

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

Тесленко Сергія Ігоровича

на тему Вдосконалення виробництва коксу шляхом використання технології трамбування вугільної шихти

за матеріалами КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

науковий керівник

к.т.н.



Шмельцер К.О.

(підпис)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 14.01.2025 р. № 8

Завідувач кафедри



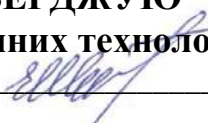
(підпис)

к.т.н., доцент

К.О. Шмельцер

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**

(підпис) доцент, к.т.н.
Шмельцер К.О.
(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)
« 15 » січня 2025 року

ЗАВДАННЯ



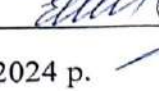

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Тесленко Сергію Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи магістра Вдосконалення виробництва коксу шляхом використання технології трамбування вугільної шихти
керівник кваліфікаційної роботи магістра Шмельцер Катерина Олегівна, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу №796-ст від «21» листопада 2024 р.
2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 15.01.2025 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: Аналіз вугільної сировинної бази на прикладі КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; вимоги до якості коксу для доменної плавки; огляд перспективних технологічних прийомів для вдосконалення підготовки вугілля для коксування. Спеціальні технології підготовки вугільної сировини (трамбування, сушка, термічна підготовка)
 - 4.2 Основна частина: Вибір та обґрунтування технології трамбування для розширення сировинної бази коксування та поліпшення якості коксу для доменної плавки. Конструкційні особливості устаткування. Основні параметри процесу. Вплив на якісні характеристики коксу. Укрупнені розрахунки економічної доцільності запропонованої технології
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	Шмельцер К.О., зав.каф.		
2 Основна частина	Шмельцер К.О., зав.каф.		

7. Дата видачі завдання «15» листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	29.11.2024	
2.	Основна частина	20.12.2024	
3.	Оформлення пояснювальної записки	27.12.2024	
4.	Подання роботи до кафедри	15.01.2025	
5.	Захист роботи в ЕК	21.01.2025	

Здобувач


 (підпис)

Тесленко С.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Шмельцер К.О.

(прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

Тесленко С.І. Вдосконалення виробництва коксу шляхом використання технології трамбування вугільної шихти. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія». Державний університет економіки і технологій. Кривий Ріг, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена вдосконаленню технології вуглепідготовки шляхом трамбування вугільної шихти.

В роботі сформульовані вимоги до якості коксу в умовах інтенсифікації та вдосконалення процесу доменної плавки.

Зазначено, що технологія коксування трамбованих шихт дозволяє істотно скоротити в шихті частку добреспікливого вугілля і використовувати шихти, марочний склад яких максимально наближений до балансу ресурсів вугілля в надрах Донецького басейну.

Проаналізовано досвід реалізації проекту ДП «ГПРОКОКС» і компанії NuDe переведення діючої коксової батареї з гравітаційного способу завантаження коксових печей на технологію трамбованого завантаження вугільного пирога. Прийняті рішення дозволили реалізувати проект з максимальним збереженням існуючої інфраструктури і мінімальним набором додаткових об'єктів. При цьому збережена можливість роботи з використанням верхнього завантаження коксових батарей за традиційною технологією, в разі зміни умов сировинної бази для коксування.

Показано, що технологія завантаження трамбованої вугільної шихти забезпечує отримання високоякісного доменного коксу при використанні у вугільній шихті до 70% газового і низькоспікливого вугілля. При цьому якість виробленого металургійного коксу покращується в порівнянні з коксом, отриманим за традиційною технологією. Так, механічна міцність M_{25} збільшилася в середньому на 2,2%, показник CSR на 5,0 %, тоді як середні показники M_{10} та CRI, навпаки, зменшилися на 2,01 та 0,2 % відповідно. Також кокс, отриманий методом

трамбування шихти, характеризується нижчими значеннями зольності (0,3%) і вмісту загальної сірки (0,1%).

В кваліфікаційній роботі доведено, що використання технології трамбування також дозволяє знизити вартість вугільної шихти на \$32,5/тону. Враховуючи значну різницю у вартості гравітаційної та трамбованої вугільної шихти, термін окупності інвестицій, необхідних для реконструкції, становить менше 1 року.

Ключові слова: вугілля, шихта, газове вугілля, трамбування, якість коксу.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Функції коксу та характеристики його якості	10
1.2 Формування властивостей коксу	12
1.3 Вплив технологічних параметрів вугільної сировини на якість коксу	19
1.4 Аналіз сировинної бази коксування коксохімічних підприємств України	25
1.5 Огляд перспективних технологічних прийомів для вдосконалення підготовки вугілля для коксування	28
1.5.1 Технологія подрібнення вугільної сировини	28
1.5.2 Спеціальні технології підготовки вугільної сировини (трамбування, сушка, термічна підготовка)	32
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	42
2.1 Вибір та обґрунтування технології трамбування (ущільнення) вугільної шихти	42
2.2 Теорія і практика виробництва доменного коксу високої якості з трамбованих шихт зниженої спікливості	45
2.2.1 Вплив технологічних чинників на міцність коксу і вихід продуктів коксування з трамбованої шихти	45
2.2.2. Досвід впровадження технології в умовах діючого коксохімічного виробництва	57
2.3 Економічне обґрунтування запропонованих рішень	67
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73

ВСТУП

Проблема якості коксу змінює ключову роль в роботі доменних печей - основного одержувача і споживача коксу. Кокс в доменному процесі виконує наступні функції: постачальника енергії (забезпечує процес теплом), хімічного відновника (джерело відновлювальних газів і вуглецю для відновлення заліза) і фізичної підтримки (підтримка стовпа шихтових матеріалів, забезпечення потоку газу через пічну шихту і течії рідкого металу в нижній частині печі). Динамічний технологічний розвиток металургійної промисловості, що спостерігається в останні десятиліття, в тому числі експлуатація доменних печей зі зростаючим об'ємом і використання альтернативних видів палива (пиловугільного палива, рідкого палива і природного газу), призвів до підвищення важливості фізичної ролі коксу і, як наслідок, вимог до його міцнісних параметрів періодичної дії.

Якість коксу залежить як від компонентного складу вугільної шихти, так й від технології підготовки вугільних концентратів до процесу коксування за такими показниками, як: гранулометричний склад, насипна густина, вологість, вихідна температура вугільної маси.

Досягнення необхідних показників якості коксу вимагає використання великої кількості коксівного вугілля найвищої якості у вугільній шихті, що значно підвищує собівартість одиниці продукції. Приблизно 75% цих витрат складають витрати на підготовку вугільної шихти. Загалом, на світовому ринку спостерігається дефіцит коксового вугілля найкращої якості. Коксове вугілля більш ніж на 50% дорожче за низькосортне. Враховуючи вищевикладене, доцільним є проведення досліджень з оптимізації виробництва доменного коксу з використанням спеціальних технологій.

Технологіями, що дозволяють істотно скоротити в шихті частку добреспіктивного вугілля і використовувати шихти, марочний склад яких максимально наближений до балансу ресурсів вугілля в надрах Донецького

басейну, є технологія коксування трамбованих шихт, технологія коксування сухої шихти і технологія коксування термічно підготовлених шихт.

Відомо, що технологія трамбування (ущільнення) вугільної шихти дозволяє істотно знизити частку вугілля, що добре спікається, в шихті. Для традиційного процесу коксування (коксові печі з гравітаційним завантаженням) необхідно використовувати не менше 65% добре спікливого вугілля в шихті. При коксуванні трамбованої шихти цей показник знижується приблизно вдвічі. Отже, впровадження даної технології є перспективною для коксохімічних підприємств у сучасних сировинних умовах.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Функції коксу та вимоги до його якості

Найважливішим напрямком вдосконалення технології доменної плавки, яке й досі залишається актуальним та повинно випереджати в своєму розвитку всі інші – це забезпечення доменних печей високоякісними шихтовими матеріалами та перш за все коксом.

Оскільки кокс являється найбільш дорогою складовою шихти для виплавки чавуну, то задача зменшення його витрати завжди актуальна.

Вирішення її здійснюється за двома напрямками:

- скорочення теплоспоживання плавки за рахунок підготовки шихти та організації технології;

- заміщення коксу менш дорогими енергоносіями.

Ефективність другого з указаних напрямків залежить від властивостей енергоносія та його вартості, а реалізація завжди пов'язана з необхідністю використання першого напрямку [1-3].

В доменній плавці кокс виконує функції комплексного енерго-технологічного матеріалу. У процесах його перетворень у фурм виділяється основна частина необхідної для процесів плавки теплоти і утворюється основна частина відновлювального газу, до якого в горизонтах вище додається додаткова частина газу від прямого відновлення. Крім зазначених енергетичних функцій кокс виконує функцію твердого насаду в зоні розм'якшення та плавлення залізовмісних матеріалів, що забезпечує протитечію шихти та газів у печі, а також функцію регулятора газорозподілу по площі поперечного перерізу агрегату. У зв'язку з цим до якості коксу і висуваються високі вимоги.

Якість коксу є одним із головних параметрів, що визначають хід та результати доменної плавки. Існуючі методи оцінки властивостей коксу зумовлені вимогами доменного процесу, і характеризують його такими

показниками: для верхньої зони печі – гранулометричний склад, дробимість, стиранність (M_{25} , M_{40} , M_{10} , I_{40} , I_{10} , а також тести ASTM на стабільність та твердість); для високотемпературної зони – реакційна здатність CRI та післяреакційна міцність CSR; сталість хімічного складу.

Отже, вимоги можуть бути сформульовані так: за хімічним складом кокс повинен містити максимальну кількість вуглецю, а також мінімальну кількість золи та сірки. За ситовим (гранулометричним) складом кокс повинен бути однорідним по крупності, мати мінімальний вміст дрібних (менше 25 мм) і крупних (більше 80 мм) фракцій, мати високу міцність у холодному та гарячому станах.

У процесі підготовки шихти до коксування їй необхідно надати такі властивості, які дозволяють отримати з неї кокс, який відповідає вимогам споживача. Так як кокс в доменній печі виконує цілий ряд важливих технологічних функцій, будучи паливом, твердим відновником і вихідним матеріалом для отримання газоподібного відновника, розпушувачем стовпа шихтових матеріалів, що забезпечує його газопроникність, дренажним шаром для рідких продуктів плавки, вимоги до його якості дуже різноманітні. Вони стосуються хімічних, фізико-механічних, механічних, фізико-хімічних властивостей.

Міцний пористий кокс розпушує дрібні шихти, покращуючи їх газопроникність. Слабкий в механічному відношенні кокс створює загрозу засмічення горна коксовим пилом, погіршує сход шихти в печі, знижуючи її газопроникність. Поряд з основними технологічними функціями коксу в доменній плавці, а саме, – енергоносій, відновник і розпушувач, – останнім часом виділяють додаткові дві: адсорбент (збирач пилу і газоподібних продуктів в фурменій зони) і джерело дріб'язку, знижує плинність шлаку, а отже, і газопроникність стовпа шихтових матеріалів доменної печі [1-4].

Технологія виплавки чавуну безперервно вдосконалюється. Одним з найбільш перспективних напрямів є впровадження у виробництво нових технологічних процесів та устаткування, а також зниження витрат, передусім

паливно-енергетичних ресурсів на виробництво основних видів продукції. В доменній плавці до таких високоефективних технологій відносяться вдування пиловугільного палива (ПВП) у кількості до 250 кг/т чавуну і технологія використання кускового антрациту в кількості до 90 кг/т чавуну з коефіцієнтом заміни коксу 0,8-1,0 кг/кг [5,6]. Застосування нових технологій вимагає, насамперед, випереджаючого підвищення якості коксу, що характеризується низкою показників.

В даний час основними показниками, які найбільш повно характеризують сукупність властивостей коксу для доменної плавки, є: робоча вологість, вміст загальної сірки, зольність, вихід летких речовин, дробимість (M_{25}), стиранність (M_{10}), реакційна здатність (CRI) і після реакційна міцність (CSR), а також масова частка кусків коксу розміром більше 80 мм і менше 25 мм [1].

1.2 Формування властивостей коксу

Зольність коксу характеризує вміст в ньому мінеральних речовин, баластних або шкідливих для доменного процесу. Наявність мінеральних домішок знижує вміст карбону, крім того, неоднорідність будови коксу і вміст мінеральних домішок, представляючи собою джерело тріщинуватості, при нагріванні значно впливають на структуру коксу. Істотний вплив робить велике подрібнення мінералізованих частинок через розвиток додаткових місцевих тріщин, обумовлених цими включеннями [5].

Зі збільшенням зольності коксу в доменну піч вноситься додаткова кількість цих речовин, які займають певний обсяг та потребують додаткових витрат теплоти для здійснення фазових і термохімічних перетворень. Тому наслідком є зростання витрати коксу і зменшення продуктивності. Згідно з нормативами зростання зольності коксу на 1 % призводить до збільшення витрати коксу на 1,3 % та зменшення продуктивності доменної печі на таку ж саму величину. За результатів коксування видно, що збільшення зольності

шихти погіршує властивості міцності доменного коксу. У другому досвіді, незважаючи на кращу спікливість шихти ($y = 15,1$ мм), кокс зольністю $A^d = 12,1$ % має гіршу міцність по параметру M_{10} (9,1 %) [6].

На зольність отриманого коксу впливають наступні основні фактори: зольність вихідного вугілля; термохімічні перетворення різних мінеральних речовин при коксуванні; вихід коксу із шихти; кінцева температура коксування (готовність коксу); умови видачі і позапічної обробки коксу; зовнішні джерела мінеральних речовин, що вносяться в шихту і кокс [3].

Важливим елементом коксу є сірка, вона є найшкідливішим компонентом, який вноситься з коксом в доменну піч. В сплавах заліза сірка входить до складу сульфїду заліза, що, в свою чергу, утворює із залізом евтектичну суміш. Ця суміш починає плавитися при температурах червоного каління та призводить до червоноламкості металевих виробів. При збільшенні кількості сірки, яка надходить з коксом в доменну піч, потрібна додаткова кількість флюсів для хімічного зв'язування хоча б частини її. Наслідком цього є зростання витрати коксу та зниження продуктивності. Згідно з нормативами, збільшення сірчистості коксу на 0,1 % призводить до зростання його витрати на 0,3 % та до зменшення на таку ж величину продуктивності домни. Крім того, погіршується якість чавуну [5].

На сірчистість отриманого коксу впливають наступні основні фактори: сірчистість вихідного вугілля; термохімічні перетворення сірковмісних речовин вугілля при коксуванні; вихід коксу із шихти; кінцева температура коксування (готовність коксу); умови видачі і позапічної обробки коксу; зовнішні джерела сірковмісних речовин, що вносяться в шихту і кокс.

Різні види сірчаних сполук у вугіллі і їх термохімічні перетворення є одним з найважливіших факторів, що впливають на рівень сірчистості коксу і коефіцієнт знесірчування [3].

Волога коксу є баластом, який надходить в доменну піч. Цей баласт займає певний обсяг та потребує додаткової витрати тепла на випаровування. Внаслідок цього витрата коксу зростає, а продуктивність доменної печі

зменшується. Волога коксу визначається в основному способом і технологічними параметрами режиму його тушіння [3].

Вплив вологи шихти на фізико-механічні властивості коксу пояснюється як зміною умов теплопередачі у вугільній завантаженні по висоті коксового пирога на різних етапах її коксування, так і деяким зниженням готовності коксу у зв'язку із зміною температур через необхідність додаткового тепла на видалення баластної вологи [6].

Оптимальний рівень вологомісткості вугільної загрузки підвищує продуктивність коксової печі, якість коксу і рівність ходу печей.

Спеціалісти коксового виробництва і всьому світі прагнуть підтримувати оптимальний рівень вологи відповідно вимогам конкретного виробництва, технологічним режимам, якості цільового і побічних продуктів, технічному стану і віку коксових печей, умовам транспортних операцій. Тому важливо обирати такий рівень вологи, який задовольняв би найбільшу економічну вигоду, що оцінюється по показникам забруднення навколишнього середовища, утилізації енергії і іншим очікуваним результатам [7].

Показник виходу летких речовин - одна з основних характеристик, що застосовується як при поставці вугілля для коксування, так і при розробці складу вугільних шихт. Численними дослідженнями показано взаємозв'язок цього показника з виходом коксу і хімічних продуктів [8].

Вихід летких речовин з коксу характеризує його ступінь готовності, тобто завершеності процесів коксоутворення. Кокс з меншими значеннями виходу летких речовин має кращі технологічні властивості.

Фізичні властивості коксу взаємопов'язані зі структурою його речовини. Це - параметри надмолекулярної і макромолекулярної будови, густина, пористість, питомий електроопір, структурна міцність, абразивна міцність, теплотворна здатність, теплоємність і теплопровідність. Формування цієї групи властивостей відбувається під впливом як характеристик вихідної сировини, так і параметрів її переробки. Для отримання коксу з необхідними

фізичними властивостями сировина для його отримання повинно володіти визначеною спікливістю – здатністю суміші вугільних зерен утворювати при нагріванні без доступу повітря спечений або сплавлений твердий залишок [8]. Кількісно спікливість в вітчизняній виробничій і науковій практиці частіше всього характеризується товщиною пластичного шару u , мм.

