроблення дозволяє роздільне завантаження горіхового та коксу з товстолистого палива в різні шари шихти, що дозволяє вбудовувати коксівне вугілля нижчої якості та збільшувати швидкість вдування пиловугілля [23], зберігаючи при цьому експлуатаційну стабільність.

Таблиця 2.2

Порівняння кількісних параметрів якості

Індикатор якості	Перед дробленням	Після дроблення	Покращення
Тиск коксування	50-70 кПа	30-45 кПа	↓ 30-40%
Навантаження продавлювання	Базовий рівень	↓15-25% струм потужності	↑ Продуктивність 5-10%
Індекс барабана (DI15015)	82-85%	88-92%	↑ 5-8%
CRI	28-32%	25-28%	↓ 3-5%
CSR	58-62%	62-66%	↑ 4-6%
Середній розмір інертиніту	>2.0 мм	<1.5 мм	Рівномірна матриця
Однорідність пор	Бімодальна	Гаусова	↓ Станд. відхилення 25%

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [17,22]

Перетворення виникає внаслідок кінетичних модифікацій під час карбонізації [22]:

1. Підвищена проникність пластичного шару: Дрібне дроблення (зменшення D50 з 2,5 мм до 1,2 мм) збільшує коефіцієнт дифузії газу за законом Стокса-Ейнштейна, зменшуючи $\Delta P_{max} \propto 1/D_{частинок}^2$.

На рисунку 2.4 показано результат SUL-тесту, проведеного для оцінки впливу розміру коксу на реакційну здатність (або ж реакційну здатність в атмосфері відновника, RAR) у шарі руди та коксу, що імітує грудкувату та когезійну зони доменної печі. Кокс та агломерат укладаються шарами по черзі за однакових умов доменної плавки (або ДП). Коли розмір коксу змінюється з 8 до 12 мм, коефіцієнт використання газу (або ступінь використання відновника) зменшується приблизно на 0,6% у діапазоні температур понад 750 °C. Вважається, що ця різниця зумовлена

відмінністю в ефективності реакції відновлення через зміну питомої площі поверхні коксу відповідно до зміни його розміру [17].

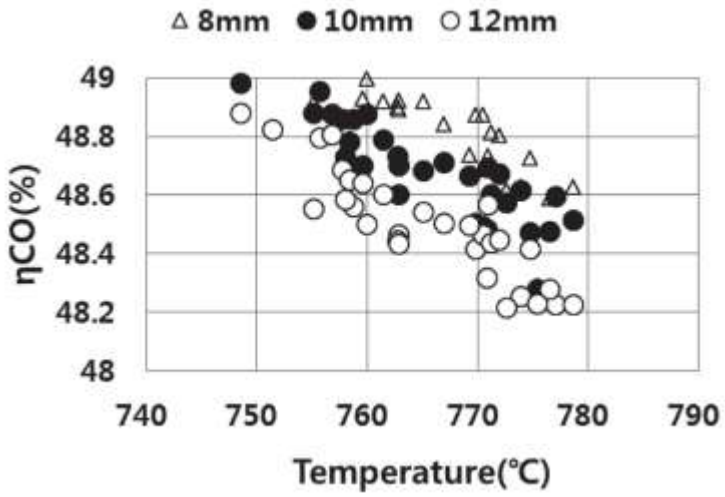


Рисунок 2.4 – Зміна використання газу залежно від розміру коксу за результатами випробування SUL

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [17]

2. Рівномірна еволюція летких речовин: Синхронізоване видалення летких речовин по всьому ансамблю частинок запобігає пікам тиску на пізніх стадіях, створюючи послідовну структуру напівкоксу при 550-600°C.

3. Інтеграція інертиніту: Частинки <1,5 мм повністю інкапсулюються у вітринітовій матриці, а не існують як жорсткі включення, усуваючи точки концентрації напружень (критерій Гріффітса).

4. Підтримка об'ємної щільності: Селективне дроблення зберігає переваги щільності заряду сухих систем (CMC/DAPS), усуваючи водночас недоліки грубої фракції.

Окрім покращення якості, впровадження дає зменшення витрат на технічне обслуговування. Менше напруження стінок подовжує термін служби печі на 15-20%. Збільшення потужності на 5-10% завдяки швидшим циклам проштовхування. Економія енергії близько 3-5% завдяки оптимізованій ефективності карбонізації.

Забезпечує використання вугілля з вищим тиском коксування на 20-30% без зниження якості.

Діаграма з рис. 2.5 ілюструє ефективність оптимізованого складу вугільної шихти для покращення механічних властивостей коксу. Оптимізація на промислових об'єктах (Запоріжкокс та АрселорМіттал Кривий Ріг) дозволила збільшити дробність на 2,5% (з 84,5% до 87,0%), що безпосередньо покращує стійкість коксу до фрагментації під час обробки та транспортування. Одночасно стійкість до стирання покращилася на 1,0 відсотковий пункт (з 8,9% до 7,9%), що означає утворення меншої кількості дрібних частинок [48]. Це подвійне покращення демонструє, як стратегічний вибір вугільної суміші покращує загальну якість коксу для доменних печей.

