

**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

Синельникової Олександри Михайлівни

Формування металургійних властивостей коксу шляхом
на тему оптимізації компонентного складу міжбасейнових
петрографічно неоднорідних шихт

за матеріалами КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

науковий керівник к.х.н. _____ Шмельцер К.О.
(підпис)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри
від 14.01.2026 р. № 9

Завідувач кафедри _____

(підпис)

к.т.н., доцент

К.О. Шмельцер

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Хімічних технологій та інженерії

доцент, к.т.н.
Шмельцер К.О.
(підпис) (посада, вчене звання ,
прізвище ініціали)

« 15 » листопада 2026 року

ЗАВДАННЯ

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ
ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Синельниковій Олександрі Михайлівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи магістра Формування металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних шихт
керівник кваліфікаційної роботи магістра Шмельцер Катерина Олегівна, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу №718-ст від «20» жовтня 2025 р.
2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 15.01.2026 р.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи магістра Техніко-економічні показники роботи вуглепідготовчого цеху КХВ ПАТ «АМКР»
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 - 4.1 Аналітична частина: Аналіз сировинної бази коксування на прикладі КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Дослідження технологічних властивостей вугілля сировинної бази коксування. Характеристика вугільної сировини для коксування. Технологічні властивості вугілля сировинної бази коксування
 - 4.2 Основна частина: Методика визначення співвідношення якості іноземного вугілля із вітчизняною класифікацією. Формування поліпшених металургійних властивостей та структури коксу шляхом оптимізації складу петрографічно неоднорідних міжбасейнових вугільних шихт. Забезпечення раціонального температурного режиму коксування петрографічно неоднорідного вугілля. Економічна ефективність дослідницьких рішень
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. кафедри		
2 Основна частина	Шмельцер К.О., зав. кафедри		

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач

(підпис)

Синельникова О.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Шмельцер К.О.

(прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

Синельникова О.М. Формування металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних шихт. – Рукопис.

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

Кваліфікаційна робота присвячена формуванню металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних шихт.

В роботі в результаті аналізу сировинної бази коксування КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» встановлено, що вона формується з вугілля різних марок, родовищ і ступенів метаморфізму, що зумовлює значну варіабельність їхніх технологічних властивостей. Обмеженість власної сировинної бази та зростаюча частка імпортного вугілля ускладнюють забезпечення стабільної якості коксу та вимагають гнучкого підходу до формування вугільних шихт.

Зазначено, що забезпечення економічної ефективності та результативності виробництва коксу в умовах багатобасейнової сировинної бази коксування потребує оптимізації компонентного складу вугільних шихт, вдосконалення основних технологічних методів підготовки з урахуванням її петрографічних характеристик.

Показано, що обов'язковим є формування вугільної суміші з урахуванням мацерального складу, показника відбиття вітриніту та розподілу вітринітової складової за стадіями метаморфізму, оптимального співвідношення між спікливими (Σ СК) і опіснюючими компонентами (Σ ОК).

В якості вугілля для дослідження було використано вугілля, яке входить у сировинну базу коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

В роботі використовувалися стандартизовані методи дослідження технологічних і пластично-в'язких властивостей вугілля та вугільних партій. Якісні характеристики коксу визначалися за допомогою фізико-механічних і

термохімічних методів дослідження стандартизованих показників: подрібнюваності (M_{25}), абразивності (M_{10}), реактивності (CRI), міцності після реакції (CSR) і питомого електричного опору (ρ). Статистичний аналіз результатів, аналіз впливу факторів сировини на механічні та термохімічні властивості коксу проводилися за допомогою ліцензійної комп'ютерної програми Microsoft Excel.

За результатами експериментального промислового коксування науково обґрунтованих складів шихти, розроблених із використанням імпортного вугілля, запропоновано два варіанти вугільних шихт, кокс з яких має найкращі показники якості.

Якісні показники металургійного коксу були поліпшені за рахунок додавання до шихти 10% вугілля G. Таким чином, механічна міцність за показником дробимості M_{25} збільшилася на 0,6%, а стирання M_{10} зменшилося на 0,4%. Зафіксовано істотне поліпшення термохімічних властивостей і підвищення впорядкованості структури вуглецю: реактивність CRI знизилася на 3,1%, міцність після реакції CSR збільшилася на 8,3%, а питомий опір знизився на 8,4%.