Фізико-механічні властивості коксу характеризують в першу чергу його механічну міцність і гранулометричний склад.

Крупність і механічна міцність коксу відображають вплив усіх генетичних і технологічних факторів його виробництва: складу і властивостей вугільних шихт, їх підготовки, умов коксування, гасіння та сортування. Вони багато в чому визначають роботу доменних печей, а також усіх інших споживачів і, отже, є найбільш важливими показниками якості коксу. Для їх оцінки у постачальника і споживача вибрані і використовуються наступні показники: зольність, вологість, гранулометричний склад і механічна міцність. Наприкінці 20 - століття до названих властивостей додалася реакційна здатність [1,9].

Однією з найважливіших властивостей коксу є механічна міцність, під якою мається на увазі здатність його кусків протистояти подрібнюючому та стираючому впливам. Мірою механічної міцності є ступінь зміни гранулометричного складу коксу в процесі його випробування шляхом накладення нормованих зусиль. Зазвичай випробування здійснюють в барабанах різної конструкції і полягає в тому, що проба коксу, поміщена всередину барабану, при його обертанні пересипається і піддається дробленню і стиранню.

Показником міцності є кількість коксу розміром кусків > 25 мм (M_{25}) і < 10 мм (M_{10}). Показник M_{25} для коксу змінюється в межах 83 - 90 %. Показник M_{10} становить 6 - 10 %.

Інший різновид механічної міцності - міцність пористого тіла коксу, тобто матеріалу його кусків, позбавленого тріщин, називається ще структурною міцністю. Визначається вона за методикою Грязнова в приладі,

головною робочою частиною якого є циліндри. У них поміщаються проби коксу обсягом 50 см^3 і крупністю 3 - 6 мм та п'ять сталевих куль діаметром 15 мм. Циліндри приводять в обертання електродвигуни через редуктор зі швидкістю 25 об/хв протягом 40 хв. Показником структурної міцності є масова частка класів розміром $> 1 \text{ мм}$ у відсотках. Міцність пористого тіла коксу залежить від його мікроструктури.

Металургійний кокс являє собою сукупність кусків різного розміру і форм, тому для його характеристики застосовують поняття гранулометричний склад, тобто масову частку у відсотках різних класів по крупності. Для визначення гранулометричного складу коксу виробляють аналіз його проби загальною масою 300 кг шляхом розсіву її на ситах з квадратними отворами 6×6 , 10×10 , 25×25 , 40×40 , 60×60 , $80 \times 80 \text{ мм}$.

Якість доменного коксу погіршується при вмісті в ньому кусків розміром > 80 і $< 25 \text{ мм}$, тому показником його якості може вважатися коефіцієнт рівномірності гранулометричного складу як частка від ділення масової частки кусків розмірів, що знаходяться в межах 25 - 80 мм, на масову частку кусків крупністю > 80 і $< 25 \text{ мм}$ [10].

До фізико-хімічних властивостей коксу відносяться такі його характеристики, які визначають здатність кускового матеріалу до гетерогенних хімічних взаємодій. Серед них найбільше значення має реакційна здатність, тобто здатність до взаємодії вуглецю коксу з компонентами дуття з утворенням відновлених газів для непрямого відновлення заліза – основного процесу доменної плавки.

В сучасних умовах (наявність комбінованого дуття) кількість газифікованого коксу зростає. В шахті доменної печі при визначених температурах починає розвиватися небажаний процес прямого відновлення оксидів заліза [1-3].

Для того, щоб якнайбільша частина коксу доходила до зони фурм, він повинен мати невелику реакційну здатність та достатню міцність в умовах впливу високих температур та газоподібних окислювачів. Чим менша

реакційна здатність коксу, тим нижче його витрати на пряме відновлення і тим більша його кількість спалюється у фурм з утворенням потім відновлених газів. Це дасть можливість зменшити витрату коксу за рахунок використання його замінників, поліпшити використання корисного обсягу доменної печі та підвищити її продуктивність. При оцінці впливу на роботу доменних печей показників індексу реакційної здатності (CRI) та міцності залишку коксу після реакції (CSR) слід мати на увазі, що для їх покращення (зменшення реакційної здатності та збільшення післяреакційної міцності) слід зменшувати зольність та сірчистість коксу і шихти, з якої він отриманий. Ці показники вже враховані в нормативах витрати коксу.

Однак при загальній тенденції у відношенні вимог до доменного коксу по зниженню реакційної здатності вона не повинна знижуватися нижче певної межі. Кокс все ж таки повинен володіти певною мінімально необхідною реакційною здатністю при високих температурах, при якій вуглекислий газ і водяні пари в горні повністю регенеруються.

Важливим для характеристики властивостей вугілля і шихт є також показник середньої відбивної здатності вітриніту за даними петрографічного аналізу. Є певний взаємозв'язок цього показника з виходом летких речовин. Однак відбивна здатність вугілля і шихт більш тісно пов'язана з міцністю одержуваного з них коксу, так як петрографічні показники за своєю суттю характеризують природу вугілля з точки зору як характеристик вихідного вуглеутворюючого матеріалу, так і глибини протікання геологічних процесів. Зокрема, найбільш міцний кокс виходить, як правило, з вугілля Донбасу і шихт на їх основі з величиною відбивної здатності близько 1 - 1,2 %.

Основними показниками, що характеризують властивості шихти, являються товщина пластичного шару і середній показник відбиття вітриніту [3].

Основними факторами технології коксування і позапічної обробки, що впливають на властивості коксу, є: період коксування, рівень температур в контрольних вертикалах, рівномірність прогріву коксованого насипу по

всьому об'єму, насамперед по висоті, а також по довжині в зонах навпроти голівочних вертикалів, кінцева температура коксового пирогу, режими гасіння та сортування коксу.

При правильній експлуатації зміна періоду коксування тягне за собою відповідні зміни (зниження при подовженні і підвищення при зменшенні) рівня заданих температур в контрольних вертикалах. Раціональна розстановка регулювальних засобів в опалювальній системі коксових батарей і використання вікон рециркуляції продуктів горіння дозволяють забезпечити задовільну рівномірність прогріву коксованого насипу по висоті. Рівномірність прогрівання по довжині в зоні навпроти середнього завантажувального люка забезпечується деяким (на 5 - 15 °С) підвищенням температури у вертикалах цієї зони. Рівномірність прогріву і зони навпроти голівочних вертикалів досягається при використанні спеціальних пристроїв для підведення повітря і бідного опалювального газу в крайні і перед крайні опалювальні канали коксових печей. Всі ці заходи дозволяють при будь-якому періоді коксування забезпечувати середню кінцеву температуру по всьому об'єму коксового пирога в рекомендованому ПТО інтервалі 1000 - 1100 °С.

Режими гасіння коксу на підприємствах, як правило, витримуються постійними (витрати води на гасіння, тривалість її подачі, час відстою коксу у вагоні під вежею, тривалість витримування коксу на рампі). Також постійним є і технологічний режим сортування коксу. Для стабілізації властивостей коксу застосовується ряд технічних рішень ударні плити для механічної обробки коксу в потоці, дробарки, пристрій для зниження засміченості доменного коксу. Таким чином, основним показником, що характеризує умови коксування, є тривалість періоду коксування [9,11-13].

Отже основними показниками, що визначають комплекс споживчих властивостей доменного коксу, є його речовий склад, механічні характеристики і реакційна здатність. В свою чергу, ці властивості формуються під впливом характеристик вугільної сировини (речового складу, спікливості, петрографічних характеристик) і режиму коксування, для якого

визначальною величиною є тривалість періоду коксування, при правильній експлуатації коксових печей визначає практично всі значущі технологічні параметри [10].

У зв'язку з істотним погіршенням сировинної бази коксування актуальними видаються розробка і застосування об'єктивного методу підбору шихт для коксування і прогнозу якості коксу. При цьому слід враховувати різноманітність марочного складу і властивостей використовуваних для коксування вугілля, що обумовлюється великою їх відмінністю за ступенем метаморфізму, петрографічного складу і ступенем відновленості. Тільки з урахуванням усіх цих генетичних параметрів вугілля в моделі складання вугільних шихт можна розраховувати на об'єктивну оцінку і правильний прогноз їх коксівності.

1.3 Вплив технологічних параметрів вугільної сировини на якість коксу

Для грамотного, науково-обґрунтованого використання вугільних запасів в сучасних технологічних процесах їх переробки необхідно знати індивідуальні особливості кожного з них в залежності від природи, басейнової належності, ступеню зрілості и т. п.

Однією з головних задач в області утворення надійної вугільної сировинної бази для коксування є раціональне використання запасів спікливого вугілля, яке має Україна.

В промислових класифікаціях вугілля приймаються, як правило, ті параметри, які в більшій мірі визначають можливість та ефективність використання їх в різноманітних галузях народного господарства. В державних стандартах визначені різні вимоги вуглеспоживаючих галузей народного господарства по наступним показникам властивостей, особливе значення мають: зольність, вологість, сірчистість, вихід летючих речовин і

товщина пластичного шару, усереднення вугілля. Розглянемо вплив перерахованих факторів на властивості.

При складанні вугільних шихт, як зазначалося, також необхідно враховувати і технологічні властивості компонентів, які оцінюються показниками технічного аналізу.

Показник виходу летких речовин характеризує структурні особливості вугілля. Одна з основних характеристик, що застосовується при постачанні вугілля для коксування та розробки складів вугільних шихт. У той самий час може бути близьким чи однаковим у вугілля та його сумішей, які мають різні технологічні властивості [14].

Зольність – побічно характеризує кількість неорганічної субстанції вугілля. На зольність отриманого коксу впливають такі фактори: зольність вихідного вугілля; термoxiмічні перетворення різних мінеральних речовин під час коксування; вихід коксу із шихти; кінцева температура коксування (готовність коксу); умови видачі та післяпiчної обробки коксу.

Підвищення зольності вугільної сировини негативно впливає на фізико-механічні властивості отриманого з нього коксу: підвищує його тріщину, знижує крупність і опір дробленню і стиранню [10, 12].

Наявність мінеральних речовин у коксі знижує теплоту його згоряння та потребує додаткової витрати тепла на ошлакування. Це викликає підвищення витрати коксу та флюсів в доменній плавці, знижуючи рудне завантаження печі і, отже, зменшуючи її продуктивність. При оцінці впливу золи на механічну міцність коксу слід враховувати дисперсність частинок золи у вугіллі [15].

Висока зольність означає збільшений вихід шлаку та зниження продуктивності доменної печі. Відповідно до [16, 17] зменшення зольності коксу (A^d , %) на кожен 1% знижує витрату коксу на 1,3%, на таку ж величину збільшуючи продуктивність доменної печі.

Дослідженнями, проведеними як у нас в країні, так і за кордоном [4, 15, 18, 19], показано, що властивості компонентів мінеральної частини вугілля і

хімічний склад золи, характеризуються через комплексний показник – індекс основності, тобто співвідношення основних (Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O) та кислих (SiO_2 , Al_2O_3) оксидів (формули 1.1 і 1.2), здійснює максимальний вплив на рівень реакційної здатності коксу.

$$I_0 = \frac{100A^d(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})}{(100 - V^{\text{daf}})(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}, \quad (1.1)$$

або

$$I_0 = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}. \quad (1.2)$$

У роботі [10] проаналізовано математичні моделі прогнозу термохімічних властивостей коксу з урахуванням характеристики мінеральної сировини. Наводяться дані про те, що вплив оксидів металів і лужних металів на CSR коксу різний і його ступінь можна охарактеризувати, розташувавши компоненти таким чином $\text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$. Аналогічні висновки зроблено авторами статті [20], в якій вони наводять варіант індексу основності, що враховує ступінь впливу оксидів через зважені значення, отримані при обробці експериментальних результатів легування мінералів:

$$MMCI = \frac{100A^d(\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.03\text{CaO} + 0.43\text{MgO} + 2.85\text{Na}_2\text{O} + 2.34\text{BaO} + 1.9\text{K}_2\text{O})}{\text{SiO}_2 + 0.74\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (1.3)$$

Для отримання коксу покращеної якості необхідно використовувати сировину з певним лужно-кислотним співвідношенням оксидів у золі. Так, у чисельному вираженні індекс основності не повинен перевищувати $I_0 < 2,5$.

Українські концентрати порівняно з американськими та австралійськими характеризуються вищим вмістом Fe_2O_3 у золі вугілля, і, внаслідок цього високими значеннями I_0 .

В роботі [21] зазначається, що як компоненти мінеральної фази, які впливають на зміну реакційної здатності досліджуваних коксів, найбільший вплив мають металеве залізо, сульфіди заліза та оксиди заліза.

Вплив на реакційну здатність сірки слід розглядати диференційовано, оскільки сірка у вугіллі перебуває у складі мінеральних і органічних сполук, тобто у чотирьох основних формах – піритна, сульфатна, органічна, елементарна [5, 22].

Сульфатна сірка обумовлена переважно наявністю в мінеральній частині вугілля сульфатів різних металів. Ці сульфати, як правило, термічно стійкі, і тому при коксуванні сульфатна сірка практично не зазнає термохімічних перетворень і повністю переходить у кокс. Сульфатна та елементарна сірка у сумі практично не перевищують 1 % від загальної кількості сірки, тому їх вплив на руйнування коксу не розглядається.

Термохімічні перетворення органічної сірки залежать від розташування атомів сірки в макромолекулі вугільної речовини. Якщо атом сірки розташований у боковому ланцюзі, то при руйнуванні цього ланцюга в процесі термохімічної деструкції вугілля сірка перетворюється на низькомолекулярні парогазові продукти. Якщо атом сірки розташований усередині гетероароматичної структури, то разом з цією структурою він утворює високомолекулярний твердофазний продукт деструкції. Більшість атомів сірки входить до складу гетероароматичних структур, тому органічна сірка переважно переходить у кокс. Органічна сірка коксу представлена в основному у вигляді сульфідних, дисульфідних, бістіоефірних, тіонних та тіофенових угруповань, які є термічно стійкими і практично повністю доходять до нижніх горизонтів доменної печі, не впливаючи на руйнування коксу [21-23].

Піритна сірка при коксуванні переходить у кокс та парогазові продукти приблизно в рівному співвідношенні. Пірит у відновлювальному середовищі реагує з воднем, в результаті один атом сірки утворює сульфід, інший - сірководень. Сульфідна сірка значно впливає на міцність коксу, викликаючи

його руйнування в доменній печі. Сульфід заліза розпадається на залізо та сірку, яка випаровується. При випаровуванні сірка витісняє з пор коксу шлаки. В результаті послаблюється структура коксу, простір, в якому містилися сульфідні та шлаки стає доступним для CO_2 , що призводить до збільшення швидкості газифікації та прискорює руйнування коксу [24-27].

В ДП «УХІН» [24-27] розроблена методика, за якою CRI коксу з вугілля з підвищеним вмістом піриту розраховують за рівнянням:

$$\text{CRI} = 14,2 + 12,4 \cdot S_t^d + 0,376 \cdot V^{\text{daf}}, \quad (1.4)$$

де $S_t^d > 1\%$ – масова частка загальної сірки; V^{daf} – вихід летких речовин на суху беззолну масу, %.

Використання цієї моделі дуже привабливе, оскільки прогнозуючи параметри S_t^d та V^{daf} вимірюють у кожен змін при аналізі вугільної шихти, проте область використання цієї моделі обмежена лише вугіллям з високим вмістом піриту.

На думку авторів [16, 27] прийняття рішення про можливість використання тієї чи іншої марки вугілля у складі шихти для коксування має ґрунтуватися на значенні показників відбивної здатності вітриніту та максимальної плинності за Гізелером, які є двома найбільш важливими властивостями вугілля.

Пластичність вугільних сумішей при піролізі визначається співвідношенням та взаємним розподілом компонентів. Так, плинність по Гізелеру зменшується зі збільшенням вмісту в суміші неспікливого або слабоспікливого вугілля. Крім того, плинність має тенденцію до зменшення зі зменшенням розміру частинок неспікливого або слабоспікливого вугілля у вугільних сумішах [28].

Властивості пластичних мас та характер перебігу процесу спікання має свої особливості залежно від ступеня метаморфізму. Малометаморфізоване вугілля при термічному розкладанні утворює рідиннофазні продукти, що

відрізняються невисокою термічною стійкістю та низькою пластифікуючою дією. Пластична маса вугілля середньої стадії метаморфізму більш однорідна за складом, містить меншу кількість низькомолекулярних компонентів, а рідиннофазні компоненти виявляють добре виражену пластифікуючу дію [29].

При змішуванні вугілля, яке переходить у пластичний стан при різних температурах, температурні межі пластичного стану сумішей виявляються проміжними по відношенню до температурних меж пластичного стану компонентів [30].

За даними [9], вивчення з використанням протонного магнітного резонансу термопластичної поведінки 78 бінарних сумішей австралійського коксівного вугілля показало, що пластичні властивості суміші описуються закономірністю, близькою до адитивної. Зміна термопластичної поведінки вугілля в суміші пов'язана з їх взаємним впливом, перенесенням пластифікуючих летких речовин між вугіллям, взаємодією та рекомбінацією нестабільних радикалів, які утворилися внаслідок деструкції макромолекул. Утворення нових рідких продуктів, перехід у пластичний стан супроводжується перебігом реакцій водневого обміну [9, 30].