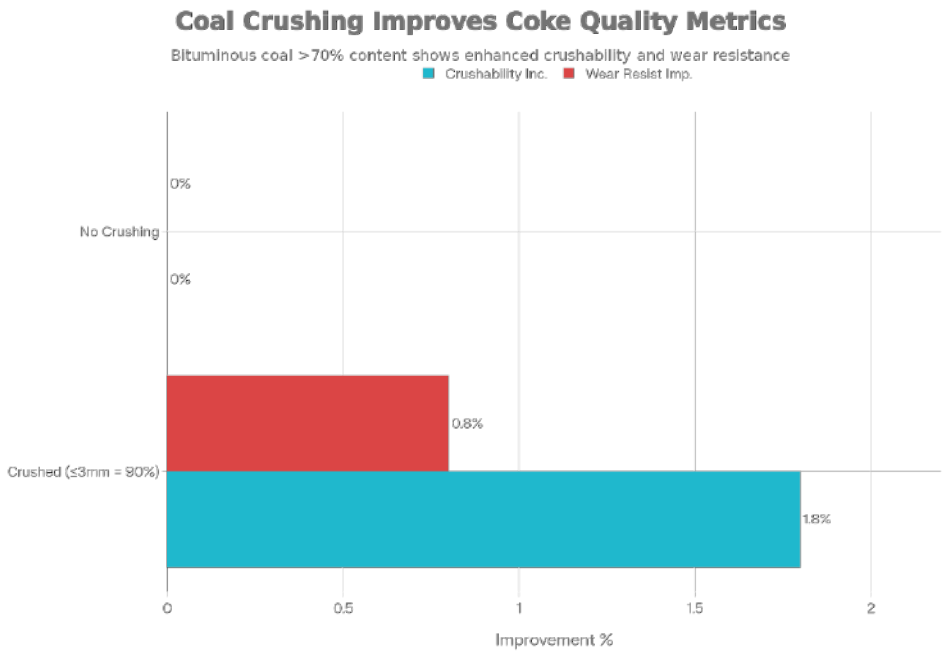


Рисунок 2.5 – Вплив зменшення розміру частинок вугілля на покращення якості коксу

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [48]

На рисунку 2.6 представлено результат експерименту з теплообміну із застосуванням частинок різного розміру. Експеримент проводився у горизонтальній трубчастій печі при температурі 1100°C та швидкості потоку азоту

N_2 0,5 л/хв згідно з методикою, описаною в експериментальній частині. Кокс діаметром 40 мм та агломерат діаметром 26 мм нагрівалися з однаковою швидкістю нагрівання. При цьому пари кокс діаметром 30 мм та агломерат діаметром 18,6 мм демонструють схожу поведінку нагрівання. Крупніші частинки нагріваються в центрі із затримкою на 1–2 хвилини порівняно з дрібнішими, а швидкість теплопередачі агломерату виявляється нижчою, ніж у коксу. З огляду на отримані результати, було оцінено, що ефективність теплообміну знижується приблизно на 3% на кожний 1 мм збільшення розміру частинок [17].

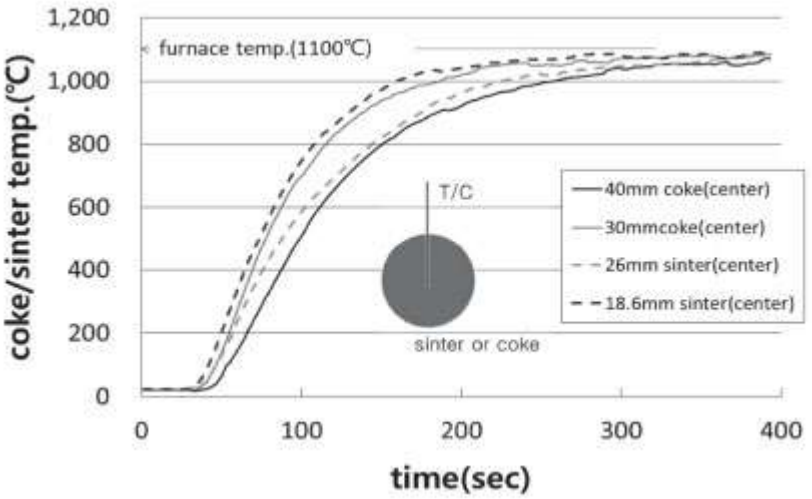


Рисунок 2.6 – Швидкість теплопередачі залежно від розміру коксу та агломерату.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [17]

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

3.1 Пожежна безпека

Пожежна небезпека коксових цехів визначається властивостями горючих газів (коксового та доменного) і твердих матеріалів (кам'яновугільної шихти, коксу). Якщо газорозподільна апаратура спроектована чи експлуатується неправильно, може відбутися загазованість території, що за наявності джерел запалювання призводить до спалахів і швидкого поширення полум'я.

Основні джерела займання: відкрите полум'я газових форсунок, іскри під час газозварювальних робіт, перегрітий до температури самозаймання кокс, статичні та атмосферні розряди, механічні іскри (удари металевих предметів) та електричні (короткі замикання, великі перехідні опори тощо).

Ключовою умовою запобігання пожежам, вибухам і отруєнням є герметичність апаратів, газопроводів і газової арматури. Усі виявлені нещільності потрібно ліквідовувати своєчасно, причому підтягування болтів слід виконувати інструментом, що не утворює іскор при ударі об сталь, а клепальні шви ущільнювати мідним інструментом.