Ключові слова: вугільна сировина, петрографічні характеристики, раціональний склад шихти, механічна міцність, термохімічні властивості, впорядкованість структури вуглецю.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Аналіз сировинної бази коксування на прикладі КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	10
1.2 Дослідження технологічних властивостей вугілля сировинної бази коксування	18
1.2.1 Характеристика вугільної сировини для коксування. Нормативні джерела	18
1.2.2 Технологічні властивості вугілля сировинної бази коксування	23
1.3 Висновки до аналітичної частини	25
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	27
2.1 Методика визначення співвідношення якості іноземного вугілля із вітчизняною класифікацією	27
2.2 Формування поліпшених металургійних властивостей та структури коксу шляхом оптимізації складу петрографічно неоднорідних міжбасейнових вугільних шихт	29
2.2.1 Взаємодія вугілля різних басейнів при коксування в сумішах	29
2.2.2 Формування поліпшених металургійних властивостей та структури коксу шляхом оптимізації складу петрографічно неоднорідних міжбасейнових вугільних шихт	36
2.3 Забезпечення раціонального температурного режиму коксування петрографічно неоднорідного вугілля	53
2.4 Економічна ефективність дослідницьких рішень	57
2.5 Висновки до основної частини	62
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

В даний час доменне виробництво висуває підвищені вимоги до якості коксу, норми якого зафіксовані як в діючих технічних умовах (A^d , S^d , M_{10} , M_{25}), так і в ISO 18894-2006 (CRI і CSR). Забезпечення сучасних доменних печей високоякісним металургійним паливом і проблема поліпшення фізико-механічних властивостей коксу нерозривно пов'язані з питаннями розширення сировинної бази коксування і раціонального використання в процесі коксового виробництва різних вугілля.

Аналіз вугільних ресурсів показує, що вітчизняна сировинна база не в змозі самостійно забезпечити виробництво доменного коксу поліпшеної якості. Внаслідок цього гостро постає питання про залучення і раціональне використання у вугільних шихтах для коксування імпортних компонентів (вугілля з далекого зарубіжжя).

Так, в останні роки сировинну вугільну базу коксування більшості коксохімічних і металургійних підприємств відрізняє великий дефіцит найбільш цінних за коксівністю вугілля марок Ж, К, КП і ПС, а також частково і марки КС з низьким виходом летючих речовин.

Через дефіцит коксівного вугілля на підприємстві щомісяця плануються вугільні шихти для коксування різні за складом і якістю, що негативно позначається на якості одержуваного коксу, особливо при нестабільній і некомплектній поставці вугілля для коксування. Тому для отримання стабільного і задовільного за якістю коксу необхідно застосування раціонального розподілу коксівного вугілля і підбору шихт оптимального складу для підприємства.

В умовах залучення та використання для коксування імпортової вугільної сировини, що відрізняється за технологічними властивостями, петрографічними характеристиками, надходить з різних країн, басейнів та континентів, складання вугільної шихти з урахуванням марок вугілля не

відображає фактичного складу суміші та її характеристик, не повною мірою враховує особливості речовинного складу та властивостей окремих складових органічної маси вугілля. Класифікація вугілля далекого зарубіжжя та його об'єднання у класи та групи відрізняється від прийнятої класифікації за марками згідно з ДСТУ 3472-96. Отже, використання імпортного вугілля ускладнюється різними підходами до класифікації, негармонійністю вітчизняних та іноземних нормативних документів.