Аналіз результатів досліджень показав, що вугілля, що переходить у пластичний стан при температурі нижче 360 °С, імовірно, суттєво не впливає на плинність суміші. Висловлено припущення, що ліптиніт, відрізняючись від вітриніту нижчим ступенем ароматичності, при термічній деструкції утворює рідкі продукти з більш високими плинністю і спікливою, але більш вузькими інтервалами перебування в пластичному стані, тому відіграє меншу роль при взаємодії всіх компонентів при термічній переробці, чим продукти утворені вітринітом та інертинітом [9].

Враховуючи, що від природи, ступеня метаморфізму, перетворення органічної маси вугілля змінюється їх поведінка при коксуванні важливою умовою оптимізації вільного спікання вугільних сумішей є накладання температурних інтервалів пластичного стану компонентів. Повний або частковий збіг температурних інтервалів пластичного стану дозволяє досягти

кращого контакту залишкового матеріалу вугільних зерен та їхньої спільної поліконденсації при спіканні, тобто забезпечити безперервність пластичного стану шихти загалом. Якщо температурні інтервали пластичного стану компонентів не співпадають, то вільні зв'язки одного компонента, що утворюються, не можуть бути насичені вільними валентностями молекул на поверхні інших компонентів шихти і вони замикаються в молекулах усередині вугільних зерен [18, 30].

При складанні багатокомпонентних шихт необхідно поєднувати добреспікливе вугілля, що забезпечують утворення рідинно-рухливої пластичної маси, з опіснюючими компонентами, що підвищують в'язкість пластичної маси і сприяють отриманню крупного і міцного коксу. Збільшувати кількість компонентів у вугільних сумішах необхідно за рахунок вугілля з проміжними властивостями [5, 30].

Залучення проміжних компонентів має особливе значення при введенні в шихту газового вугілля. Їх введення в шихту сприяє отриманню більш рівномірного за крупності коксу [30].

Практика роботи коксохімічних підприємств України показує, що для отримання коксу з високими показниками механічної міцності $M_{25} = 87-89 \%$, $M_{10} = 6,5-7 \%$, зольністю $A^d \leq 11 \%$, вмістом сірки $S_t^d \leq 1,00 \%$, $CSR - 65-70 \%$, $CRI - 25-30 \%$ необхідно забезпечити наступну якість вугільної шихти: $A^d \leq 8,4 \%$, $S_t^d \leq 1,10 \%$, $V^{daf} \leq 27-28 \%$, показник відбиття вітриніту $R_0 \geq 1 \%$, спікливість $y = 16-18 \text{ мм}$, індекс основності $I_0 < 2,5$ [5].

1.4 Аналіз сучасного стану сировинної бази для виробництва високоякісного металургійного коксу

Коксохімічне виробництво ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у своїй шихті використовувало 20,1% українського вугілля (в основному, марки К), власні активи вугілля Казахстану (21,8% марок К+КЖ+ПС), що підвищує зольність шихти в середньому на 1% та зольність коксу до 12% і більше. З

вугілля далекого зарубіжжя використовували 10% американського і 13,1% австралійського вугілля.

На українському вугіллі базувалися шихти Ясинівського та Макіївського коксохімічних заводів; на російському – заводів ПАТ «ЄВРАЗ ЮЖКОКС» та ПАТ «ЄВРАЗ ДМЗ», КХП ПАТ «Алчевський МК».

У табл.4 представлені для порівняння якісна характеристика шихт основних заводів України в порівнянні з усередненими даними коксохімічних підприємств ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ».

Таблиця 1.1

**Якісна характеристика шихт
коксохімічних заводів України**

Підприємство	W_t	A^d	S_t^d	V^{daf}	y, мм	Клас 0-3 мм
ПАТ «Ясинівський КХЗ»	9,9	7,4	0,8	28,6	14,3	84,0
ПрАТ «Макіївкокс»	10,3	8,0	1,22	31,5	14,8	82,5
КХП ПАТ «Алчевський МК»	9,5	8,4	0,85	30,4	17,3	79,4
ПАТ «ЄВРАЗ ЮЖКОКС»	9,1	8,0	0,5	28,7	14,4	82,0
ПАТ «ЄВРАЗ ДМЗ»	8,4	8,7	0,42	26,5	14,3	80,1
КХВ ПАТ «АрселорМиттал Кривой Рог»	8,6	8,8	0,73	29,9	17,0	80,6
ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»	9,0	8,2	0,84	30,3	16,0	79,6

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [22-24]

Необхідно відзначити, що вугільна сировинна база України є багатобасейною вже протягом багатьох років. Частка українського вугілля у шихтах має постійну динаміку до зменшення. Це пов'язано і з агресією рф і військовими діями, і з відпрацюванням вугільних пластів на глибині 600-700 м та переходом на більш глибокі горизонти (1200 м). Тому до складу шихт залучаються вугільні концентрати, які імпортуються з Чехії, Казахстану, США, Канади та Австралії.

При необхідності мати в шихті для традиційного коксування не менше 65 % вугілля, що добре спікається, його видобуток за даними [23] в Україні склав 26,8 % (марка Ж – 14,2 % і марка К – 12,6 %), хоча частка цього вугілля у запасах становить лише 10,4 % (відповідно 6,0 та 4,4 %). Тобто видобуток цього вугілля майже втричі перевищує його ресурси, хоча і за цих умов потрібний імпорт сировини. Частка газового вугілля ($y = 11-14$ мм) у запасах становить близько 60%, а в шихті для традиційного процесу коксування їх вміст не повинен перевищувати 15%.

У роботі [24] наводиться необхідний марочний склад шихти українських заводів та його фактичне забезпечення українським вугіллям (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

**Необхідний марочний склад та його
забезпеченість українським вугіллям**

Марочний склад	Вміст марки вугілля, %				Всього
	Г	Ж	К	ПС	
Необхідний	15,0	40,0	30,0	15,0	100,0
Забезпечений ресурсами	15,0	25,2	20,0	2,3	62,5
Дефіцит	-	14,8	10,0	12,7	37,5

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [24]

З наведених даних таблиці 1.2 видно, що вітчизняна потреба забезпечена лише вугіллям марки Г. Слід зазначити, що найбільш дефіцитною в Україні є марка ПС, частка якої в шихті замість необхідних 15 % становить 2,3 % [24].

Отже, ресурси українського вугілля для виробництва коксу, що відповідає світовим стандартам, обмежені. Дослідження вугілля діючого шахтного фонду України показали, що необхідні властивості є вугілля всього двох шахт: «ім. Скочинського» (марка Ж) та шахтоуправління «Покровське» (колишня шахта «Червоноармійська Західна №1», марка К). Виходячи з цього, стає очевидною необхідність залучення до сировинної бази коксування

підприємств України імпортного вугілля з низьким вмістом сірки та невисоким індексом основності [24, 25].

1.5 Огляд перспективних технологічних прийомів для вдосконалення підготовки вугілля для коксування

1.5.1 Технологія подрібнення вугільної сировини

Якість коксу залежить як від компонентного складу вугільної шихти, так й від технології підготовки вугільних концентратів до процесу коксування за такими показниками, як: гранулометричний склад, насипна густина, вологість. Технологічна схема вуглепідготовки визначається в залежності від характеристики вугілля, що застосовується для коксування, і необхідної якості коксу. При виборі схеми підготовки необхідно враховувати марочний склад шихти, зольність, коксівність, петрографічний склад і механічну міцність (дробимість) компонентів, що входять до неї, зміни сировинної бази в сучасних умовах. Тому важливим і актуальним завданням є застосування спеціальних способів підготовки вугільної сировини для коксування, що дасть можливість збільшити частку вітчизняного слабоспівливого газового вугілля у складі вугільних шихт.

На думку авторів [5,10] операція подрібнення є основною у технології підготовки шихт, оскільки спосіб та рівень подрібнення визначають найважливіші техніко-економічні показники коксохімічного виробництва – якості коксу та продуктивності коксових батарей.

Встановленим [5] є те, що рівень подрібнення вугільної шихти істотно впливає її технологічні властивості.

Зміна гранулометричного складу шихти призводить до коливань густини насипної маси вугільного завантаження, а також впливає на газопроникність пластичної маси, усадку коксового пирога і характер напруги

в процесі переходу напівкоксу в кокс, кількість і властивості рідинних, твердих і летких продуктів термічної деструкції та спікливість шихти [10].

Так, основний принцип раціональної підготовки вугілля подрібненням полягає у зниженні кількості крупних та дрібних класів у шихті для максимально можливого вирівнювання її речовинного складу та зольності за класами крупності [5].

На думку Діденка В.Є. [10] подрібнення вугілля перед коксуванням має забезпечити оптимальний гранулометричний склад вугільної шихти, який повинен поєднувати інтереси отримання коксу необхідної якості з максимальною насипною щільністю завантаження, яка забезпечить також підвищення спікливість шихти – високу рухливість пластичної вугільної маси і низьку її газопроникність.

У роботах [5, 10, 21] зазначається, що оптимальний вміст вугільних зерен крупністю $<0,5$ мм у шихті є 35%. При чому, бажано, щоб ці зерна мали добру спікливу здатність і рівномірно розподілялися навколо слабоспікливих зерен шихти.

Таким чином, з теорії та практики технології підготовки ТГК до коксування можна сформулювати основні принципи раціонального подрібнення вугілля: оптимальне розподілення органічної вугільної маси різної стадії метаморфізму за класами крупності шихти; досягнення гранулометричного складу шихти, що забезпечує максимально можливе збільшення насипної густини; подрібнювати слабоспікливе вугілля і мінералізовані зерна слід тонко, так як крупні мінералізовані зерна є джерелами місцевого напруження, яке знижує міцність коксу, тому верхня межа їх крупності не повинна перевищувати >3 мм, але при мінімально можливому утворенні пилу [5].

В умовах формування стійкої багатобасейнової сировинної бази коксування на коксохімічних підприємствах України необхідно, враховуючи відмінності технологічних властивостей вугілля (мацерального складу, рефлектограми вітринітової складової та показника відбиття вітриніту),

переходити від подрібнення всієї шихти (схема ДШ) до диференційованого (ДДК) або групового подрібнення компонентів. При цьому, перед подрібненням раціонально відсіяти дрібні класи як добреспікливого вугілля (клас 6-0 мм або 8-0 мм), так і слабоспікливого вугілля (клас 3-0 мм).

Автори роботи [22] на підставі вивчення властивостей вугілля, що використовується для коксування на українських коксохімічних заводах, розділили вугільні концентрати за показником дробимості на три категорії:

- тверді з показником індексу дробимості за Хардгровим 55-65 од. (все малометаморфізоване вугілля газової групи);
- м'які з показником індексу дробимості за Хардгровим 80 од. і більше (більшість вугілля середньої та високої стадій метаморфізму (Ж, К, КО, ПС) з вмістом вітринітової складової 70% і більше);
- вугілля проміжне з показником індексу дробимості 66-79 од.

Внаслідок встановлених відмінностей за величиною розмолодатності, зумовлених не тільки за рахунок різної стадії метаморфізму, а й за рахунок різного петрографічного складу, зроблено висновок про доцільність переходу на прогресивні схеми підготовки (ГДК, ДДК) вугільних шихт, що дозволяють уникнути, з одного боку, самоопіснення шихти, а з іншого – великої кількості центрів тріщиноутворення у доменному коксі [22].

Доцільність переходу на підготовку вугілля за схемою ГДК в умовах багатобасейнової сировинної бази коксування була підтверджена покращеними показниками фізико-механічних властивостей (механічна міцність, абразивна твердість, структурна міцність) коксу в умовах ВАТ «Алчевськкокс» [23].

Так, аналізуючи наведені у таблиці 1.3 результати, можна зробити висновок, що підготовка шихти за схемою ГДК у порівнянні зі схемою ДШ призводить до поліпшення якості коксу за показниками дробимості (П25) з 91,4 до 92,4%, стирання (П10) з 6,0 до 5,1 %, абразивної твердості за Гінсбургом (АТ) з 91,0 до 92,1 мг та структурної міцності за Грязновим (СП) з 87,0 до 87,3 %.

Таблиця 1.3

**Якісна характеристика коксів, отриманих методом
ящикових коксувань трамбованої шихти**

Варіант	Технічний аналіз, %			Вихід коксу, %	Вихід класів крупності (мм), %					Механічна міцність, %		Абразивна твердість, МГ	Структурна міцність, %
					+80	80-60	60-40	40-25	-25	П ₂₅	И ₁₀		
	A ^d	S ^d _t	V ^{daf}										
ДШ	9,7	0,69	1,1	74,9	-	35,7	50,1	8,8	5,5	91,4	6,0	87,0	91,0
ГДК	9,7	0,68	1,0	75,1	-	22,2	61,5	11,5	4,8	92,4	5,1	87,3	92,1

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [23]

Аналогічні результати кваліфікованого застосування схем підготовки вугілля на ВАТ «Ясинівський КХЗ» ілюструють дані роботи [24]. Автори зазначають, що при переході на схему ГДК з відсіванням дрібних класів витрата електроенергії на подрібнення скоротилася на 25-30 %. А дослідно-промислове використання у процесі підготовки шихти імпульсно-хвильового грохоту на ВАТ «Ясинівський КХЗ» призвело до помітного поліпшення показників дробимості M₂₅ (на 1 %) та стирання M₁₀ (на 0,3 %) коксу.

Вдосконалення технології підготовки в умовах багатобасейнової сировинної бази коксування шляхом використання для остаточного подрібнення вугілля схеми ГДК потребує організованого змішування компонентів вугільних шихт.

Однорідність технологічних властивостей вугільної шихти – важливий параметр, оскільки добре змішана шихта забезпечує однакові параметри пластичної зони при її переміщенні у вугільному завантаженні, впливає на перебіг усадкових явищ при утворенні напівкоксу, коксу, зумовлює сталість якості коксу та однорідність його структури.

Однорідність складу та властивостей вугільної шихти передбачає отримання однакових значень її параметрів у пробах, відібраних із будь-яких

точок об'єму завантаження [25]. За рахунок вирівнювання показників якості вугільної сировини в часі здійснюється перетворення короткочасних, але значних відхилень показників якості шихти на тривалі та незначні за величиною.

Підвищення рівномірності показників якості вугільної шихти для коксування дозволяє покращити умови експлуатації коксової батареї, стабілізувати показники якості коксу та збільшити вихід доменного коксу за рахунок підвищення його міцності.

1.5.2 Спеціальні технології підготовки вугільної сировини (трамбування, сушка, термічна підготовка)

Технологіями, що дозволяють істотно скоротити в шихті частку добреспікливого вугілля і використовувати шихти, марочний склад яких максимально наближений до балансу ресурсів вугілля в надрах Донецького басейну, є технологія коксування трамбованих шихт, технологія коксування сухої шихти і технологія коксування термічно підготовлених шихт.

У процесі трамбування вугільної шихти підвищення її насипної густини відбувається за рахунок взаємного ковзання зерен вугілля, їхньої переорієнтації та зближення. Насипна густина шихти, що завантажується в піч звичайним способом насипом через завантажувальні люки становить 0,72-0,73 т/м³ (на суху масу). Насипна густина трамбованого пирога, сформованого із застосуванням сучасного обладнання, становить 1,017 т/м³. При середньозваженій густині вугілля, що здається, в шихті 1,25-1,27 т/м³ об'єм міжзернового простору у насипній шихті становить 42-43 %, а в трамбованій 19-20 % [5, 26].

Кокс мокрого гасіння із слабоспікливої трамбованої шихти в порівнянні з коксом з насипної добреспікливої шихти дозволяє знизити питому витрату коксу в доменній печі на 5,2-6,2 %. Поєднання трамбування шихти з сухим гасінням коксу додатково знижує питому витрату коксу на 4,3%, при цьому

загальне зниження питомої витрати коксу доменної печі становить $\sim 10,0\%$ [23].

Процес трамбування та міцність вугільного пирога залежить від характеристик вугільної сировини: ступеню метаморфізму; вмісту мінеральних домішок (зольності); форми та крупності вугільних зерен (дрібні класи сприяють ущільненню, заповнюючи пори між крупними зернами та збільшуючи тим самим щільність упаковки); вологості (волога виконує роль зв'язуючого, впливає на процес ущільнення шляхом зменшення внутрішнього тертя) [15].

Для дослідження механічної міцності трамбованих вугільного пирога авторами був розроблений спеціальний тестер міцності, який поєднує в собі можливості дослідження міцності на стиск/розтягування, а також міцність на зсув. На основі випробувань процесу ущільнення та впливу на міцність пирога для даного вугілля запропоновано [27] емпіричну модель для розрахунку коефіцієнта трамбування (K) вугільного пирога з необхідними щільністю та висотою, який обчислюється наступним чином:

$$K = \left[\frac{HGL_{max=100}}{HGL^{\beta} \times d'^{\delta} + n} \right]_{W=W_{opt}} + \alpha \times (W - W_{opt})^2 \quad (1.1)$$

де HGL – індекс розмолоздатності за Хардгровим, од.; W - вологість шихти, %, d' – питомий діаметр вугільної частинки, мм; n - параметр розподілу функції RRSB; α , β , W_{opt} – параметри моделі.