У печах із нижнім підведенням газу передбачене провітрювання підбатарейних приміщень з газопроводами й опалювальною арматурою, щоб запобігти виникненню вибухонебезпечних концентрацій. На газопроводах батарей встановлюються задвижки для відключення та забезпечується можливість монтажу заглушок.

Для скидання надлишку очищеного коксового газу використовуються газозбросні пристрої, що автоматично спрацьовують при підвищенні тиску. Їх монтують на відстані не менше 30 м від найближчих споруд або виводять гирло на висоту щонайменше 15 м вище рівня сусідніх будівель та майданчиків. Загальна висота газосбросних свічок має становити не менше 30 м при обсягах скидання до

50 000 м³/год і не менше 45 м при більших об’ємах. Діаметр свічок розраховують так, щоб забезпечити необхідний тиск у разі повної зупинки відсмоктування газу й автоматичне відкривання при його перевищенні. На всіх батареях висота свічок має бути не меншою ніж 4 м від рівня обслуговуючого майданчика газозбірників.

До первинних засобів пожежогасіння у коксових цехах відносять: пінні вогнегасники серії ВХП–10, ВВП–10, вуглекислотні вогнегасники серії ВВ–2, ВВ–5, ВВ–8, а також пожежний інвентар (негорюче теплоізоляційне покривало, ящики з піском, цебра, совкові лопати, ломи, сокири, пожежні рукави). У цеху діє внутрішній протипожежний водопровід із кранами та рукавами.

На території підприємства категорично забороняється:

- палити у невстановлених місцях (куріння дозволено лише у спеціально відведених зонах);
- загороджувати під’їзди та підходи до будівель, водопроводів і пожежних гідрантів;
- відключати ділянки водопровідної мережі, внутрішні пожежні крани або знижувати тиск у мережах;
- допускати до вогневих робіт працівників без інструктажу з пожежно-технічного мінімуму;
- використовувати воду з пожежних водойм і засоби пожежогасіння не за прямим призначенням;
- застосовувати відкрите полум’я під час огляду обладнання.

3.2 Вентиляція

Якість повітря у робочій зоні виробничих приміщень є одним із ключових факторів безпеки праці та екологічного захисту. Накопичення у повітрі шкідливих газів, парів або пилу створює серйозну загрозу для здоров’я працівників і може стати причиною аварійних ситуацій, зокрема пожеж та вибухів. Вимоги до

мікроклімату і складу повітря у виробничих приміщеннях встановлюють ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони» [24].

У виробничих приміщеннях коксохімічних цехів найбільш поширеними шкідливими чинниками є вугільний і коксовий пил, що подразнює органи дихання та здатний створювати вибухонебезпечні концентрації. До цього додаються токсичні гази та пари, серед яких сірководень, бензол, толуол, ксилол, ацетон і піридинові сполуки, що мають канцерогенну або наркотичну дію, викликають отруєння та ураження органів дихання. Особливо небезпечним є оксид вуглецю, який не має запаху та кольору, але блокує транспорт кисню в організмі, спричиняючи гіпоксію. Крім того, у приміщеннях можливе накопичення вибухонебезпечних газових сумішей, що при досягненні нижнього концентраційного рівня займання створюють загрозу вибуху. Недостатня якість мікроклімату — перегрівання чи застійні зони без належного повітрообміну — призводить до теплового стресу та зниження працездатності персоналу.

Вентиляція є основним технічним засобом забезпечення безпечної якості повітря у виробничих приміщеннях. Вона повинна відповідати вимогам ГОСТ 12.4.021-75 «ССБТ. Системи вентиляційні. Загальні вимоги» і гарантувати відповідність повітря робочої зони нормам ДСН 3.3.6.042-99 та ГОСТ 12.1.005-88 [24]. У приміщеннях, де можливе надходження вибухонебезпечних газів і парів, а також у випадках раптового виділення значних кількостей токсичних речовин, обов’язково встановлюється аварійно-витяжна вентиляція. Такими зонами є машинні зали, компресорні, вакуум-насосні установки, цехи ректифікації бензолу, склади бензольних продуктів та інші потенційно небезпечні дільниці.

Аварійна вентиляція повинна автоматично вмикатися при досягненні 20% нижнього концентраційного рівня займання або у разі перевищення гранично допустимих рівнів концентрацій шкідливих речовин. Для цього у приміщеннях

встановлюються автоматичні газоаналізатори, які одночасно подають світлові та звукові сигнали. Додатково передбачається можливість ручного дистанційного увімкнення аварійної вентиляції, прилади керування розташовуються біля основних дверей зовні приміщення. У випадку відсутності автоматичних газоаналізаторів контроль за станом повітря виконує лабораторія підприємства за затвердженим графіком.

Важливими є й вимоги до експлуатації вентиляційних систем. Усі металеві повітроводи та обладнання у приміщеннях категорій А і Б підлягають обов'язковому заземленню, що запобігає утворенню іскор. Припливні й витяжні агрегати повинні розташовуватись в окремих камерах, їхнє спільне встановлення забороняється. Змінний персонал на початку кожної зміни зобов'язаний проводити зовнішній огляд та перевірку справності дії вентиляційних установок.

3.3 Стічні води

Стічні води коксохімічних цехів є одним із найважливіших екологічних аспектів, які суттєво впливають на стан довкілля. У процесі роботи підприємства утворюються забруднені стоки від миття обладнання, дренажних систем, а також дощові води, що змивають коксовий пил із площадок. Основними шкідливими домішками у таких стічних водах виступають нафтопродукти, смоли, феноли, поліциклічні ароматичні вуглеводні та завислі речовини (TSS). Вони мають високу токсичність, стійкість у навколишньому середовищі та можуть накопичуватися в ґрунтах і водоймах, завдаючи шкоди біоценозам.