З огляду на багатобасейнову сировинну базу для коксування, яка визначає відмінності в технологічних властивостях і матеріальному складі вугільних концентратів, необхідно вдосконалити та поліпшити основні технологічні методи підготовки при їх використанні в вугільних шихтах. Розробка рекомендацій щодо отримання доменного коксу стабільної якості з оптимізацією складу, властивостей і ступеня подрібнення шихти з урахуванням її петрографічних характеристик дозволить підвищити техніко-економічні показники роботи коксохімічного виробництва.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз сировинної бази коксування на прикладі КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Сировинна база коксування коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» представлена вугільними концентратами різних збагачувальних фабрик України, Росії, Канади, США й Австралії. Сировинна база коксування постійно змінюється. Для порівняння у таблиці 1.1 наведене надходження вугільних концентратів різних країн у 2006 і 2007 роках [1]:

Таблиця 1.1

Надходження вугільних концентратів різних країн

Походження вугілля	2007 рік		2006 рік	
	тис.т	%	тис. т	%
Вугілля Росії	1003,5	25,3	921,0	25,236
Вугілля зарубіжжя (Казахстан, США, Канада, Австралія, Польща, ін.)	1904,6	48,1	1039,3	28,478
Вугілля України	1055	26,6	1689,2	46,286

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

У таблиці 1.2 представлений аналіз коливань марочного й компонентного складу шихти за 2007 рік. Аналіз показав, що марочний і компонентний склад заводської шихти відрізняються крайньою нестабільністю й помітно коливаються. У складі шихти представлене українське вугілля марок «Г», «Ж», «ПС» і «К», російське вугілля марок «Г» «ГЖ» «ГЖП», «2Ж» і «К-9» і суміші вугілля марок «КЖ+К+КС» і «ПС+КС»; казахстанське вугілля - суміш марок «КЖ+К+КП»; американське, канадське й австралійське вугілля різних типів. Відзначене вище істотно ускладнює

Таблиця 1.2

Характеристика марочного складу вугільної шихти

Період	Країна-постачальник. Марка вугілля, зазначена в посвідченні якості																		
	Україна				росія								Казахстан	США		Канада			Австралія
	Г	Ж	К	ПС	ГЖ	Гр	ГЖП	2Ж	К-9	КС	КП+ К+КС	ПС+ КС	КЖ+ К+КП	Ігл	Велс	Вел мор	К-1	Інте гриті	Карбунвал Іналта
січень	-	16,6	7,8	-	1,0	0,8	-	15,0	-	-	1,4	5,6	38,1	-	-	-	13,7	-	-
лютий	-	21,8	8,2	-	-	2,6	6,4	8,3	-	1,0	-	5,2	39,4	-	-	-	7,1	-	-
березень	-	25,9	11,5	-	-	4,5	5,1	15,3	-	-	0,5	2,7	32,1	-	-	-	2,4	-	-
квітень	-	28,6	9,9	-	-	3,6	0,2	19,0	-	-	8	0,2	30,5	-	-	-	-	-	-
травень	-	27,1	9,2	-	-	3,9	-	13,0	1,0	-	13,5	-	32,3	-	-	-	-	-	-
червень	-	24,6	9,3	-	-	4,3	-	8,1	5,4	-	14,2	-	34,1	-	-	-	-	-	-
липень	0,1	25,2	9,9	-	-	4,5	-	1,7	4,7	-	15,1	-	38,8	-	-	-	-	-	-
серпень	2,6	12,2	9,0	-	-	3,2	-	4,5	6,5	-	7,2	-	41,8	-	-	-	-	3,4	9,6
вересень	2,3	2,9	8,2	-	-	4,6	-	4,8	0,9	-	9,2	-	39,7	9,0	-	2,6	-	8,1	7,7
жовтень	-	-	11,0	-	-	10,0	-	8,0	-	-	10,0	-	35,0	26,0	13,7	-	-	-	-
листопад	-	-	13,0	1,4	-	3,3	3,1	5,3	-	-	3,9	-	36,1	-	24,3	-	-	9,6	-
грудень	-	-	13,2	3,9	-	4,4	1,3	13,6	-	-	4,9	-	32,2	-	3,3	-	-	22,2	-

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

процеси прийому, складування й дозування вугілля, а також забезпечення сталості марочного й компонентного складів шихти й, відповідно, стабільності якісних показників металургійного коксу.

У таблицях 1.3 - 1.5 наведені якісні характеристики вугільних шихт [1].