Результати лабораторного моделювання показують [28], що DEM (discrete element method) є доцільним інструментом для вивчення процесу трамбування вугілля. Підхід моделювання дає можливість отримати додаткову інформацію до емпіричних досліджень лабораторного масштабу. Зокрема, механізми переміщення та перегрупування частинок у трамбованому вугіллі, контактні сили та локальні відмінності в пористості чи щільності пирогу можна динамічно відстежувати під час процесу трамбування (рис.2.1).

При процесі підготовки вугільних шихт за допомогою трамбування у виробничих умовах основна мета – отримати вугільний пиріг оптимальної щільності та міцності, що забезпечить його безпроблемне завантаження в коксову камеру та гарантує отримання однорідного коксу з високими фізико-механічними характеристиками. Пошкодження вугільного пирога при його завантаженні призводить до експлуатаційних ускладнень та екологічних проблем (неорганізовані викиди) та знижує продуктивність камери коксування.

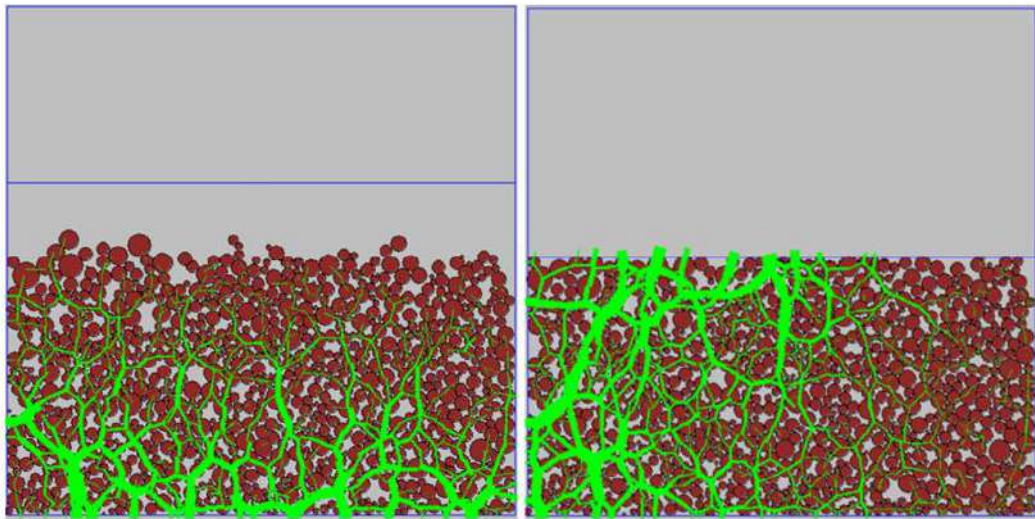


Рис.1.1. Контактні сили між частинками. Сили стискання, що виникають у вугільному завантаженні під дією сили тяжіння (ліворуч) і під дією удару молотків трамбувальної машини на вугільний пиріг (праворуч)

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [28]

На підставі встановлених параметрів технологічного процесу (вологості та розміру зерна) основним фактором, який обумовлює механічну міцність вугільного пирога, є енергія трамбування (кумулятивна енергія, яка передається вугільному пирогу в процесі трамбування). Вугільні зерна під дією енергії, яка передається молотками в момент удару, рухаються відносно

одне одного, поступово заповнюючи простір між зернами, створюючи щільну упаковку. Рух частинок полегшує поверхнева волога, яка мінімізує сили тертя між ними [29-31]. Результати показали, що в залежності від властивостей вугільної сировини суттєво відрізняється витрата енергії трамбування, необхідна для досягнення оптимальної густини вугільного пирога.

Математична модель для прогнозування щільності вугільного пирога та визначення необхідної кумулятивної енергії трамбування в залежності від властивостей компонентів шихти запропонована в роботі [34]:

$$\rho^d = 623.95 + 53.33 \times \ln(E) - 3.82 \times V^{daf} + 8.89 \times A^d + 63.26 \times d' - 31.13 \times n + 3.99 \times W_t^r \quad (1.2)$$

де ρ^d – щільність вугільного пирога, кг/м³; E - кумулятивна енергія трамбування, Дж/кг; V^{daf} – вихід летких речовин шихти, %; A^d — зольність шихти, %; d' – питомий діаметр вугільної частинки, мм; n - параметр розподілу функції RRSB; W_t^r – вологість шихти, %

Розроблена модель дозволяє визначати рівень кумулятивної енергії, технічні параметри устаткування (масу та кількість молотків для трамбування, висоту падіння), час необхідний для трамбування. Дослідження показали, що збільшення виходу летких речовин з 20 до 32 % призводить до зниження щільності вугільного пирогу при всіх досліджених рівнях кумулятивної енергії трамбування (600-1200 кДж/кг). Підвищення кумулятивної енергії трамбування з 600 до 1200 кДж/кг, вологості шихти та зольності обумовлює зростання щільності вугільного пирогу.

Кокс з високими показниками холодної міцності $M_{25} = 90$ % та стираності $M_{10} = 5$ % при вмісті класу -25 мм 3,5 %, $CRI \leq 27$ % та $CSR \geq 65$ % отримували на батареї №10-біс ПАТ «Алчевськкокс», де використовуються технології трамбування шихти та сухого гасіння коксу. При цьому високоякісний кокс отримували з шихт, в яких частка добреспікливого вугілля (при відсутності вугілля марки К) становила 33,9 %, а частка слабоспікливого вугілля – 66,1 % [35].

З лютого 2017 року технологію трамбування вугільної шихти впроваджено на новій коксовій батареї №6 (густина вугільного пирога $1,1 \text{ т/м}^3$), а 2018 року – на батареї №5 коксохімічного виробництва ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг”. Аналізуючи дані про склади вугільних шихт, що надходили на коксові батареї №1–4 (коксування насипної шихти), можна зазначити, що в середньому частка високолеткого вугілля становила 47,07 %; вміст середньоюлеткого вугілля – 35,27 %; вміст низьколеткого вугілля – 17,66 %.

Використання технології трамбування дозволяє отримувати доменний кокс більш високої якості, ніж за традиційною технологією. Зокрема, кокс, отриманий на коксових батареях (КБ) №5, 6, характеризується більш низькими значеннями зольності ніж на КБ №1-4 (11,4 % та 11,7 %), вмісту загальної сірки (0,44 та 0,52) і стиранням M_{10} на рівні 6,0 % та 8,1 %, при одночасно більш високих значеннях механічної міцності за показником подрібнюваності, що знаходяться на рівні M_{25} ~88,4 % та 85,7 % і післяреакційної міцності CSR ~54,4 % та 50,8 %, відповідно [36-38].

Технологія коксування попередньо висушеної шихти, розроблена компанією NSSMC і застосовується в Японії, в технологічному та апаратурному оформленні реалізована як процес СМС (регулювання вологості шихти), потім удосконалена та впроваджена як DAPS (сушіння та огрудкування шихти) [27].

За технологією СМС вугілля сушать у трубці-сушарці, при цьому його вологість зменшується з 10% до 5–6% перед завантаженням у коксову піч. При зниженні вологості шихти з 10 до 6% суттєво скорочується витрата тепла на коксування. Із застосуванням технології регулювання вологості зниження вмісту води шихти на 1% дозволяє зменшити витрату тепла на коксування на 62,0 МДж/т шихти сухої ваги.

При високому вмісті води (5%) вода виконує функцію зв’язуючого, а дрібні частинки вугілля або прилипають до поверхні або злипаються одна з одною, утворюючи конгломерати.

При сушінні вугілля до вологості 1,5 % внаслідок теплового удару відбувається часткове руйнування вугільних зерен, що призводить до утворення великої кількості вугільного пилу. Збільшення запиленості призводить до ускладнення видачі коксового пирога, погіршення якості смоли та умов праці персоналу [27].

Зазначені недоліки усуваються при використанні процесу DAPS (рис.1.2), який полягає у зменшенні вологості шихти до 2% сушінням у псевдокиплячому шарі. Дрібнодисперсний вугільний пил, що утворився, надходить на огрудкування. Сухе крупне вугілля і огрудковане змішуються і подаються в коксову піч.

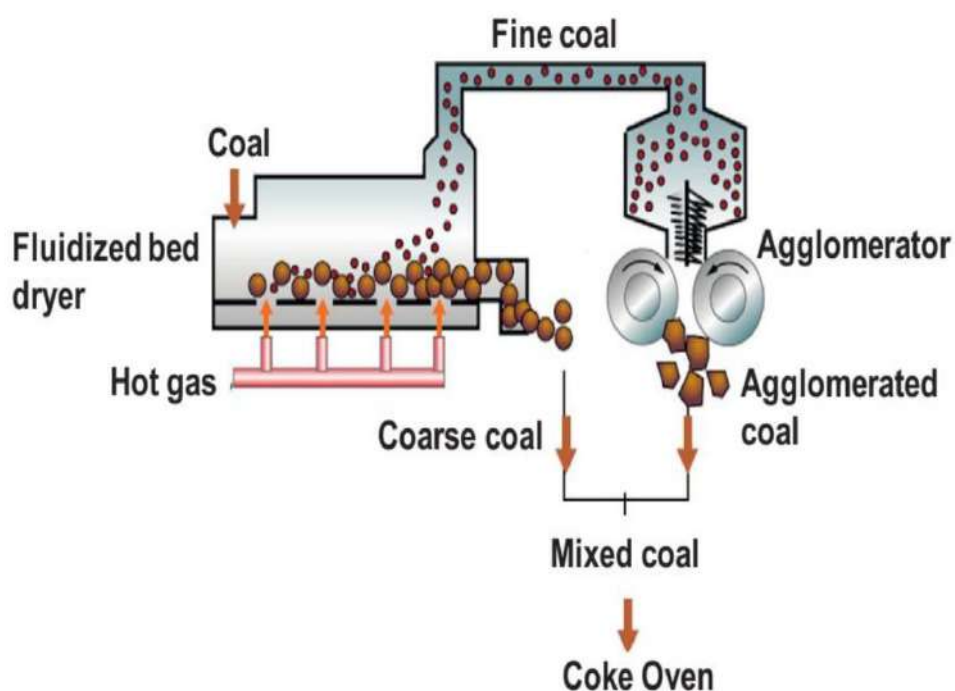


Рис.1.2. Схема процесу DAPS

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Зниження вологості вугілля, яке досягається в процесі, призводить до збільшення насипної густини вугілля, збільшення продуктивності коксової печі та підвищення міцності коксу. Так, показник M_{40} підвищується на 1 –

2,5%, а M_{10} знижується на 0,5 – 1,5%, реакційна здатність (CRI) знижується на 0,5–2,5 %, а післяреакційна міцність (CSR) збільшується на 0,2-2,5% [27].

На увагу заслуговує технологія виробництва коксу за проектом SCOPE 21 (рис.1.3), яка передбачає вирішення наступних завдань: ефективного використання вугільних ресурсів зі збільшенням частки слабоспівного вугілля в шихті для коксування до 50 %; підвищення продуктивності коксових печей із метою зниження капітальних витрат; ослаблення екологічного навантаження на довкілля та зменшення енергоспоживання.

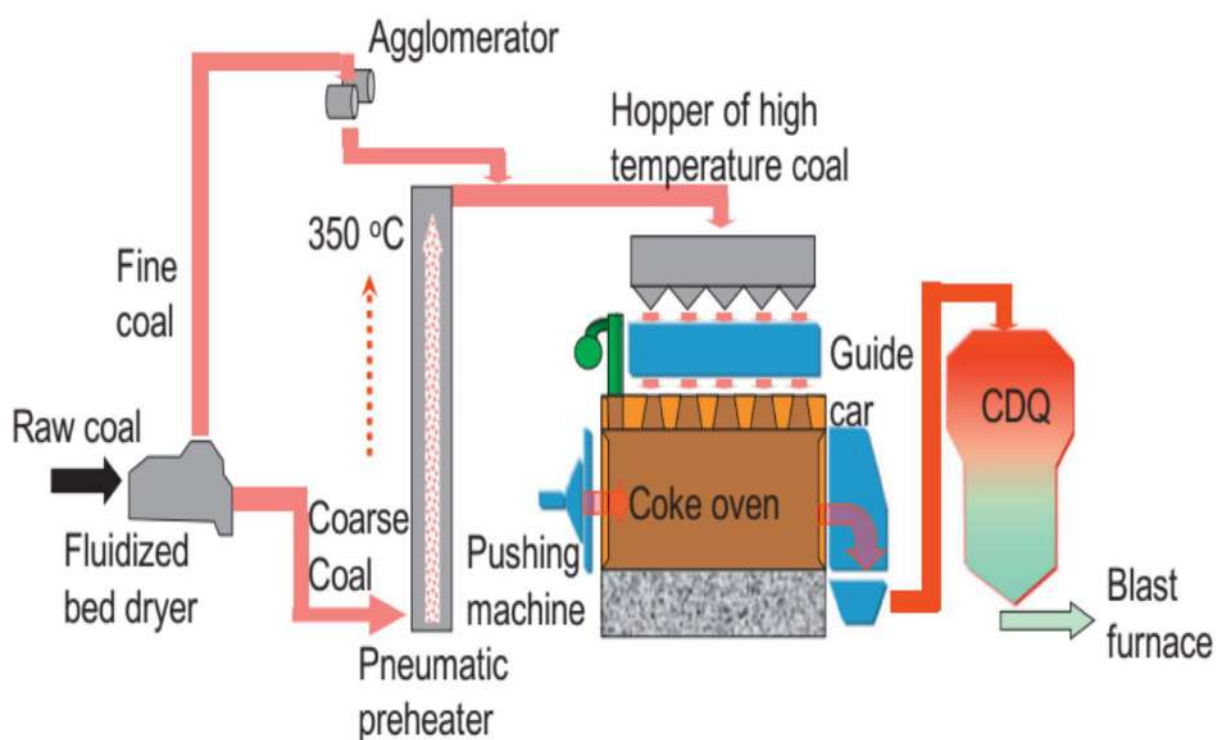


Рис.1.3. Технологія виробництва коксу за проектом SCOPE 21

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Вугілля (вугільна шихта) надходить у сушарку-класифікатор, в якій відбувається сушіння та поділ шихти на два класи, дрібний та крупний. Крупне вугілля піддається швидкісному нагріванню до 350 °C у пневматичному

підігрівачі. Дрібні класи вугілля після сушарки-класифікатора надходять у двовалкові преси і піддаються гарячому брикетуванню, після чого поєднуються з крупними класами та з температурою 250 °С завантажуються в коксову піч [4, 26, 27].

Технологічний процес має такі основні переваги: застосування швидкісного нагрівання шихти дозволяє скоротити тривалість коксування до 13 годин, знизити витрати енергії на коксування та підвищити міцність коксу до ДІ 86,5%; на печах застосовано вдосконалену систему обігріву з малим викидом оксидів азоту (NO_x); забезпечує можливість більш повно використовувати сировинні ресурси і збільшити частку слабоспікливого вугілля в шихтах від 20 % до 50 % [4, 27].

Технологія коксування термічно підготовлених вугільних шихт (ТПШ) у порівнянні з процесами коксування трамбованих шихт має ряд переваг: відсутність спеціальних вимог до конструкції типових коксових печей з висотою камер 4,3 м та основних коксових машин (крім вуглезавантажувального вагона); обладнання ТПШ добре вписується в інфраструктуру вуглекоксового блоку, що склалася, і може впроваджуватися як на діючих батареях, так і тих, які будуються; можливість залучення в шихти ширшого спектру слабоспікливого високолеткого вугілля - аж до 100%; нижчий рівень вимог до помелу шихти; дає можливість отримувати кокс різного цільового призначення (високореакційний кокс для феросплавної та хімічної промисловості, бездимне паливо для енергетики тощо); підвищує продуктивність коксових печей на 30-70%; дозволяє експлуатувати коксові батареї як на нагрітій шихті, так і на вологій і дозволяє при необхідності швидко перейти з однієї шихти на іншу [28].

Технологія термічної підготовки шихти перед коксуванням дозволяє отримувати з шихт з високим вмістом високолеткого слабоспікливого вугілля кокс, що перевершує по механічній міцності низькорекційний кокс з кращих вугільних шихт [29].

Висока швидкість нагрівання релаксує макромолекулярну структуру вугілля, збільшує вміст рухомих компонентів, підвищує плинність у термопластичній стадії та покращує спікливість вугілля. З підвищенням температури нагрівання відбувається підвищення ступеня ароматизації, збільшується ступінь графітизації та структура вугілля стає більш упорядкованою [27].

Механічна міцність коксу з термічно підготовлених вугільних шихт істотно вища, ніж з вологих, причому ця різниця тим більше, чим більше у складі шихти компонентів, що слабо спікаються.