Найбільш небезпечним є надходження у воду нафтопродуктів і кам'яновугільних смол. Вони утворюють на поверхні водойм плівку, яка знижує газообмін, призводить до зменшення концентрації кисню та загибелі водних організмів. Завислі речовини, до складу яких входять коксовий пил та дрібнодисперсні частинки вугілля, осідають на дні водойм, змінюють структуру

донних відкладень та порушують природний баланс. Крім того, такі стоки мають підвищене хімічне споживання кисню (ХСК) і біохімічне споживання кисню (БСК), що є ознакою значного органічного забруднення. За даними Агентства з охорони довкілля США [25], стічні води коксохімічних виробництв без попереднього очищення становлять одну з основних загроз для водних екосистем через складність і різноманітність забруднюючих компонентів.

Для зниження впливу шкідливих чинників передбачаються комплексні заходи очищення стічних вод. На першому етапі здійснюється механічне очищення — відстоювання та фільтрація, які дозволяють вилучити більшу частину завислих речовин і піни. Далі застосовується фізико-хімічне очищення, що включає флотацію, коагуляцію та адсорбцію на активованому вугіллі для видалення нафтопродуктів і смол. Особливу роль відіграють біологічні методи очищення — аеротенки та біофільтри, які ефективно знижують вміст фенолів, аміаку та органічних речовин, що визначають високі показники БСК і ХСК.

Важливим напрямком екологічного захисту є облаштування роздільних систем каналізації для дощових і виробничих стоків, що запобігає перевантаженню очисних споруд. Дощові води, що змивають коксовий пил із площадок, повинні проходити через піскоуловлювачі та нафтовловлювачі перед подачею у загальну систему. Всі споруди та комунікації необхідно утримувати в герметичному стані, щоб уникнути випадкового потрапляння шкідливих речовин у ґрунтові води.

3.4 Утилізації відходів коксохімічного виробництва при частковому брикетуванні вугільної шихти

Створення ресурсозберігаючої технології комплексної енерго-хімікотехнологічної переробки вугілля в рамках коксохімічного виробництва є критично важливим для досягнення цілей повного запобігання утворенню відходів та раціонального використання існуючих вторинних ресурсів.

Відходи на коксохімічних підприємствах формуються як побічні продукти в процесі виробництва основного продукту. Кількість та якість цих відходів залежать від низки факторів, включаючи:

– Застосовувані технологічні схеми.
– Умови ведення виробництва.
– Можливі порушення технологічного режиму.
– Технічний стан промислового обладнання.
– Якість вихідної сировини (вугілля).
– Загальна культура виробництва [26].

Раціональна утилізація відходів має бути спрямована на максимально повне використання їх цінних властивостей або речовин, що містяться у їх складі. З огляду на значний вміст цінних компонентів у відходах коксохімічного виробництва, одним із ключових напрямів їх використання є рекуперація шляхом додавання до вугільної шихти перед коксуванням.

Паралельно, гострою проблемою для українських коксохімічних підприємств залишається недостатнє забезпечення добреспікливим вугіллям. Вирішення цієї проблеми та розширення сировинної бази коксування можливе через застосування слабоспікливого вугілля без погіршення кінцевої якості коксу.

Для подолання дефіциту якісної сировини та ефективної переробки відходів застосовується комплекс додаткових способів і прийомів:

– Розробка оптимальних складів шихти на основі наявної вугільної сировинної бази.
– Спеціальні способи підготовки вугільної шихти:
– Вибіркове подрібнення вугілля.
– Термічна підготовка шихти перед коксуванням.
– Трамбування шихти.
– Часткове або повне брикетування шихти із застосуванням зв'язуючого.

– Позапічна обробка коксу.

Найбільш простим методом утилізації є додавання належним чином підготовлених і змішаних відходів до вугільної шихти для коксування. Отримана суміш має відповідати низці жорстких вимог:

– Склад та властивості суміші повинні бути рівномірними, постійними та стійкими.

– В'язкість суміші має забезпечувати її рівномірне дозування у вугільну шихту.

– Процес коксування відходів не повинен негативно впливати на технічний стан коксових печей.

– Вміст легковипаровуваних речовин при робочій температурі має бути мінімальним для забезпечення санітарно-гігієнічних норм.

– Значення pH суміші має бути в межах 7–8.

– Вміст мінеральних речовин не повинен призводити до збільшення зольності коксу.

– Речовини, що містять сірку, повинні розкладатися при коксуванні з переважним переходом сірки у газову фазу.

Для досягнення цих вимог, до в'язкої кислої смолки сульфатного відділення та цеху ректифікації сирого бензолу можуть додаватися як розчинники полімери бензольного відділення, пекові дистиляти та кубові залишки відділення дистиляції нафталіну, а також олива фенольних відстійників. Досвід свідчить, що таке додавання може забезпечити додаткову кількість коксу, смоли і газів. Однак цей процес вимагає індивідуального підходу з урахуванням специфічних умов кожного виробництва.

Просте механічне дозування рідких відходів на шар вугільної шихти, що транспортується конвеєром, має істотні недоліки:

– Нерівномірний розподіл відходів у масі шихти.