Таблиця 1.3

Показники технічного аналізу вугільної шихти

Місяць	Технічний аналіз					
	$W^r_t, \%$	$A^d, \%$	$S^d_t, \%$	$V^{daf}, \%$	Y, мм	X, мм
Січень	10,1	9,7	0,99	27,9	15	35
Лютий	10,1	9,8	1,12	28,2	15	38
Березень	10,1	9,6	1,25	28,9	16	39
Квітень	9,5	9,3	1,33	28,8	17	41
Травень	9,2	9,3	1,31	27,8	17	40
Червень	8,8	9,2	1,17	27,3	17	36
Липень	8,9	9,6	1,25	27,2	16	39
Серпень	8,5	9,9	1,02	27,4	15	41
Вересень	8,7	9,9	0,85	28,3	15	41
Жовтень	8,9	9,7	0,76	29,3	15	44
Листопад	9,8	9,7	0,81	29,4	15	46
Грудень	9,8	9,8	0,77	29,4	15	45
Рік	9,4	9,6	1,05	28,3	15,7	40,9

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Таблиця 1.4

Коефіцієнти рівномірності показників якості вугільної шихти

Коефіцієнт рівномірності	Місяць											
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
За вологою	0,2	0,73	0,69	0,63	0,67	0,69	0,74	0,74	0,75	0,76	0,78	0,76
За золюю	0,9	0,97	0,84	0,81	0,73	0,78	0,79	0,80	0,81	0,85	0,83	0,82
За сіркою	0,6	0,67	0,56	0,55	0,70	0,69	0,71	0,72	0,74	0,77	0,81	0,78
За леткими р-нами	0,6	0,91	0,78	0,78	0,81	0,83	0,86	0,87	0,85	0,76	0,76	0,73

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Таблиця 1.5

**Гранулометричний склад, помел окремих
класів крупності вугільної шихти**

	Місяць	Гранулометричний склад			
		0-3 мм	3-6 мм	>6 мм	Насипна вага, т/м ³
Вихід, %	Січень	85,9	7,6	6,5	0,714
	Лютий	85,3	7,8	6,9	0,715
	Березень	85,2	7,9	6,9	0,716
	Квітень	85,3	7,8	6,9	0,719
	Травень	85,3	8,0	6,7	0,720
	Червень	85,4	8,0	6,6	0,722
	Липень	85,3	8,0	6,7	0,722
	Серпень	84,7	8,2	7,0	0,726
	Вересень	84,7	8,2	7,1	0,726
	Жовтень	83,3	8,2	8,5	0,725
	Листопад	83,1	8,7	8,2	0,719
	Грудень	84,6	9,5	5,9	0,717
	Min	75,5	4,3	3,0	0,699
	Max	89,3	16	13,6	0,743

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Характеристики міцності коксу з вугільних шихт наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

Якісні характеристики коксу доменного

W_t^r , %	A^d , %	S^d , %	M_{10} , %	M_{25} , %	CSR, %
3,2	12,7	0,86	7,9	87,5	47,6

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

В умовах роботи коксохімічного виробництва важливу роль відіграє якісне складання вугільних шихт для виробництва металургійного коксу.

У таблиці 1.7 представлений середньорічний склад багатобасейнової сировинної бази КХП ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" за 2010-2015 рр. і основні якісні показники виробничих шихт [2].

Таблиця 1.7

**Марочний склад та якісна характеристика шихт КХП ПАТ
«АрселорМіттал Кривий Ріг» за 2014-2015 рр.**

Країна , марка вугілля	Марочний склад (%) за роками					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Україна	27,5	24,3	25,1	55,8	43,7	22,8
Г	0,1	1,4	6,3	15,9	12,4	0,4
Ж	17,0	13,6	4,1	10,5	12,6	8,2
К	10,4	9,3	14,7	29,4	18,7	14,2
Росія	34,9	26,8	24,6	14,8	9,7	24,8
ГЖО	0,7	-	-	-	5,6	17,0
Ж	15,1	10,0	12,7	11,4	2,5	-
К+КЖ	-	0,9	2,2	-	-	-
К	19,0	-	-	-	-	-
К+КО	-	15,9	9,7	3,4	0,4	-
К+КО+ПС	0,1	-	-	-	1,2	7,8
Казахстан КЖ+К+ПС	13,2	18,5	29,4	28,7	32,8	30,3
Вугілля далекого зарубіжжя	24,4	30,4	20,9	0,7	13,8	22,1
ВЛК	10,1	0,7	1,8	-	3,1	6,7
СЛК	14,4	29,7	19,1	0,7	10,7	12,7
НЛК	-	-	-	-	-	2,7
Якісна характеристика шихт						
Волога, W^t	9,9	8,5	8,5	9,0	8,1	8,8
Зольність, A^d	9,6	9,6	9,6	9,2	9,1	9,0
Вміст сірки, S^d_t	0,98	1,01	0,87	1,11	1,03	0,90
Вихід летких речовин V^{daf}	29,8	29,2	28,7	29,2	29,2	29,8
Товщина пластичного шару, y , мм	17	19	18	18	17	17
Вміст класу 0-3 мм	87,5	85,2	82,0	84,0	81,3	80,8