У роботі [29] наведено результати дослідження впливу швидкості нагрівання при карбонізації на механічну міцність та реакційну здатність коксів і, отже, на їх механічну міцність після реакції. Вугілля, обране для вивчення, охоплювало широкий діапазон вмісту летких речовин (20,4–33,4 % мас.), характеризувалося низьким вмістом золи та сірки, вміст вуглецю знаходився в межах від 79,3 до 81,8 %, максимальна плинність по Гізелеру (F_{\max}) варіювалася від 192 до 25418 поділок/хв. Індекс вільного спучування (FSI) знаходився в межах між 6 і 8 ½. Збільшення швидкості нагрівання призвело до отримання коксів з більш високим значенням гарячої міцності CSR. Спектральний аналіз показав, що збільшення швидкості нагріву в інтервалах температур 300-400, 400-500 і 500-750 °С, які збігаються з передпластичною, пластичною та постпластичною стадією процесу коксування, зумовило підвищення ступеня впорядкованості структури, і, відповідно, призвело до отримання коксів із вищою гарячою міцністю CSR. Збільшення швидкості нагріву на стадії пластичного стану підвищує пластичність вугілля, що покращує зчеплення вугільних частинок, сприятливо впливає формування структур, що утворюють менш реакційноздатні форми вуглецю, що призводить до отримання коксу з більш високим показником післяреакційної міцності CSR.

Технологію коксування термічно підготовлених вугільних шихт було успішно освоєно у 2006-2008 рр. на дослідно-промисловій установці

продуктивністю 60 т/год по вологій шихті в умовах «Ясинівського коксохімічного заводу» [30].

Склад вугільних шихт як на базовій стадії (тобто вологих шихт на КБ № 1), так і в дослідній (ТПШ), а також їх якість та якість отриманого коксу наведено в табл. 1.4

Таблиця 1.4

Склад вугільних шихт, їх характеристики та якість отриманого коксу

Стадія	Склад вугільної шихти, %				Якість шихти					Якість коксу, %					
	Г	Ж	К	КСН	A ^d , %	V ^{daf} , %	S ^d , %	Y, мм	Ио	A ^d	S ^d	M ₂₅	M ₁₀	CSR	CRI
Базова	8,0	30,0	54,0	8,0	8,2	30,4	0,9	15,4	2,38	10,7	0,78	88,2	6,2	54,4	32,3
Дослідна	35,0	10,0	40,0	15,0	7,9	31,4	1,0	11,4	2,47	10,4	0,91	90,9	4,8	44,9	42,3
Базова	10,0	30,0	50,0	10,0	8,2	29,8	1,4	15,2	3,35	10,9	1,18	87,4	6,5	42,2	39,0
Дослідна	40,0	7,3	37,7	15,0	7,9	31,4	1,1	12,5	2,70	10,3	0,88	89,6	5,7	45,6	37,8

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [30]

З наведених даних видно, що незважаючи на те, що частка слабоспівного вугілля в термопідготовлених шихтах на 35% більше, ніж у вологих (в т.ч. вугілля марки Г – на 27-30%), отриманий з них кокс краще за показниками механічної міцності: за M₂₅ – на 2,2-2,7 %, а за M₁₀ – на 0,8-1,4 %. Слід зазначити, що за показником M₄₀ відмінності між видами коксу сягають 4-5 %, тобто крупніші класи коксу з ТПШ набагато міцніше (M₄₀ – 80-84%) традиційного, що дуже важливо для збереження газопроникності в доменній печі [30].

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір та обґрунтування технології трамбування (ущільнення) вугільної шихти

Як вже зазначалося, нині висуваються підвищені вимоги до механічних і фізико-хімічних властивостей коксу, що пов'язано з прагненням доменщиків знизити його питому витрату під час виробництва чавуну за рахунок часткової заміни різними паливними добавками - пиловугільним паливом (ПВП), кусковим антрацитом і вугіллям, коксовим горішком (10-25 мм) та ін. [1-3]. [1-3]. Досягнута заміна коксу антрацитом становить 48-55 кг/т чавуну, тривають дослідні плавки з метою підвищення заміни ним коксу. При цьому показано, що чим вища механічна і «гаряча» міцність коксу, тим більшу його частину можна замінити паливними добавками. Застосування ПВП дає змогу заощадити значно більшу частину доменного коксу. Так, на Донецькому металургійному заводі використовують ПВП у кількості 113 кг/т чавуну, що становить 25,9 % від витрат коксу [1].

Таким чином, застосування паливних добавок дасть змогу знизити питому витрату коксу до рівня 350-420 кг/т чавуну. При значному зменшенні вмісту коксу в доменній шихті істотно підвищується його роль як розпушувача шихтових матеріалів, що забезпечує необхідну газопроникність і дренаж рідких продуктів плавки. Тому сучасні вимоги до якості доменного коксу досить високі: $M_{25} \geq 88,0-90,0 \%$; $M_{10} \leq 6,0-6,5 \%$; $CSR - 60,0-75,0 \%$; $CRI - 25-30,0 \%$ [2, 5]. Для забезпечення такого рівня якості коксу за традиційної технології коксування (із завантаженням шихти в коксові печі насипом) необхідно мати такий марочний склад шихти, %:

- малометаморфізоване вугілля - не більше 15 %;
- добреспікливе вугілля середньої стадії метаморфізму - 65-70 %;
- високометаморфізоване вугілля, що слабо спікається, - 15-20 %.

У зв'язку з тим, що вугільна сировинна база України є дефіцитною вже протягом багатьох років, здійснюється імпорт коксівного вугілля з Казахстану, а останніми роками завозиться вугілля зі США, Канади та Австралії. Участь українського вугілля в сировинній базі коксування постійно знижується.

Отже, однією з технологій, що дають змогу істотно скоротити в шихті частку вугілля, що добреспікливого, є технологія коксування трамбованих шихт.

Перевагами зазначеної технології є наступні аспекти:

- використання більш дешевого та доступного вугілля (з високим вмістом летких речовин та низькою здатністю до спікання);
- розширення сировинної бази;
- досягнення аналогічних або вищих якісних показників коксу, отриманого зі трамбованої шихти, порівняно з коксом, виробленим в коксовій печі гравітаційним способом;
- збільшення виходу коксу з камери коксування;
- підвищення продуктивності доменних печей і ефективності доменного процесу при використанні коксу, отриманого зі трамбованої шихти.

Технологія трамбування застосовується на новозбудованих або реконструйованих об'єктах (включаючи зміну системи завантаження шихти з верхнього на трамбування). З усіх існуючих методів, метод трамбування дає найкращі результати підвищення щільності вугільної шихти. Насипна щільність, що досягається при цьому, може перевищувати 1100 кг/м^3 (у вологому стані), тоді як у випадку системи верхнього завантаження вона знаходиться на рівні $780\text{-}820 \text{ кг/м}^3$. Крім того, ця технологія не потребує використання додаткових рідинних матеріалів для підвищення насипної щільності [16-17].

Попередніми дослідженнями встановлено, що використання технології трамбування дозволяє отримувати доменний кокс більш високої якості, як за

показниками механічної міцності (M_{25} і M_{10}), так і за показниками CRI і CSR [31].

Застосування вищевказаного методу також позитивно впливає на екологічність коксохімічного виробництва - за рахунок збільшення продуктивності коксової батареї знижуються питомі викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище. Тому в останні роки спостерігається підвищений інтерес до цієї технології, що виражається в будівництві коксових батарей за технологією трамбування, як в Європі (Німеччина, Польща, Чехія, Україна), так і на Сході (Китай та Індія) [31].

Однак до цього часу всі комплекси коксових батарей, що працюють за технологією трамбування, проектувалися за окремим проектом, який враховував низку обмежувальних факторів, що виникають при виробництві коксу зі трамбованої шихти. Одним з основних обмежуючих факторів при переведенні коксових батарей з гравітаційного завантаження на технологію трамбування є складність забезпечення стабільності трамбованого вугільного пирога. Складно досягти стабільності вугільного пирога при збільшенні його висоти без істотного збільшення ширини трамбованого вугільного пирога.

Перспективним напрямком є впровадження зазначеної технології трамбування вугільної шихти для комплексу коксових батарей, які спочатку не були спроектовані для завантаження трамбованої шихти, є можливість отримання більш якісного коксу на цих батареях, навіть при використанні вугілля нижчої якості. Постачальником технології трамбування вугілля виступає компанія HuDe (Німеччина), один зі світових лідерів у цій галузі. При впровадженні технології трамбування зберігається можливість роботи батареї за технологією самопливного завантаження коксових камер, при необхідності.

2.2 Теорія і практика виробництва доменного коксу високої якості з трамбованих шихт зниженої спікливості

2.2.1 Вплив технологічних чинників на міцність коксу і вихід продуктів коксування з трамбованої шихти

Технологія трамбування (ущільнення) вугілля перед завантаженням в камеру відома і використовується в багатьох країнах, при цьому вона має різну конструкцію і набір обладнання. Встановлено, що міцність трамбованого пирога багато в чому залежить від гранулометричного складу шихти та її вологості, тобто від технологічних параметрів підготовки шихти.

Дослідження впливу рівня подрібнення і вологості шихти для трамбування на міцність коксу і вихід продуктів коксування автори роботи [32] проводили в укрупненій лабораторній печі (разове завантаження - 5 кг). У дослідженнях використовували виробничу шихту для трамбування такого марочного складу, %:

Г, Комсомольська ЦЗФ	– 40
Г, Добропілська ЦЗФ	– 16
Ж, Самсонівська ЦЗФ	– 8
Ж, Дуванська ЦЗФ	– 10
ПС, Узловська ЦЗФ	– 6
КСПС, ЦЗФ Сибир	– 5
СС, р-з Чернігівський	– 5
Т, Узловська ЦЗФ	– 10

Якісну характеристику шихти представлено в таблицях 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1

Технологічні властивості вугільної шихти

Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Показник відбиття вітриніту R_o , %	Мацеральний склад, %		
A^d	S_t^d	V^{daf}	X	Y		V_t	I	L
8,1	1,71	31,3	32	14	0,96	76	20	4

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Таблиця 2.2

Рефлектограма вітринітової складової

Рефлектограма вітринітової складової, %					
ДГ	Г	Ж	К	ПС	Т
11	48	30	-	6	5

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Таблиця 2.3

Гранулометричний склад шихти

Помел	Вміст класів крупності (мм) в шихті, %									d_{cp} , мм
	+3,15	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	-0,25	<3,15	<2	<0,5	
Крупний	15,6	9,7	24,5	8,5	23,1	18,6	84,4	74,7	41,7	1,38
Дрібний	-	0,3	33,7	8,9	24,1	33,0	100,0	99,7	57,1	0,71

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Для вивчення залежностей міцності трамбованого пирога від різних технологічних чинників, а також для поточного контролю трамбуєміст виробничої шихти було розроблено спеціальні методи та їх апаратурне

оформлення [33]. За допомогою цих методів було визначено трамбуваність індивідуального вугілля в ряді метаморфізму - міцність трамбованих зразків на зріз ($\sigma_{зр}$) і зминання ($\sigma_{зм}$) та їхню густину (γ) (рисунок 2.1), вивчено вплив роботи трамбування на міцність і густину трамбованого пирога (рис.2.2), встановлено залежності густини та густини трамбованого пирога від вологості шихти і ступеня її подрібнення (рис. 2.2-2.5). При цьому показано, що для досягнення високої міцності трамбованого пирога, що забезпечує його цілісність при завантаженні в камеру коксування, гранулометричний склад шихти має бути таким, %: клас <3,15 мм (квадратні отвори) - 90-95; <1 мм - 60-65; <0,5 мм - 40-50; <0,25 мм - 25-30. Вологість шихти має перебувати в межах 10,5-12,0 %.

Трамбування шихти проводили в збірно-розбірній матриці за однакового значення роботи трамбування (600 Дж/кг), що приблизно відповідає аналогічному показнику промислової трамбувально-завантажувально-виштовхувальної машини (ТЗВМ). Дані щодо щільності трамбованого вугільного пирога за різних значень вологості та рівня подрібнення шихти наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Щільність трамбованого пирога при різних значеннях вологості та рівні подрібнення шихти

Варіант шихти	Помел шихти	Вологість, W_t^r , %	Щільність пирога, кг/дм ³	
			фактична	на сухую масу
1	крупний	9,6	1,092	0,985
2	крупний	14,0	1,163	0,995
3	дрібний	9,7	1,067	0,963
4	дрібний	14,4	1,149	0,989

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Як видно з таблиці 2.4, щільність трамбованого пирога за крупного помелу вища, ніж за дрібного, причому, як за низької, так і за високої вологості шихти. Найвищу густину трамбованого пирога отримано за грубого помелу і високої вологості шихти (варіант 2), найменшу - за дрібного помелу і низької вологості шихти (варіант 3). Зниження густини шихти варіанта 3 відносно густини шихти варіанта 2 становить 8,26 % (відносних). Слід зазначити, що під час перерахунку густини шихти на суху масу різниця між зазначеними варіантами шихт не така значна і становить 3,22 % (відносних).

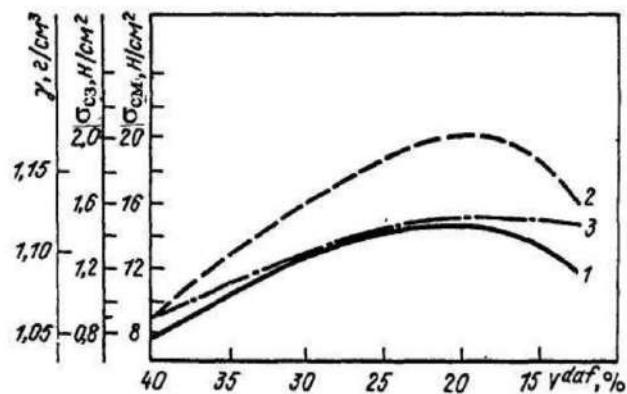


Рис. 2.1. Залежність трамбуємості вугілля від ступеня його метаморфізму 1-3 - відповідно $\sigma_{зр}$, $\sigma_{зм}$, γ

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

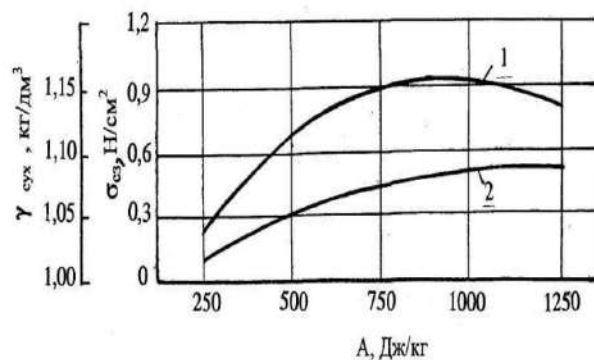


Рис. 2.2. Вплив роботи трамбування (A) на густину $\gamma_{сух}$ і міцність ($\sigma_{сз}$) трамбованого зразка 1 - $\sigma_{сз}$; 2 - $\gamma_{сух}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Отримані залежності дали змогу визначити параметри роботи трамбувально-завантажувально-виштовхувальної машини (ТЗВМ), що обслуговує коксову батарею - режим і роботу трамбування, міцність і щільність вугільного пирога, черговість і час виконання окремих операцій.

Щільність трамбованого пирога, сформованого із застосуванням сучасної ТЗВМ, становить $1,017 \text{ т/м}^3$ у перерахунку на суху масу, тоді як щільність шихти, завантаженої в піч насипом (традиційний процес коксування) - $0,72-0,73 \text{ т/м}^3$ (на суху масу). За середньозваженої уявної густини вугілля в шихтах $1,25-1,27 \text{ т/м}^3$ порозність насипної шихти становить 42-43 %, а трамбованої - 19-20 %. Оскільки процес спікання вугілля є гетерогенним процесом, то будь-яка порозність перешкоджає його спіканню. Тому спікливість шихти, що завантажується насипом, має бути значно вищою, ніж трамбованої.

У трамбованому вугільному завантаженні створюються ускладнені умови для евакуації паро-газоподібних продуктів із пластичного шару. Це призводить до підвищення в ньому газового тиску. Що більший газовий тиск, то активніше парогазоподібні продукти піролізу беруть участь у подальших реакціях з органічною масою вугілля, що розкладається. При цьому інтенсифікуються реакції насичення воднем вільних зв'язків осколків макромолекул (вільних радикалів), що утворюються. Це призводить до збільшення кількості відносно низькомолекулярних сполук, які за певних температур можуть перебувати в пластичному стані й брати активну участь у процесі спікання. Така зміна хімізму в бік відновної деполімеризації позитивно позначається на пластичному стані трамбованого вугільного завантаження. Проведені рентгенографічні дослідження коксівного завантаження різного вугілля з виміром температур і газового тиску в пластичному шарі показали, що під час коксування трамбованого завантаження температурний, а, отже, і часовий інтервали пластичності вугілля, особливо слабо спікливого газового вугілля, розширюються. При цьому макроструктура пластичного шару поліпшується - газонасичена пінна

зона розширюється з 2,5 до 4,5 мм, збільшується на 1 мм також загальна товщина пластичного шару, що істотно поліпшує умови спікання (див. таблицю).

Зазначені позитивні зміни пластичного стану поряд зі збільшенням густини пластичного шару дають змогу більшою мірою використовувати спікальний потенціал шихти й одержувати кокс високої механічної міцності з шихт зниженої спіклivosti. Дослідженнями, проведеними в напівпромисловій печі [6], а потім у промисловому масштабі [33], показано, що кокс доволі високої механічної міцності (M_{25} - 88,0-88,7 %, M_{10} - 5,9-6,8 %) можна одержати з трамбованих шихт такого марочного складу, %: Г - 60-65, Ж - 10-20, ПС - 10-20, П - 10, тобто без участі марки К, наявність якої в шихті для традиційного коксування обов'язкова. Отже, технологія виробництва коксу із застосуванням трамбування шихти дає змогу використовувати шихти, марочний склад яких максимально наближений до пайової участі вугілля в надрах Донецького басейну.