– Забруднення, що веде до передчасного виходу з ладу стрічкового конвеєра.

– Зависання шихти у вугільній башті та бункерах вуглезавантажувального вагону.

– Нерівномірна якість кінцевого коксу.

Саме тому одним із найбільш раціональних способів використання рідких відходів коксохімічного виробництва є їх застосування в якості зв’язуючої речовини при брикетуванні (частковому брикетуванні) вугільної шихти перед процесом коксування.

Для брикетування шихти перед коксуванням доцільно застосовувати методи з малим тиском пресування (до 15–25 МПа). Отримані брикети відрізняються зручністю у транспортуванні, зберіганні, не схильні до смерзання взимку, утворюють мало дрібної фракції і не самозаймаються при тривалому зберіганні.

Ключові вимоги до вугільних брикетів:

– Механічна Міцність: Брикети повинні мати необхідну міцність для витримування механічних навантажень під час обробки та транспортування.

– Вологостійкість: Для транспортування та тривалого зберігання на складах, брикети мають зберігати свою міцність під впливом атмосферних умов.

– Відсутність Злипання: Брикети, виготовлені із зв'язуючою речовиною, не повинні злипатися під час транспортування або тривалого штабельного зберігання.

Процес брикетування із застосуванням зв'язуючої речовини включає три основні технологічні етапи:

1. Адсорбція та Утворення Плівки: Адсорбція зв'язуючої речовини матеріалом та формування тонкої плівки на поверхні частинок твердої речовини.

2. Пресування: Механічне пресування шихти.

3. Затвердіння: Затвердіння (схоплювання) брикету під час охолодження.

ВИСНОВОК

Кваліфікаційна робота була присвячена комплексному аналізу технологічних рішень для оптимізації якості та гранулометричного складу металургійного коксу на етапі його післякамерної обробки. В результаті виконання поставлених завдань досягнуто мети роботи та сформульовані наступні ключові висновки.

Аналіз фізико-хімічних основ коксування та властивостей вихідного вугілля підтвердив, що якість коксу, включаючи його механічну міцність, пористість та реакційну здатність, безпосередньо залежить від властивостей вихідного вугілля та кінетики процесу термічної деструкції, а розподіл цих властивостей у різних фракціях коксу знаходить своє теоретичне обґрунтування у градієнті температур та неоднаковому часі витримки в зоні пластичного стану. Розгляд структури коксохімічного підприємства та існуючих технологічних схем сортування показав, що етап післякамерної обробки є ключовим для формування кінцевих товарних характеристик коксу, при цьому існуючі схеми не завжди забезпечують цільову однорідність фракційного складу, особливо щодо контролю великогабаритного коксу.

Проведене порівняння якісних показників коксу довело, що великогабаритний кокс (>60 мм) часто характеризується гіршими показниками (зниженою міцністю та підвищеною схильністю до руйнування) порівняно з оптимальними фракціями. Зниження механічної міцності (M40) та післяреакційної міцності (CSR) великогабаритного коксу негативно впливає на газодинамічний режим доменної печі, спричиняючи каналізацію газового потоку та нерівномірне горіння, що підтверджує необхідність його усунення зі шихти. На основі цього було обґрунтовано запровадження технології цільового руйнування (дроблення) великогабаритного коксу як найбільш ефективного заходу для стандартизації гранулометричного складу.

На основі техніко-економічного аналізу здійснено вибір оптимального обладнання, що дозволяє максимально ефективно подрібнювати великі шматки коксу, мінімізуючи при цьому утворення небажаного дріб’язку.

Також підкреслено важливість дотримання норм охорони праці, пожежної безпеки та вентиляції, а також необхідність ефективної системи очищення стічних вод від хімічних домішок для зниження негативного впливу коксохімічного виробництва на навколишнє середовище.

Запропоновані технологічні рішення щодо дроблення великогабаритного коксу дозволяють не лише підвищити однорідність фракційного складу, але й у кінцевому підсумку поліпшити техніко-економічні показники доменної плавки за рахунок стабілізації процесу та зниження питомих витрат палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Суліменко С. Є. Проект системи очистки фенолвмісних стічних вод цеху очистки коксового газу з утилізацією осаду надлишкового мулу [Електронний ресурс] / С. Є. Суліменко. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://dspace.znu.edu.ua/jspui/bitstream/12345/2385/1202.pdf.

2. Лейбович Р. Е. Технология коксохимического производства/ Е. Р. Лейбович, Е. И. Яковлева, А. Б. Филатов. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.Соколов Р.С. Химическая технология/ Р.С. Соколов. – М.: Гуманит. Изд. Центр ВЛАДОС, 2000. – 448 с.

3. Рудыка В.И. Производство кокса: насущные проблемы и стратегии / В.И. Рудыка, В.П. Малина, Т.Я. Кравченко, М.В. Бородин // Кокс и химия. – 2004. – № 7. – С. 52–56.

4. Colorado-Arango, L., Menéndez-Aguado, J. M., & Osorio-Correa, A. Particle Size Distribution Models for Metallurgical Coke Grinding Products. *Metals*, 2021, 11(8), 1288. DOI: https://doi.org/10.3390/met11081288

5. Mousa, E.; Wang, C.; Riesbeck, J.; Larsson, M. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, *65*, 1247–1266.

6. Jha, G.; Soren, S.; Mehta, K.D. Partial substitution of coke breeze with biomass and charcoal in metallurgical sintering. *Fuel* 2020, *278*, 118350.