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [2]

Аналізуючи наведені дані, можна зробити висновок, що тенденції, закладені в 2007 р. лише посилились. Так, зросла частка імпортного вугілля. При цьому частка українського вугілля постійно скорочується, що викликано відпрацюванням вугільних пластів на глибинах до 600-700 м і переходом на більш глибокі горизонти (1200 м і більше), а також втратою територій та шахт в Донецькій і Луганській областях [2].

Забезпечення сучасних доменних печей високоякісним металургійним паливом і проблема поліпшення фізико-механічних властивостей коксу нерозривно пов'язані з питаннями розширення сировинної бази коксування й раціонального використання в процесі виробництва коксу вугілля різних басейнів.

Отже, як показує аналіз, сучасна сировинна база коксохімічного виробництва України носить стійкий багатобасейновий характер, де поряд з українським, використовується імпортне коксівне вугілля ближнього і далекого зарубіжжя.

Вугільна сировинна база КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» дуже непостійна за марочним складом та технологічним властивостям; вугілля нерівномірно поставляється на заводи, а шихти для коксування є багатокомпонентними. На дестабілізацію якісних показників шихти помітно впливають постачання бінарних сумішей марок Г + Ж, складу, що коливається. Крім того, на ПАТ «АМКР» прибуває до 10-15 % вугілля позапланових постачань, марочна структура яких відрізняється від планової пониженим вмістом добре спікливого вугілля.

У таблиці 1.8 наведено усереднені показники якості вугілля, що входить в сировинну базу КХП ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Істинний марочний склад шихти з участю концентратів різних вуглезбагачувальних фабрик повинен обов'язково визначатися з урахуванням петрографічних характеристик і, зокрема, рефляторам шихти. Необхідно враховувати фактичну кількість мацералів групи інертиніта, які не володіють

здатністю спікатися і повинні розглядатися як опіснююча домішка до шихти, близька за властивостями до неспікливого вугілля марки «П». Водночас мацериали групи липтиніту, що утворюють при термічній деструкції значну кількість рідкорухомих продуктів, слід відносити до складових вітриніту, умовно відповідним марки «Ж» [3].

Таблиця 1.8

Усереднені показники якості вугілля, що входить в сировинну базу КХП ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (%)

Країна	A ^d	S ^{dt}	V ^{daf}	y, мм	R _o	I _o , од	V _t
Україна	8,1	1,24	30,6	17,5	1,07	3,25	86
Росія	9,6	0,81	29,4	14,4	1,01	2,83	66
Казахстан	11,7	0,61	26,1	17	1,17	2,60	67
Далеке зарубіжжя (США)	8,9	0,57	27,0	19	1,13	2,31	68

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [3]

Отже, на нашу думку, отримувати високоякісний кокс можна за рахунок вдосконалення технології підготовки шихти для коксування.

Підготовка вугілля до коксування залишається однією з основних технологічних операцій, що істотно впливає на показники механічної міцності коксу та енергоємність вуглепідготовчих цехів. Тому проблема вдосконалення технології підготовки вугілля до коксування залишається актуальною і вимагає підвищеної уваги.

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 щільність, вологість, вихідна температура вугільної маси.

Останнім часом увага технологів зосереджена на впровадженні перспективних технологій таких як модифікація шихт за допомогою добавок: неорганічних (карбонати, карбіди), опіснюючих (антрацит, коксовий дріб'язок та пил), органічних (рідинні та тверді продукти нафтохімічного і коксохімічного виробництва [1 - 4]; коксування трамбованих шихт [5, 6]; та

застосуванні спеціальних способів підготовки вугільної сировини для коксування (технологія коксування трамбованих шихт, технологія коксування сухої шихти і технологія коксування термічно підготовлених шихт) [7-11], брикетування/часткового брикетування шихти [12 - 18].