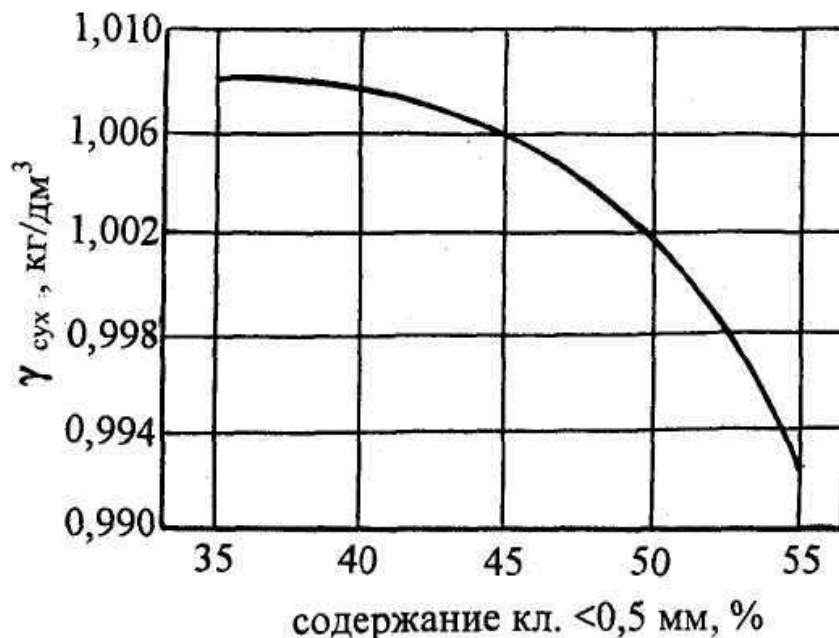


Рис. 2.3. Вплив ступеня подрібнення шихти (вміст класу <0,5 мм) на густину ($\gamma_{\text{сух}}$) трамбованого зразка

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

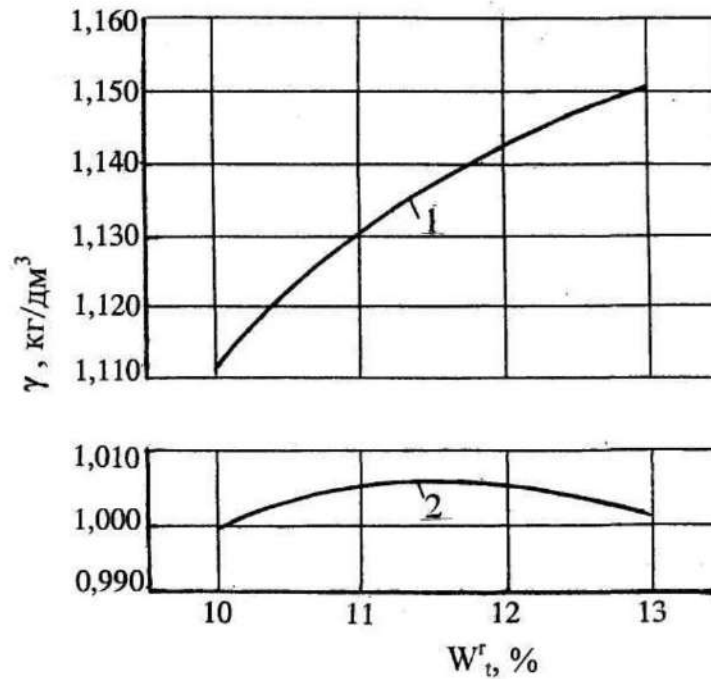


Рис. 2.4. Вплив вологості шихти (W_t^r) на густину (γ) трамбованого зразка: 1 – при фактичній вологості шихти; 2 – на суху масу.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

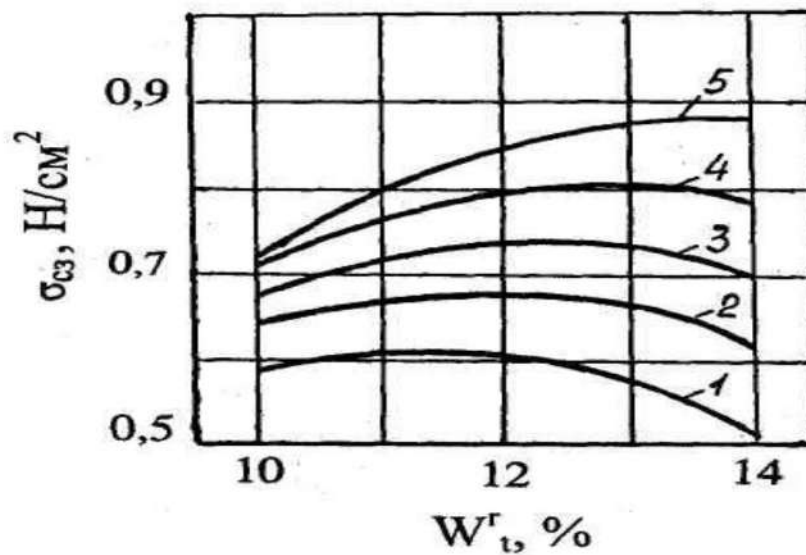


Рис. 2.5. Вплив вологості (W_t^r) та ступеню подрібнення шихти на міцність ($\sigma_{сз}$) трамбованого зразка:

1-5 – ступінь подрібнення шихти відповідно 90, 91, 92, 93 и 94 %

вмісту класу <3,15 мм

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Таблиця 2.5

Вихід продуктів коксування при різній крупності та вологості трамбованої шихти

Варіант шихти	Вихід продуктів коксування, %							
	кокс	Кам'яновугіль на смола	NH ₃	CO ₂	H ₂ S	сирий бензол	коксовий газ	пірогенетична вода
1	73,95	3,83	0,11	1,04	0,41	1,12	15,28	4,26
2	73,97	3,43	0,16	1,09	0,43	1,16	15,64	4,12
3	73,86	3,99	0,14	1,05	0,43	1,12	14,97	4,44
4	73,80	3,69	0,15	1,13	0,44	1,17	15,34	4,28

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Таблиця 2.6

Показники якості коксу при різній крупності та вологості трамбованої шихти

Варіант шихти	Показники якості коксу					
	Крупність, K ₅₀ , %	Механічна міцність, %			Показники за методом NSC, %	
		П ₄₀	П ₂₅	И ₁₀	CRI	CSR
1	85,8	77,8	89,7	8,4	53,6	19,8
2	79,8	74,5	89,8	8,6	53,8	19,4
3	91,1	80,6	90,9	7,8	52,3	25,4
4	82,4	80,0	90,7	7,9	51,9	26,1

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Аналіз даних табл. 2.5 показує, що збільшення вологості шихти не призводить до помітних змін виходу коксу, аміаку, вуглекислого газу і сірководню. Дещо знижується вихід кам'яновугільної смоли і пірогенетичної води, а для сирого бензолу і коксового газу значення цього показника підвищуються. Зазначені слабо виражені закономірності характерні і для грубого, і для дрібного помелу шихти. Під час переходу від великого до дрібного помелу шихти спостерігається тенденція до зниження виходу коксу і коксового газу, а також до збільшення виходу кам'яновугільної смоли і пірогенетичної води. Виходи сирого бензолу, NH_3 , CO_2 і H_2S практично не змінюються.

З даних таблиці 2.6 випливає, що підвищення ступеня подрібнення шихти в зазначених у табл. 2.3 межах помітно змінює показники крупності та механічної міцності одержуваного коксу. Так, зі збільшенням ступеня подрібнення шихти за рівня її вологості 9,6-9,7 % крупність коксу, оцінювана показником K_{50} , зростає з 85,8 до 91,1 % або на 5,8 % (відносних), а за рівня вологості 14,0-14,4 % - з 79,8 до 82,4 % або на 3,8 % (відносних). Показники подрібнюваності P_{40} і P_{25} помітно поліпшуються при зростанні ступеня подрібнення: для вологості 9,6-9,9 % це поліпшення становить відповідно 3,5 і 6,9 % (відносних), а для вологості 14,0-14,4 % або 5,8 % (відносних), а для вологості 14,0-14,4 % (відносних), 14,4% - відповідно 1,3 і 1,0% (відносних).

Стиранність коксу I_{10} також зазнає змін у кращій бік, зі зростанням ступеня подрібнення знижуючись на 7,1 і 8,1 % (відносних) відповідно для низького і високого рівня вологості шихти.

Показник післяреакційної міцності CSR для розглянутих рівнів подрібнення зростає на 22,0-25,7 % (відносних), а показник реакційної здатності CRI знижується на 2,4-3,7 % (відносних).

Вивчення впливу температурного режиму коксування і насипної густини шихти на міцність коксу проводили шляхом ящиківих коксувань. Ящики для дослідно-промислових коксування були виконані з перфорованої листової сталі, діаметр отворів перфорації - 7 мм. Шихту в ящики завантажували як у трамбуваному, так і в насипному вигляді. Трамбування

шихти проводили в апараті (трамбувальнику) установки для визначення міцності трамбованих зразків при значенні роботи трамбування, що відповідає аналогічному показнику ТЗВМ. Щільність трамбованої шихти в ящику за вологості 10,5 % становила 1,13 т/м³.

Розміщення ящиків у трамбованому пирозі здійснювали таким чином. Спочатку в трамбувальну камеру ТЗВМ подавали шихту протягом 25 с для утворення шару на посадковому піддоні висотою 0,6 м. Потім на цей шар встановлювали ящики таким чином, щоб поздовжня їхня вісь була перпендикулярна стінам трамбувальної камери. Довжина ящиків становила 420 мм, ширина і висота - відповідно 106 і 120 мм, маса шихти в ящику - 8,8 кг. Ящики встановлювали таким чином, щоб у камері коксування вони розташовувалися навпроти певних масових вертикалів - для того, щоб після виміру температур уздовж обігрівального простінка печі мати дані про температурний режим коксування на ділянці печі, в якій розташовані ящики. Після встановлення ящиків у трамбувальній камері двері камери закривали, подавали в неї шихту протягом 20-25 с, а потім починали трамбування.

Розмір ящиків для насипної шихти становив, мм: ширина - 200, висота - 200, довжина - 380. Корисний об'єм ящика становив 11 дм³; маса шихти, завантаженої за насипної густини 0,8 т/м³ - 8,8 кг. Вологість як насипної шихти, так і трамбованої - 10,5 %. Для того, щоб ящики перебували у вугільному завантаженні на половині висоти камери коксування, її спочатку частково завантажували шихтою з крайніх бункерів вуглезавантажувального вагона. Кожен ящик опускали на шихту на гачках через середній вуглезавантажувальний люк і орієнтували так, щоб поздовжня вісь ящика була перпендикулярна до гріючих стін камери коксування. Потім вивантажували шихту із середнього бункера вагона і починали планування шихти.

Дослідження були проведені в умовах ВАТ «Алчевсккокс». Температура в обігрівальних простінках у зоні розташування ящиків у печах батареї № 9-біс становила в середньому 1352 °С, батареї №7 - 1327 °С, період коксування - відповідно 23,0 год і 15 год 45 хв.

Ящики з коксом після видачі коксу з камери коксування і вилучення їх з масиву коксу на рампі витримували в сушильній шафі до повного припинення втрати маси, після чого витягували з ящиків кокс, зважували його і випробовували на міцність. Для приведення властивостей доменного коксу до товарного його скидали вісім разів з висоти 1,8 м на металеву плиту. Випробуванню в барабані піддавали наважки коксу масою 4 кг (по одному кілограму в кожній секції) крупністю >25мм, складені пропорційно ситовому складу. Проведені нами раніше спеціальні дослідження дали змогу встановити перехідні коефіцієнти від показників механічної міцності коксу, отриманих у лабораторному барабані, до показників, які ми отримуємо в стандартному барабані за ДСТУ 2206-93. Дані випробувань коксу наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Показники якості коксу

Умови виробництва коксу	Показники механічної міцності, за ДСТУ 2206-93, %		Показники за методом NSC, %			Фізико-хімічні показники					
	M ₂₅	M ₁₀	CRI	CSR	A _v	П _c , %	T, мг	D _{уяв.} , г/см ³	d _{дійсна} , г/см ³	П, %	Реакційна здатність за ГОСТ 10089-89, см ³ /г·с
Батарея № 9-біс:											
трамбування	90,9	5,1	47,7	36,2	43,0	92,3	137	1,116	1,904	41,3	0,35
насіпом	89,6	7,9	54,8	14,5	52,7	83,5	108	0,982	1,867	47,4	0,48
Батарея № 7:											
трамбування	90,7	6,1	47,2	33,6	47,2	--	--	--	--	--	--
насіпом	88,7	9,6	53,4	14,9	53,1						

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [33]

З даних таблиці 2.7 випливає, що показники механічної міцності кращі у коксів, отриманих у печах батареї №9-біс, ніж батареї № 7 як за насипного, так і трамбованого завантаження. Це пояснюється тим, що умови коксування

в печах батареї №9-біс сприятливіші для протікання процесів термохімічних перетворень і коксоутворення, а саме - вищі температури в обігрівальних простінках (на 25 °С) і значно триваліший період коксування (на 7 годин). Водночас показники CRI і CSR коксів із трамбованої та насипної шихти практично не залежать від того, в яких температурних умовах вони отримані.

У коксів із трамбованої шихти показник CSR вищий, а показник A_v (вихід класу <0,5 мм після реакції), відповідно, нижчий за коксування в батареї № 9-біс. Для коксів з насипної шихти ці показники не залежать від умов коксування.

Як механічна, так і «гаряча» міцність коксів з трамбованої шихти значно краща, ніж коксів з насипної шихти. Особливо помітна різниця за показниками M_{10} і CSR - відповідно, в 1,5 і 2,5 рази. За відносно низької «гарячої» міцності всіх отриманих коксів показник CSR при трамбуванні шихти збільшується на ~20 %, а показник CRI знижується на 6-7 %.

Отже, можна сформулювати наступні висновки:

1. При однаковій роботі трамбування підвищення вологості шихти сприяє підвищенню густини трамбованого пирога в перерахунку на суху масу, що помітніше при збільшенні крупності помелу шихти;
2. Зміна вологості трамбованого пирога в межах від 9,5 до 14,5 % не впливає на вихід коксу від шихти. При підвищенні вологості пирога від 9,5 до 14,5 % вихід кам'яновугільної смоли знижується на 0,3-0,4 %, пірогенетичної води - на 0,15 %, а вихід коксового газу, сирого бензолу і CO_2 збільшується відповідно на 0,35, 0,05 і 0,05 %. Вихід сірководню та аміаку не змінюється.
3. Підвищення рівня подрібнення трамбованої шихти в межах від 84 % класу <3,15 мм до 100 % класу <2 мм призводить до зниження виходу валового коксу від шихти в середньому на 0,13 %, коксового газу - на 0,3 %, а також до підвищення виходу кам'яновугільної смоли на 0,2 % і на таку саму величину - пірогенетичної води. Вихід інших хімічних продуктів коксування не змінюється.

4. Механічна і «гаряча» міцність коксу з трамбованої шихти практично не залежать від її вологості. Крупність коксу при збільшенні вологості шихти знижується.
5. Підвищення рівня подрібнення трамбованої шихти у вивчених межах призводить до помітного підвищення показників подрібнюваності коксу P_{40} і P_{25} і до зниження стираності I_{10} . Реакційна здатність CRI і міцність коксу після реакції CSR також має тенденцію до поліпшення.
6. Підвищення насипної густини шихти з товщиною пластичного шару У, що дорівнює 14 мм, у межах від 0,8 до 1,13 т/м³ призводить до значного підвищення як механічної, так і «гарячої» міцності коксу.
7. Збільшення температури в обігрівальних простінках на 25 °С і періоду коксування на 7 год призводить до більш значного підвищення показників механічної міцності коксу з насипної шихти порівняно з коксом із трамбованої шихти. «Гаряча» міцність коксу практично не змінюється.

2.2.2. Досвід впровадження технології в умовах діючого коксохімічного виробництва

ДП «ГПРОКОКС» і компанія NuDe розробили і реалізували проект переведення діючої коксової батареї з гравітаційного способу завантаження коксових печей на технологію трамбованого завантаження вугільного пирога.

У таблицях 2.8 і 2.9 наведено характеристики якості насипної та трамбованої вугільної шихти відповідно для контрольного періоду спостережень (19 місяців) [34].