7. Fröhlichová, M.; Legemza, J.; Findorák, R.; Maslejová, A. Biomass as a Source of Energy in Iron Ore Agglomerate Production Process. *Arch. Met. Mater.* 2014, *59*, 815–820.

8. Шарма Р., Дхармендра К., Тивари Х. П., Банерджи П. К. Изучение измельчения кокса на пути от коксовой рампы в коксовом цехе до рудного двора доменного цеха

9. Winzer G, Engel K. Proceedings of Metal Society Conference Coal Coke and Blast Furnace, Middlesbrough, 1977

10. Hodgson D., Karadag E., Saillen M. Influence of coal particle sizes on the mechanical strength of iron-carbon briquettes: with focus on steelmaking applications : Degree Project in Technology, First cycle, 15 credits. Stockholm, Sweden, 2022.

11. Fan Ch., Xu L., Fu X., Zhou L., Li S., Su W. Scale effect on uniaxial compressive properties of the outburst-prone coal. Article, 15 March 2023.

12. Yu D., Xu M., Sui J., Liu X., Yu Y., Cao Q. Effect of coal particle size on the proximate composition and combustion properties. *Thermochimica Acta*. 2005. Vol. 439, Issues 1–2. P. 103–109.

13. Kumar D., Saxena V. K., Tiwari H. P., Nandi B. K., Verma A., Tiwary V. K. Variability in metallurgical coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR): an experimental study. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, Issue 2.

14. Lundgren M., Sundqvist Ökvist L., Björkman B. Coke reactivity under blast furnace conditions and in the CSR/CRI test.

15. Lv Q. Q., Tian Y. S., Zhou J. L., Ren H. W., Wang G. H. A comprehensive investigation of the reaction behavioral features of coke with different CRIs in the simulated cohesive zone of a blast furnace. *PLoS One*. 2021. Vol. 16, No. 1. e0245124. DOI: 10.1371/journal.pone.0245124.

16. Lundgren M., Sundqvist Ökvist L., Björkman B. Coke reactivity under blast furnace conditions and in the CSR/CRI test. *Steel Research International*. 2009. Vol. 80, No. 6. P. 396–401.

17. Chung, J. K., Lee, S. M., & Shin, M. S. Effect of Coke Size on Reducing Agent Ratio (RAR) in Blast Furnace // *ISIJ International*. – 2018. – Vol. 58, No. 12. – P. 2228–2235.

18. YouTube. *Burden Input Size in Blast Furnaces: Why Particle Size and Fines Control are Crucial* [видео] / YouTube. — 2019.— URL: https://www.youtube.com/watch?v=qDtCRnMplK8

19. Kexin, J., Jianliang, Z., Chunlin, C., Senran, W., & Lisheng, L. Analysis of the Deadman Features in Hearth Based on Blast Furnace Dissection by Comprehensive Image-processing Technique // *ISIJ International*. – 2019. – Vol. 59, No. 1. – P. 16–21.

20. Niu, Q., Cheng, S., Xu, W., Niu, W., & Mei, Y. Analysis of the Coke Particle Size Distribution and Porosity of Deadman Based on Blast Furnace Hearth Dissection // *ISIJ International*. – 2019. – Vol. 59, No. 11. – P. 1997–2004.

21. IspatGuru. *Factors affecting Coke rate in a Blast Furnace* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ispatguru.com/factors-affecting-coke-rate-in-a-blast-furnace

22. How to Crush Coal. FTM Machinery. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-crush-coal.html

23. Böhnisch, S., Hauck, T., López Brull, A., Carrascal Camino, D. J., Ruiz Bustinza, I., Mochón Muñoz, J., van der Stel, J., Clixby, G., Mirkovic, T., Colla, V., Toscanelli, O., Cateni, S., Wieters, C. U., Kannappel, M., Bergmann, J., Wolny, H., Zagaria, M., & Petronelli, N.*Consistent blast furnace operation whilst using low cost raw materials (Consistent BF)* : Research report. – European Commission, Research Fund for Coal and Steel, 2011. – Grant Agreement RFSR-CT-2007-00002, project duration: 1 July 2007 – 31 December 2011.

24. НПАОП 23.1-1.01-08. *Правила безпеки в коксохімічному виробництві*: затв. наказом Держгірпромнагляду України від 03.06.2008 № 124. – Офіц. вид. – К.: Держгірпромнагляд України, 2008. – 214 с.

25. United States Environmental Protection Agency. *EPA Publications – NEPIS* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nepis.epa.gov

26. Золотарев И.В. Исследование влияния состава угольных шихт и внепечной обработки кокса на его микроструктуру / И.В. Золотарев, М.А. Ильяшов, Т.Г. Шендрик, В.А. Тамко, Л.Н. Исаева, Е.И. Збыковский, И.И. Швец // Наукові

праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». – 2014. – Вип.1 (22). – С.164-173. Дисертантом досліджено вплив борвміщуючих речовин на зменшення пористості коксу.

27. Borisova, L.N.; Shapovalov, Yu.G. Dovidnyk koksokhimika. U 6-ty tomakh. Tom 1. Vuhillia dlia koksuvannia. Zbahachennia vuhillia. Pidhotovka vuhillia do koksuvanni; Inzhek, 2010.

28. Díez, M.A.; Alvarez, R.; Barriocanal, C. Coal for Metallurgical Coke Production: Predictions of Coke Quality and Future Requirements for Cokemaking. Int. J. Coal Geol. 2002, 50, 389–412. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4

29. Suárez-Ruiz, I.; Crelling, J.C. Applied Coal Petrology. The Role of Petrology in Coal; Elsevier Utilization, 2018

30. ASTM International. *Standard Test Method for Measuring Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength After Reaction (CSR)* — Designation D5341/D5341M-14. Available at: https://ru.scribd.com/document/924712356/ASTM-D-5341-14-CSI-CSR

31. Hydrogen in Iron Making: Is Hydrogen Injection in a Blast Furnace the Best Way to Cut Emissions? // Energy Policy. — 2025. — September 1. — (Green Steel, Steel Research).

32. ASTM D5709-22. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Petroleum Coke*. ASTM International; Approved May 1, 2022; Active standard for dry sieve particle size analysis of petroleum coke. 4 pages. DOI: 10.1520/D5709-22.

33. Sieve analysis (Ситовий аналіз) [Електронний ресурс] // *ScienceDirect Topics*. — Elsevier. — Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/sieve-analysis

34. ASTM D 5709–95 (Reapproved 2000)e1. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Petroleum Coke* : American National Standard. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2000.

35. The basics of conducting a sieve analysis (Основи проведення ситового аналізу) [Електронний ресурс] // *Polydeck Screen Corporation*. — Режим доступу: https://polydeck.com/the-basics-of-conducting-a-sieve-analysis/

36. Particle size analysis methods: laser diffraction vs. dynamic image analysis [Electronic resource] // *Anton Paar Wiki*. — Mode of access: https://wiki.anton-paar.com/en/particle-size-analysis-methods-laser-diffraction-vs-dynamic-image-analysis/

37. Laser diffraction [Electronic resource] // *Microtrac MRB*. — Mode of access: https://www.microtrac.com/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/

38. The differences between measurement results obtained by image analysis and laser diffraction particle size analysis [Electronic resource] // *Bettersize Instruments – Bettersize Wiki*. — Mode of access: https://www.bettersizeinstruments.com/learn/bettersize-wiki/the-differences-between-measurement-results-obtained-by-image-analysis-and-laser-diffraction-particle-size-analysis/

39. Malvern Panalytical — Sanctioned Country [Electronic resource] // *Malvern Panalytical*. — Mode of access: https://www.malvernpanalytical.com/en/about-us/sanctioned-country

40. Velasco F., Guzmán S., Rabanal M. E., Jiménez-Mateos J. M., Echeberria J., Ayerbe E., Calero J. A. Milling process of petroleum coke for sintered steel applications // *Powder Metallurgy*. — 2013. — Vol. 54, no. 1. — P. 59–66. — DOI: 10.1179/174329009X409679.

41. Interpreting Laser Diffraction Results for Non-Spherical Particles [Electronic resource] // *HORIBA Scientific Particle Webinars*. — HORIBA, Ltd. — Mode of access: https://www.horiba.com/int/particlewebinars/interpreting-laser-diffraction-results-for-non-spherical-particles/

42. CAMSIZER – Product Information [Electronic resource] // *Pico Technology Co., Ltd.* — Mode of access: https://pico.co.th/img/prod-CAMSIZER.pdf

43. Zhang Zh., Lan Xi., Wen G., Long Q., Yang X. An Experimental Study on the Particle Size and Shape Distribution of Coal Drill Cuttings by Dynamic Image Analysis // *Geofluids*. — 2021. — Article ID 5588248. — DOI: 10.1155/2021/5588248. — First published: 21 August 2021.

44. Wang M., Liu Z., Chu M., Shi Q., Tang J., Han D., Cao L. Influence of Temperature and CO_2 on High-Temperature Behavior and Microstructure of Metallurgical Coke // *ACS Omega*. — 2021. — Vol. 6, no. 30. — P. 19569–19577. — DOI: 10.1021/acsomega.1c01675. — Published: 26 July 2021.

45. Baghalha M., Mohammadi M., Ghorbanpour A. Coke deposition mechanism on the pores of a commercial Pt–Re/γ-Al_2O_3 naphtha reforming catalyst // *Fuel Processing Technology*. — 2010. — Vol. 91, no. 7. — P. 714–722.

46. Щокові дробарки з простим рухом щоки : [Електронний ресурс] / Вікіпедія : вільна енциклопедія. — Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Щокові_дробарки_з_простим_рухом_щоки

47. Конусна дробарка : [Електронний ресурс] / Вікіпедія : вільна енциклопедія. — Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Конусна_дробарка

48. Pyshyev S., Shmeltser K., Miroshnichenko D., Lebedev V., Kravchenko S., Vytrykush N., Krasiuk O., Shved M. Blast furnace coke requirements and methods of improving its quality: a review // Chemistry & Chemical Technology**. —** 2025**. —** Vol. 19, No. 1**. —** P. 174–182**.**

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА
про підготовку здобувача-випускника

Беспалюк Тетяни Олександрівни
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Хімічних технологій та інженерії
Спеціальність 161 Хімічних технологій та інженерії

Назва кваліфікаційної роботи Кваліфікаційна магістерська робота

Тема кваліфікаційної роботи Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків

Керівник кваліфікаційної роботи: Доцент, к.т.н. Десна Н.А.
(посада, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консультанта	Примітка
1	Аналітична частина	Десна Н.А.	зараховано	01.12		
2	Основна частина	Десна Н.А.	зараховано	19.12		
3						
4						

Завідувач кафедри _____ К.О. Шмельцер
(підпис) (ініціали, прізвище)

« 15 » 01 2026 р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Хімічних технологій та інженерії

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

магістра

Здобувача Беспалюк Тетяни Олександрівни
(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-24м

Тема кваліфікаційної роботи магістра
Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	78;
таблиць	6;
схем і рисунків	9;
листів графічної частини (демонстраційного матеріалу)	.