Таблиця 2.8

Якість вугільної шихти, завантаженої зверху

Показник	Технічний аналіз				Щільність, т/м ³		Пластометрия		Гранулометричний склад (мм), %		
	W _t ^r , %	A ^d , %	S ^d , %	V ^{daf} , %	факт.	на суху масу	х, мм	у, мм	<3	3-6	>3
Максимум	9,6	8,9	0,8	31	0,8	0,739	37	17	81,2	12,4	10,0
Мінімум	7,5	8,2	0,46	29,2	0,781	0,708	32	17	79,7	9,8	6,8
Середнє	8,5	8,5	0,6	30,1	0,79	0,724	35	17	80,4	11,6	8,1

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [34]

Таблиця 2.9

Якість трамбованої шихти

	Технічний аналіз				Щільність, т/м ³		Пластометрия		Гранулометричний склад (мм), %		
	W _t ^r , %	A ^d , %	S ^d , %	V ^{daf} , %	факт.	на суху масу	х, мм	у, мм	<3	3-6	>3
Максимум	11,9	8,3	0,54	33,3	1,154	1,017	46	14	92,1	8,0	1,2
Мінімум	10,8	7,6	0,42	31,5	1,072	1,014	42	13	90,7	6,7	0,9
Середнє	11,5	8,0	0,5	32,5	1,145	1,017	45	14	91,5	7,3	1,2

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [34]

Протягом зазначеного періоду виробнича шихта, яка завантажувалася традиційним гравітаційним методом, включала 5 вугільних концентратів газового вугілля, 9 вугільних концентратів жирного вугілля, 15 коксового

вугілля і 4 пісного вугілля. У той же період до складу трамбованої шихти входило до 4 вугільних концентратів марки Г, 8 концентратів марки жирного вугілля, 11 коксового вугілля та 4 марки пісного вугілля.

Як бачимо, насипні та трамбовані шихти суттєво відрізняються за якісним складом. Так, вміст газового вугілля в насипній шихті коливався від 20,17 до 32,70 %; жирного вугілля - від 14,50 до 30,00 %; коксівного вугілля - від 20,10 до 49,10 %; пісного вугілля – від 3,91 до 19,20 %. Натомість спостерігається значне збільшення вмісту газового вугілля в трамбованій шихті - з 54,0 до 63,5 %; також збільшився вміст пісного вугілля з 4,82 до 24,60 %; в той же час зменшився вміст вугілля, що добреспікливого - жирного з 11,48 до 20,3 % та коксівного - з 0 до 20,15 %.

Зазначена різниця в басейновій приналежності вугільних концентратів, що входять до складу вугільних шихт, які використовуються при виробництві коксу методами насипного і трамбованого завантаження шихти, стала наслідком відмінностей у вимогах до якості вугільних шихт, що готуються насипним і трамбованим способами.

Зокрема, порівняно з шихтою, що завантажується в камеру коксування самопливом, шихта для трамбування характеризується (в середньому) вищими значеннями вологості (11,5 проти 8,5%), виходу летких речовин (32,5 проти 30,1%), насипної щільності (1,145 проти 0,790 т/м³), класу крупності <3,0 мм (91,5 проти 76,8 %). Навпаки, насипна вугільна шихта характеризується вищим рівнем товщини пластичного шару, Y (14 проти 17 мм).

На рисунках нижче представлені світлини встановленої трамбувальної машини (рисунку 2.6 - зовнішній вигляд, рисунку 2.7 - внутрішній вигляд). На рисунку 2.9 показана загальна схема установки трамбувальної машини.

Таблиця 2.10

Основні характеристики коксової батареї

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника
Система обігріву	ПВР, обігрів коксовим газом	
Кількість печей в батареї	шт.	41x2
Об'єм коксової печі	м ³	51
Розміри коксової печі:		
загальна довжина	мм	16820/17056*
корисна	мм	15980
Загальна висота	мм	7000/7100*
корисна	мм	6700
Ширина камери середня	мм	480/465*
Товщина гріючої стінки	мм	105
Період коксування	години	22,5
Продуктивність по коксу вологістю 6%	тис. т/рік	1140

* в гарячому стані

Таблиця 2.11

Характеристики трамбованого вугільного пирога

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника
Розміри трамбованого вугільного пирога		
- висота	мм	6515
- ширина	мм	415
- довжина	мм	15982
Об'єм	м ³	43,21
Щільність вугільного пирога		
- при вологості 11%	т/м ³	1,16
- у сухому стані	т/м ³	1,032

Завдяки збільшенню щільності вугільної шихти в камері коксування при введенні в експлуатацію технології трамбування вугільної шихти, період коксування в порівнянні з традиційною технологією з верхнім завантаженням збільшився до 22,5 годин. Продуктивність коксової батареї в цей період коксування залишається на попередньому рівні і становить 1,14 млн тон коксу 6% вологості на рік.

При завантаженні діючої коксової батареї шихтою, що спікається, повністю зберігаються всі об'єкти інфраструктури батареї з додаванням об'єктів, необхідних для технології спікання, а також реконструкцією деяких існуючих будівельних конструкцій. Впровадження технології трамбування вугільної шихти здійснюється в умовах діючого коксохімічного заводу.



Рис. 2.6. Трамбувальна машина. Вид ззовні.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [34]



Рис. 2.7. Трамбувальна машина. Вид зсередини.
Примітка. Джерело: розроблено з використанням [34]

На рис. 2.8 показано компоновання ТЗВМ і коксової батареї.

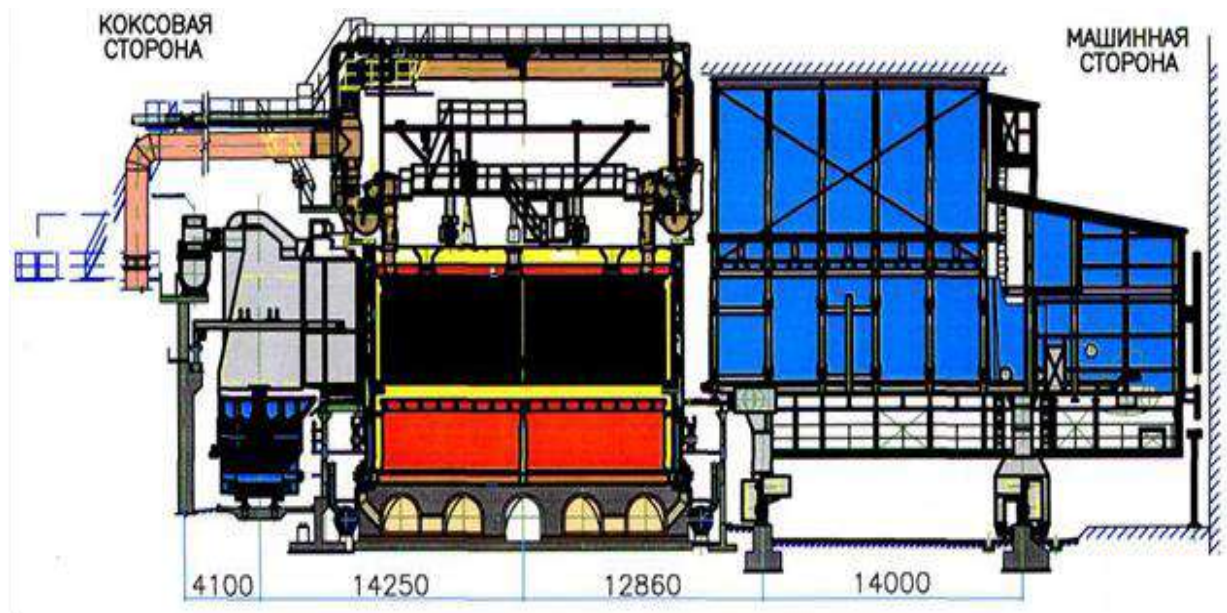
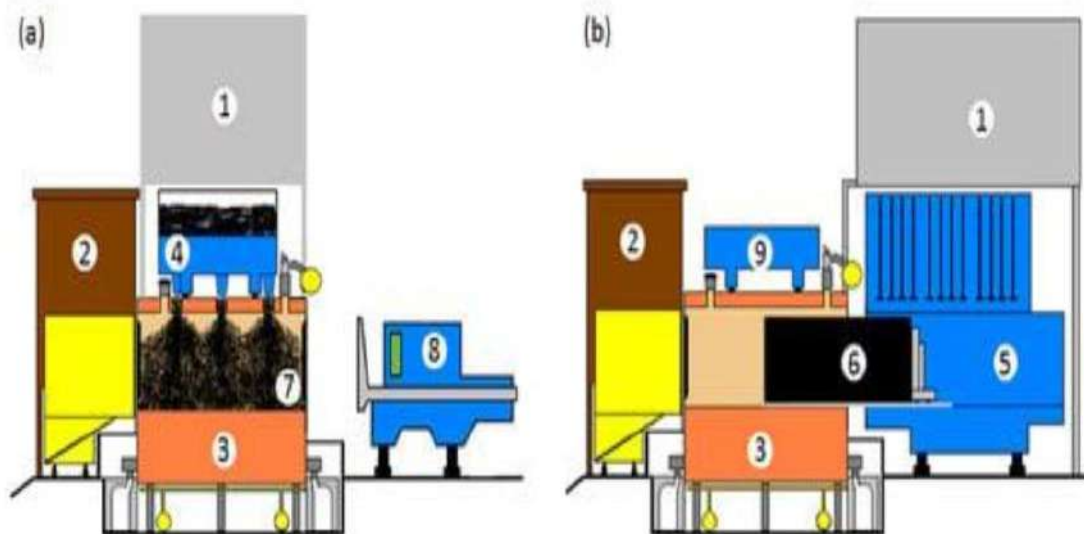


Рис. 2.8. Компонування ТЗВМ і коксової батареї

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [33]



1 – вугільна башта; 2 – башта гасіння; 3 – коксова батарея;
 4 – завантажувальна машина; 5 – трамбувально-завантажувальна
 виштовхувальна машина; 6 – трамбований вугільний піріг; 7 – вугільна
 шихта, що завантажена гравітаційним способом; 8 – виштовхувальна
 машина; 9 – завантажувальна машина.

Рис. 2.9. Принципова схема коксової батареї з верхнім (а) та трамбованим (б) завантаженням

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [5, 34]

Для забезпечення коксової батареї вугільною шихтою, придатною для трамбування, використовуються існуючі потужності вуглезбагачувальної фабрики, які забезпечують прийом і зберігання вугілля, що надходить, його дозування і кінцеве подрібнення.

В існуючому дробарному відділенні вуглепідготовчого цеху реалізовані технічні рішення по дробленню компонентів вугільної шихти на молоткових дробарках до крупності 90%+1% класу менше 3,15 мм і по зволоженню з подальшим контролем її вологості по конвеєру подачі на вугільну башту [34].

Після подрібнення шихта конвеєром направляється в нову вугільну башту, обладнану в нижній частині стаціонарним штампувальним комплексом (що дозволяє уникнути додаткових витрат на будівництво перевантажувальних станцій). З операційними приміщеннями вугільної вежі зблоковано приміщення стенду для заміни трамбувальних візків і ремонту трамбувальних стрижнів. Трамбований вугільний пиріг транспортується і завантажується в камеру коксування новою завантажувальною машиною.

Вугільний пиріг подається в коксову піч на лотку разом із замикаючою стійкою, яка фіксується з ним та виконує функцію задньої стінки трамбувального ящика під час трамбування.

В процесі трамбування і завантаження вугільного пирога можливі розсипи вугільної шихти, які потрапляють на стрічковий конвеєр, розташований під трамбувальним ящиком завантажувальної машини, і періодично скидаються в накопичувальний бункер з подальшим вивезенням вантажівкою.

Для виштовхування коксу з коксових печей використовується коксовий виштовхувач.

Для забезпечення правильної роботи нової завантажувальної машини, її точної фіксації при розміщенні на коксовій печі, передбачена реконструкція шляхів коксовиштовхувача з установкою щільних рейок.

На новому терміналі заплановано ремонт і технічне обслуговування комплекту коксових машин (коксозов і перевантажувальна машина)

Модернізована батарея обладнана новими, сучасними та ефективними системами збору та очищення газів, що виділяються під час завантаження та обслуговування печей, встановлених як на новій завантажувальній машині, так і на існуючих новій завантажувальній машині, так і на існуючому коксовому виштовхувачі.

Після переведення коксової батареї на технологію трамбування вугільної шихти зберігається можливість роботи коксової батареї з використанням технології верхнього завантаження.

Аналізуючи дані таблицях 2.12 і 2.13, можна зробити висновок про значне поліпшення всіх досліджуваних показників якості коксу, отриманого методом трамбування шихти, порівняно з методом верхнього завантаження. Так, механічна міцність M_{25} збільшилася в середньому на 2,2%, а CSR - на 5,0%, тоді як середні показники M_{10} і CRI, навпаки, знизилися на 2,01 і 0,2% відповідно. Крім того, кокс, отриманий методом трамбованого завантаження, характеризується нижчими значеннями зольності (на 0,3%) і вмісту загальної сірки (на 0,1%).

Таблиця 2.12

Якість коксу з шихти, яка завантажена гравітаційним способом

Показник	Технічний аналіз		Механічна міцність, %		Термохімічні властивості, %	
	A^d , %	S^d , %	M_{25}	M_{10}	CSR	CRI
Макимум	12,14	0,7	86,5	8,4	52,2	40,0
Мінімум	11,2	0,4	84,0	7,8	46,6	36,0
Середнє	11,6	0,5	85,2	8,0	48,9	38,0

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [34]

Таблиця 2.13

Якість коксу з трамбованої шихти

Показник	Технічний аналіз		Механічна міцність, %		Термохімічні властивості, %	
	A ^d , %	S ^d , %	M ₂₅	M ₁₀	CSR	CRI
Максимум	12,0	0,5	89,3	6,9	58,1	39,3
Мінімум	10,5	0,4	85,5	5,5	49,3	36,0
Середнє	11,3	0,4	87,4	5,9	53,9	37,8

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [34]

Отримані результати максимально узгоджуються з аналогічними дослідженнями, які були проведені в Австралії на Illawara Coke Company (ICC) [35]. Порівняно з коксом, отриманим з гравітаційної шихти, кокс, отриманий зі трамбованої шихти, характеризувався дещо вищим значенням індексу CSR та аналогічним значенням індексу CRI. З іншого боку, оцінка впливу щільності вугільної шихти на якість коксу під час промислових випробувань на коксохімічному заводі Sesa Kembla (завод безперервного коксування в Індії) [36] не показала змін показників CSR та CRI. Кокс, отриманий з ущільненої вугільної шихти, характеризувався аналогічним значенням показників НСК, як і у випадку гравітаційної системи. В роботі [37] дослідження проводили в дослідно-промисловій печі з використанням промислової шихти для шихти густиною 926 і 996 кг/м³. Встановлено, що збільшення щільності в досліджуваному діапазоні позитивно вплинуло на показник CSR, який збільшився з 57,5 до 62,9 %.

Позитивний ефект від використання технології трамбування (по відношенню до гравітаційної) спостерігався в роботі [38]. Випробування проводилися для трьох типів вугільних шихт. Кокс, вироблений зі трамбованих вугільних сумішей, характеризувався вищим значенням індексу

CSR і нижчим значенням індексу CRI. Інші дослідники [29] виявили, що кокс, отриманий за технологією трамбування, характеризувався аналогічним значенням індексу CRI та вищим індексом CSR.

У загальнодоступній літературі відсутня інформація про вплив вмісту низькоспікливого вугілля в коксовій шихті на параметри текстури і структури, що формують показники якості коксу.

Що стосується показника якості коксу M_{10} , то існує загальна думка, що він покращується при ущільненні вугільної шихти [30-32], в той час як для $M_{40(25)}$ автори роблять висновок, що ущільнення вугільної шихти (тобто підвищення її щільності) в деяких випадках покращує якість коксу [31,33], а в деяких - не покращує або може навіть погіршити якість [30].

2.3 Економічне обґрунтування запропонованих рішень

Як вже зазначалося, технологія трамбування вугільної шихти дає можливість істотно скоротити в шихті частку добреспікливого вугілля та розширити сировинну базу, залучаючи більш дешеве та доступне вугілля (з високим вмістом летких речовин та низькою здатністю до спікання), при цьому досягати високий рівень якості металургійного коксу за показниками механічної міцності, реакційної здатності та післяреакційної міцності.

Так, аналіз досвіду впровадження технології трамбування на коксохімічному виробництві «АрселорМіттал Кривий Ріг» показав, що вдалося збільшити вміст низькоспікливого високолеткого вугілля (Г, ГЖ, ГЖП) приблизно з 25 % до 70% (у порівнянні з технологією гравітаційного способу завантаження), що, безумовно, відобразилося на вартості вугільної шихти для коксування. В таблиці 2.14 наведено порівняльний склад трамбованої шихти та традиційної (з технологією гравітаційного способу завантаження) та їх вартість.

Таблиця 2.14

Порівняльний склад трамбованої шихти та традиційної (з технологією гравітаційного способу завантаження) та їх вартість

Постачальник, компонент шихти, ЦЗФ	Марка вугілля	Вартість	Склад вугільної шихти, %	
			Традиційна (гравітаційне завантаження)	Підготовлена методом трамбування
ТОВ «Ресурс»	КЖП	232,68	15	20
ЦЗФ «Усковська»	ГЖ	268,55	15	20
Rocklick	К	400	30	25
ЗФ «Свято- Варваринська»	Ж	385	20	0
Розріз Червонобродський	КС	262,47	0	15
ЗФ «Березовська»	ПС	384,19	20	20
Вартість вугільної шихти, \$/т			349,0	316,5

Примітка. Джерело: розроблено автором

Слід зазначити, що середня ринкова ціна вугільної шихти для технології верхнього завантаження становила \$347,0/т, а для технології трамбованого завантаження - \$316,5/т. Таким чином, використання технології трамбування дозволяє істотно скоротити в шихті частку добреспіктивного вугілля та здешевити вартість вугільної сировини на \$31,5/т.