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи магістра

Кваліфікаційна робота була спрямована на всебічне дослідження технологічних рішень, орієнтованих на підвищення якості металургійного коксу та оптимізацію його гранулометричного складу на стадії післякамерної обробки. Аналіз структури коксохімічного підприємства й діючих схем сортування показав, що саме етап післякамерної обробки відіграє вирішальну роль у формуванні кінцевих товарних властивостей коксу, тоді як наявні технологічні рішення не завжди забезпечують необхідну однорідність фракцій, зокрема щодо контролю частки великогабаритного коксу.

Порівняльна оцінка якісних показників коксу встановила, що фракції великого розміру (>60 мм) у більшості випадків характеризуються гіршими експлуатаційними властивостями, зокрема зниженою міцністю та підвищеною схильністю до руйнування, порівняно з оптимальними фракціями. Погіршення показників механічної міцності (M_{25}) і післяреакційної міцності (CSR) такого коксу негативно впливає на газодинаміку доменної печі. У зв'язку з цим доведено ефективність упровадження технології цільового руйнування (дроблення) великогабаритного коксу як раціонального способу стандартизації гранулометричного складу.

Недоліки кваліфікаційної роботи магістра
(бакалавра, магістра)

В роботі не розкрито дослідження розподілення зольності та вологи по класах крупності коксу. Мало приділено уваги технологічним схемам сортування коксу з руйнуванням крупних шматків чи дроблення всього масиву матеріалу.

В деяких місцях пояснювальної записки допущені стилістичні та орфографічні помилки та огріхи, в тексті зустрічається невдалий переклад.

Характеристика загальної, спеціальної і виробничої підготовки автора кваліфікаційної роботи магістра, ступінь самостійності виконання роботи, уміння користуватися літературними матеріалами

Здобувач Беспалюк Т.О. під час написання кваліфікаційної магістерської роботи показала відмінну загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працювала самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної роботи магістра

Запропоновані рішення та рекомендації оцінки гранулометричного складу коксу та характеристик його геометричних форм можна взяти за основу при розробці проєкту реконструкції коксосортувальні на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», а розглянуті питання властивостей коксу різного гранулометричного складу взяти за основу для подальших досліджень.

Оцінка кваліфікаційної роботи **магістра** відмінно, 90, А

Керівник Десна Наталя Анатоліївна
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Доцент, к.т.н. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання) (підпис)

« 20 » 01 2026 р.

*Примітка. Бланк друкується з обох сторін на одному аркуші.

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Беспалюк Тетяна Олександрівна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська робота *Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків* виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлена. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформована, що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлена з умовами такого розміщення.

20.01.2026

Д О В І Д К А
про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):
☒ кваліфікаційної роботи;
☐ навчальної/наукової праці;
☐ наукових матеріалів

Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків
(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

Беспалюк Тетяна Олександрівна
(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії
(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 78 сторінка друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 6,61 %.
При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадіння із:
☐ власними публікаціями;
☒ термінологією;
☒ посиланнями на літературу, праці вчених;
☐ посиланнями на законодавство;
☒ загальновживаними фразами.

Матеріали було розглянуто та рекомендовано до *захисту в ЕК*
(подальшого розгляду, друку, опублікування)
на засіданні *кафедри Хімічних технологій та інженерії*
(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)
Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від *« 14 » січня 2026 р.* протокол № *9*.

Керівник підрозділу _____ К. Шмельцер
(підпис)

Дата *«14» січня 2026 р.*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра **Хімічних технологій та інженерії**

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
(бакалавра, магістра)

Здобувача Беспалюк Тетяни Олександрівни
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи ХТ-24м

Тема кваліфікаційної роботи магістра
(бакалавра, магістра)
Дослідження розподілу якісних характеристик та технологічних властивостей коксу в залежності від розміру його шматків

Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи магістра
(бакалавра, магістра)
Розподіл властивостей коксу за класами крупності та вибір оптимального класу для роботи доменної печі

Переваги кваліфікаційної роботи магістра
(бакалавра, магістра)
Проаналізовані дослідження з механічних властивостей коксу та післяреакційної міцності коксу різного розміру шматків. Показаний оптимальний розмір шматків для ефективної роботи доменної печі. Запропоновані способи визначення розміру шматків коксу та його геометричних форм.

Недоліки кваліфікаційної роботи магістра
(бакалавра, магістра)
Недостатньо інформації про запропоновані технологічні схеми дроблення великих класів крупності коксу та ефективності промислового їх застосування.

Рекомендації: робота може бути рекомендована до захисту.

Рецензент
(прізвище, ім'я та по-батькові)

(посада, науковий ступінь, вчене звання) (підпис)