Також використання трамбування вугільно шихти дає можливість поліпшити якість коксу: M_{25} збільшився на 2,2 % (з 85,2 % до 87,4 %) та M_{10} зменшився на 2,1 % (з 8,0 % до 5,9 %). При цьому гаряча міцність CSR при трамбуванні шихти збільшується на 5 % (з 48,9 % до 53,9 %) а показник CRI знижується на 1,8 % (з 38 % до 37,8 %).

У відповідності до методики пофакторного аналізу [38,39] підвищення M_{25} на кожен 1 % знижує витрату коксу в доменній плавці на 0,6 % і підвищує продуктивність доменної печі на 0,6 %; зниження M_{10} на кожен 1 % призводить до зниження витрат коксу в доменній плавці на 2,8 % і збільшує продуктивність доменної печі на 2,8 %.

Отже, зменшення витрати коксу становитиме 7,2 %.

В перерахунку на одиницю маси при використанні в доменній печі в середньому 490 кг коксу на тонну чавуну, зменшення витрат коксу складе

$$490 \cdot 5,68/100 = 35,28 \text{ кг/т чавуну}$$

Отже, враховуючи, що як механічна, так і «гаряча» міцність коксу з трамбованої шихти значно краща, ніж коксу з насипної шихти за показниками термохімічних властивостей можна очікувати зменшення витрати коксу в доменній плавці [28, 29] на 35,28 кг/т чавуну, а підвищення продуктивності доменної печі становитиме 7,2 %.

ВИСНОВКИ

Розглянуто особливості формування сировинної бази коксування для коксохімічних виробництв України. На прикладі КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Для підвищення конкурентоздатності української металопродукції необхідні створення і широке застосування ресурсо- і енергозберігаючих технологій та інноваційних науково-технічних рішень, що у свою чергу вимагає дотримання комплексу обов'язкових компенсуючих заходів, одним з яких є поліпшення якості коксу.

Вимоги до якості коксу в умовах інтенсифікації та вдосконалення процесу доменної плавки визначені та сформульовані.

Забезпечення перспективних показників металургійних властивостей доменного коксу залежить від властивостей та технологічних характеристик вугільної сировини.

Використання імпортової сировини у складі шихт для коксування обумовлено низкою об'єктивних факторів: дефіцитом українського вугілля відповідної якості, підвищенням вимог до якості коксу з метою зменшення його витрати у доменній плавці, впровадженням в доменному виробництві енергозберігаючих технологій.

Досвід роботи коксохімічних підприємств України в умовах багатобасейнової сировинної бази коксування показав, що необхідним є розробка та впровадження науково-обґрунтованих, економічно доцільних підходів для вдосконалення технології підготовки вугілля до коксування, а саме:

- оптимізація складу шихт з урахуванням петрографічних характеристик її компонентів;

- необхідність відмови від схеми остаточного подрібнення ДШ та перехід на більш ефективні ГДК або ДДК в комплексі з відсівом дрібних класів перед подрібненням;

- корегування складів шихт з урахуванням тиску розпору імпортного вугілля;
- контроль ступеню окиснення вугільних концентратів у зв'язку з розширенням географії їх постачання і уточнення технологічних прийомів щодо їх зберігання, використання для коксування.

Для розширення сировинної бази з метою залучення ресурсів вітчизняного газового вугілля необхідним є впровадження перспективних технологій таких як модифікація шихт за допомогою добавок, коксування трамбованих шихт, технологія коксування сухої шихти, технологія коксування термічно підготовлених шихт.

Вивчено досвід реалізації проекту ДП «ГІПРОКОКС» і компанії NuDe переведення діючої коксової батареї з гравітаційного способу завантаження коксових печей на технологію штапованого завантаження вугільного пирога. Прийняті рішення дозволили реалізувати проект з максимальним збереженням існуючої інфраструктури і мінімальним набором додаткових об'єктів. При цьому збережена можливість роботи з використанням верхнього завантаження коксових батарей за традиційною технологією, в разі зміни умов сировинної бази для коксування. В процесі проектування і реалізації було впроваджено ряд нових технічних рішень, які дозволяють забезпечити стабільну і успішну роботу обладнання і конструкцій коксової батареї і прилеглої інфраструктури. Висота камери коксування становить 7 метрів при середній ширині 480 мм, що робить цей проект унікальним для сучасної технології трамбування у світовому масштабі. Застосування технології трамбування дозволило збільшити вміст низькоспікливого високолеткого вугілля (Г, ГЖ, ГЖП) приблизно з 25% до 70% (у порівнянні з технологією гравітаційного способу завантаження).

Технологія завантаження трамбованої вугільної шихти забезпечує отримання високоякісного доменного коксу при використанні у вугільній шихті до 70% газового і низькоспікливого вугілля. При цьому якість виробленого металургійного коксу покращується в порівнянні з коксом,

отриманим за традиційною технологією. Так, механічна міцність M_{25} збільшилася в середньому на 2,2%, показник CSR на 5,0 %, тоді як середні показники M_{10} та CRI, навпаки, зменшилися на 2,01 та 0,2 % відповідно. Також кокс, отриманий методом трамбування шихти, характеризується нижчими значеннями зольності (0,3%) і вмісту загальної сірки (0,1%).

Використання технології трамбування також дозволяє знизити вартість вугільної шихти на \$32,5/тонну. Враховуючи значну різницю у вартості гравітаційної та трамбованої вугільної шихти, термін окупності інвестицій, необхідних для реконструкції, становить менше 1 року.

Аналогічні проекти з переведення діючих коксових батарей можуть бути реалізовані на існуючих коксових батареях для поліпшення якісних показників виробленого коксу і значного підвищення економічних показників роботи коксохімічних підприємств.

Отже, за результатами розрахунків можна зробити висновок, що реалізація запропонованих заходів щодо спеціальної підготовки вугільної сировини та поліпшення техніко-економічних показників доменної плавки буде досягнуто за рахунок економії коксу в доменному процесі на 7,2 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Товаровский И.Г., Лялюк В.П. Из огня да в полымя. Переход на бескоксовые технологии в доменном производстве с полным замещением природного газа. *Металлургический компас. Украина-Мир*. 2009. №1. С. 20-26.
2. Товаровский И.Г., Лялюк В.П. Эволюция доменной плавки // Днепропетровск: Пороги, 2001. 424 с.
3. Lyalyuk, V.P, Shmeltser, E.O., Kassim, D.A. Improving the technology production of coke for blast furnace smelting. Octan Print, Praga: 2022. 197 p.
<https://doi.org/10.46489/ITTPROC-229>
4. M.A. Di 'ez*, R. Alvarez, C. Barriocanal. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*. 2002. Vol. 50. P. 389–412.
5. Справочник коксохимика. В 6-ти томах. Том 1. Угли для коксования. Обогащение углей. Подготовка углей к коксованию / Под общ. ред. Л.Н. Борисова, Ю.Г. Шаповалова. Харьков: Издательский Дом “Инжек”, 2010. – 536 с.
6. Suárez-Ruiz, I. and Crelling, J.C. *Applied Coal Petrology. The Role of Petrology in Coal Utilization*. Elsevier, 2018. Amsterdam, 388 p.
7. Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація: ДСТУ 3472–1996. – [Действующий от 1997–01–01]. – К.: Держстандарт України, 1997. – 22 с. – (Національний стандарт України).
8. Развитие научных основ составления угольных шихт из углей разных бассейнов / Кафтан Ю.С., Дроздник И.Д., Мирошниченко Д.В и др. // Углекимический журнал. – 2010. – № 3-4. – С. 25-31.
9. Richard Sakurovs. Interactions between coking coals in blends. *Fuel*. 2002. Vol. 82. P.439–450.

10. Lauren North, Karen Blackmore, Keith Nesbitt, Merrick R. Mahoney. Models of coke quality prediction and the relationships to input variables: A review. *Fuel*. 2018. Vol. 219. P. 426–445.
11. Mihaela Grigore, Richard Sakurovs, David French, Veena Sahajwalla. Properties and CO₂ reactivity of the inert and reactive maceral-derived components in cokes. *International Journal of Coal Geology*. 2012. Vol. 98. P. 1–9.
12. Sushil Gupta, Fenglei Shen, Woon-Jae Lee, Graham O'Brien. Improving coke strength prediction using automated coal petrography. *Fuel*. 2012. Vol. 94. P. 368–373.
13. Xing Xing, Harold Rogers, Paul Zulli, Kim Hockings, Oleg Ostrovski. Effect of coal properties on the strength of coke under simulated blast furnace conditions. *Fuel*. 2019. Vol. 237. P. 775–785.
14. Pusz S., Buszko R. Reflectance parameters of cokes in relation to their reactivity index (CRI) and the strength after reaction (CSR), from coals of the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *International Journal of Coal Geology*. 2012. Vol. 90. P. 9–43.
15. Dash PS, Guha M, Chakraborty D, Banerjee PK. Prediction of coke CSR from coal blend characteristics using various techniques: a comparative evaluation. *Int J Coal Prep Util*. 2012. Vol. 32(4). P. 92–169.
16. Hilding T., Gupta S., Sahajwalla V., Byorkman B., Wikstzom J. Degradation Behavior of a High CSR Coke in an Experimental Blast Furnace: Effect of Carbon Structure and Alkali Reactions. *ISSY International*. 2005. Vol. 45 (7). P. 1041–1050.
17. Grigore M., Sakurovs R., French D., Sahajwalla V. Properties and CO₂ reactivity of the inert and reactive maceral derived components in cokes. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 98. 2012. P. 1–9.
18. Bruno D. Flores, Angeles G. Borrego, Maria A. Diez, Guilherme L.R. da Silva, Victor Zymla, Antônio C.F. Vilela, Eduardo Osório. How coke optical

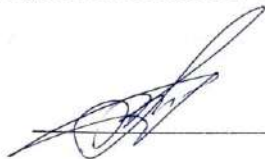
- texture became a relevant tool for understanding coal blending and coke quality. *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 164. P. 13–23.
- 19.Pusz S., Krzesińska M., Smędowski Ł., Majewska J., Pilawa B., Kwiecińska B. Changes in a coke structure due to reaction with carbon dioxide. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 81(4). 2010. P. 92-287.
- 20.Pusz S., Buszko R. Microscopic characteristics and technological parameters of cokes from various initial coals. In: 62nd Meeting of the International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP); 2010.
- 21.Mariano de Córdova, Jorge Madias, Javier Barreiro. Review of modeling of coal blends for prediction of coke // *Contribuição técnica ao 46 Seminário de Redução de Minerio de Ferro e Matérias-primas*, 26-30 setembro de 2016, Rio de Janeiro, Brasil.
- 22.Использование петрографических характеристик и новых комплексных показателей для оценки свойств углей и межбассейновых шихт ОАО “Запорожжкокс” / Ю.А. Чернышов, С.А. Овчинникова, А.В. Подлубный и др. // *Углекимический журнал*. – 2009. – №1-2. – С. 12-20.
- 23.Improving the technology of preparing coal for the production of blast-furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 1. Optimizing the composition of coal batch by means of petrographic characteristics / V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, E.O. Shmeltser, I.A. Lyakhova // *Petroleum and coal*. 2019. Vol. 61(1). pp.90-93.
- 24.Rejdak, M.; Strugała, A.; Sobolewski, A. Stamp-Charged Coke-Making Technology—The Effect of Charge Density and the Addition of Semi-Soft Coals on the Structural, Textural and Quality Parameters of Coke. *Energies* 2021, 14, 3401.
- 25.Reid M.H., Mahoney M.R., Monaghan B.J. A coke analogue for the study of the effects of minerals on coke reactivity. *ISIJ Int*. 2014. Vol.54(3):628–33.
- 26.Rejdak, M.; Wasielewski, R. Mechanical compaction of coking coals for carbonization in stamp-charging coke ovens. *Physicochem. Probl. Miner. Process*. 2015, 51, 151.

27. Zhang, Y.; Bai, J.; Xu, J.; Zhong, X.; Zhao, Z.; Liu, H. Effects of stamp-charging coke making on strength and high temperature thermal properties of coke. *J. Environ. Sci.* 2013, 25, 190.
28. «Доменные печи. Нормативы расхода кокса. Руководящий документ. МЧМ СССР. 1987 г.»
29. «Доменные печи. Нормативы расхода кокса. Руководящий документ. ООО «Метинвест Холдинг. 2015 г.»

Декларація
про дотримання академічної доброчесності
під час написання курсової/кваліфікаційної роботи
здобувачем вищої освіти
Державного університету економіки і технологій

Я, Тесленко Сергій Ігорович, студент II курсу, групи ХТ-23м Державного університету економіки і технологій розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) заборонену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текст в інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

10.01.2025



С. Тесленко

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

**ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ
 МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Здобувача Тесленка Сергія Ігоровича

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-23-м

Тема кваліфікаційної роботи магістра

Вдосконалення виробництва коксу шляхом використання технології
 трамбування вугільної шихти

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	<u>70;</u>
таблиць	<u>17;</u>
схем і рисунків	<u>12;</u>
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	<u>-.</u>

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи магістра

Кваліфікаційна робота присвячена вдосконаленню технології
 вуглепідготовки шляхом трамбування вугільної шихти.

Проаналізовано досвід реалізації проекту ДП «ГІПРОКОКС» і компанії
 HiDe переведення діючої коксової батареї з гравітаційного способу
 завантаження коксових печей на технологію штампованого завантаження
 вугільного пирога. Прийняті рішення дозволили реалізувати проект з
 максимальним збереженням існуючої інфраструктури і мінімальним набором
 додаткових об'єктів. При цьому збережена можливість роботи з використанням
 верхнього завантаження коксових батарей за традиційною технологією, в разі
 зміни умов сировинної бази для коксування

В кваліфікаційній роботі доведено, що використання технології
 трамбування також дозволяє знизити вартість вугільної шихти на \$32,5/тону.
 Враховуючи значну різницю у вартості гравітаційної та трамбованої вугільної
 шихти, термін окупності інвестицій, необхідних для реконструкції, становить
 менше 1 року.

Недоліки кваліфікаційної магістерської роботи

Суттєвих недоліків не виявлено. 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 магістерської роботи, ступінь самостійності виконання роботи, уміння користуватися літературними матеріалами

Здобувач Тесленко С.І. під час написання кваліфікаційної магістерської роботи показав відмінну загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працював самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та економічно обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної магістерської роботи

Розроблені рішення та рекомендації по впровадженню технології коксування трамбованої вугільної шихти можуть бути використані в умовах коксового цеху КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Оцінка кваліфікаційної магістерської роботи відмінно/90/А

Керівник Шмельцер Катерина Олегівна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Зав. кафедри, к.т.н, доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

« 15 » січня 2025 р.

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

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

Текст (вибрати необхідне):

- кваліфікаційної роботи;
 навчальної/наукової праці;
 наукових матеріалів

*Вдосконалення виробництва коксу шляхом використання технології
трамбування вугільної шихти*

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

Тесленко Сергій Ігорович

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 70 сторінок друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 14,85 %.

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадіння із:

- власними публікаціями;
 термінологією;
 посиланнями на літературу, праці вчених;
 посиланнями на законодавство;
 загальноживаними 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 2025 р. протокол № 8.

Керівник підрозділу



(підпис)

К. Шмельцер

Дата «14» січня 2025 р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА

про підготовку здобувача-випускника

Тесленко Сергія Ігоровича
(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 Вдосконалення виробництва коксу шляхом використання технології трамбування вугільної шихти

Керівник кваліфікаційної роботи: зав.кафедри, к.т.н. Шмельцер К.О.
(посада, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консульта	Примітка
1	Аналітична частина	Шмельцер К.О.	зарах	15.01	<i>Шмельцер</i>	
2	Основна частина	Шмельцер К.О.	зарах	15.01	<i>Шмельцер</i>	
3						
4						

Завідувач кафедри

Шмельцер
(підпис)

К.О. Шмельцер
(ініціали, прізвище)

« 15 » 01 2015 р.

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

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
(бакалавра, магістра)
 Здобувача Тесленко Сергія Ігоровича
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи
Тема кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
<u>Вдосконалення виробництва коксу шляхом використання технології трамбування вугільної шихти</u>
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
<u>Вибір та обґрунтування перспективної технології трамбування для розширення сировинної бази коксування та поліпшення якості коксу для доменної плавки</u>
Переваги кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
<u>Проаналізовано досвід реалізації проекту ДП «ГІПРОКОКС» і компанії HuDe переведення діючої коксової батареї з гравітаційного способу завантаження коксових печей на технологію трамбованого завантаження вугільного пирога. Обґрунтовано економічну та технологічну доцільність впровадження технології Трамбування.</u>
Недоліки кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
<u>Вважаю, що не вдало структуровано матеріал, що стосується впливу факторів на характеристики трамбованого вугільного пирога та якість коксу. В деяких місцях зустрічається невдалий переклад, допущені стилістичні огріхи.</u>
Рекомендації: <u>робота може бути рекомендована до захисту.</u>
Рецензент <u>Корній Марина Віталіївна</u> <small>(прізвище, ім'я та по-батькові)</small>

К. І. В. Н., доцент
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

Корній
(підпис)