У процесі трамбування вугільної шихти підвищення її насипної щільності відбувається за рахунок взаємного ковзання зерен вугілля, їхньої переорієнтації та зближення [4 - 6].

Технологія коксування попередньо висушеної шихти, розроблена компанією Nippon Steel Corporation в технологічному та апаратурному оформленні реалізована як процес СМС (регулювання вологості шихти), потім удосконалена та впроваджена як DAPS (сушіння та огрудкування шихти) [18].

За технологією СМС вугілля сушать у трубі-сушарці, при цьому його вологість зменшується з 10% до 5–6% перед завантаженням у коксову піч [19].

Сутність процесу DAPS 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 [20].

Технологія термічної підготовки передбачає швидке нагрівання шихти до 150-250 °С перед коксуванням в умовах, які виключають її окиснення. Дозволяє отримувати з шихт з високим вмістом високолеткого слабоспівного вугілля кокс, що перевершує по механічній міцності низькорекційний кокс з кращих вугільних шихт [20].

Так, зниження вологості вугілля, яке досягається в зазначених процесах, призводить до збільшення насипної щільності вугілля.

Величина насипної щільності є важливою технологічною характеристикою вугільної шихти, що має істотний вплив на продуктивність коксових батарей, якість коксу та вихід хімічних продуктів коксування [21]. По суті, насипна щільність вугільної шихти є комплексним показником ефективності технології підготовки.

Наукові основи технології підготовки вугілля до коксування базуються на теоретичних і практичних положеннях хімії та фізики процесів спікання і коксоутворення і включають в себе наступні основні положення [22]:

– прийоми підготовки, які застосовуються на практиці, не призводять до глибокої зміни органічної маси вугілля;

– позитивний вплив прийомів підготовки вугілля полягає у створенні комплексу заданих фізико-хімічних параметрів у насипній масі вугільної завантаження;

– підготовка вугілля покращує фізико-хімічні умови протікання процесів спікання продуктів деструкції зерен вугілля як у пластичній зоні, так і на стадії коксоутворення.

Таким чином, ступінь впливу технологічних факторів підготовки слід оцінювати при формуванні властивостей насипної маси вугільної завантаження, в пластичній зоні і в процесі коксування при утворенні вуглецевих і вуглецево-мінеральних структур і формуванні шматків напівкоксу – коксу.

1.2 Дослідження технологічних властивостей вугілля сировинної бази коксування

1.2.1 Характеристика вугільної сировини для коксування. Нормативні джерела

Для характеристики твердих горючих копалин, які використовуються у якості сировини для термічної переробки, застосовують показники, які кількісно описують певну ознаку, що відрізняє дане паливо від інших. За сукупністю показників, які у цілому характеризують якість палива, судять про його можливість поведінки в умовах термічної переробки, придатності до використання в певному технологічному процесі та прогнозують вихід, склад і властивості одержуваних продуктів залежно від умов процесу.

Найбільш важливими показниками, що характеризують якість вугілля, є:

- технічний аналіз: вологість – робоча або загальна (W^p або W^{zag}), у відсотках від маси проби палива, що надійшла на аналіз (підвищений вміст вологи у вугіллі затрудняє підготовку його до коксування й погіршує показники роботи коксових печей); зольність (A , у відсотках), розраховується звичайно на одиницю сухої маси вугілля (A^c) або робочого палива (A^p) (мінеральні домішки переходять у кокс і впливають на його властивості);

- вихід летких речовин, розраховується на одиницю сухої маси (V^c , у відсотках) або органічної сухої беззольної маси (V^{daf}) (є важливим показником властивостей вугілля і характеризує термічну стійкість органічної маси твердих горючих копалин у процесі нагрівання їх без доступу повітря. Залежно від цього показника змінюється вихід коксу й хімічних продуктів коксування); загальний вміст сірчистих сполук (умовно перерахованих на елементарну сірку), що входять до складу органічних і мінеральних речовин вугілля S_t (сірчисті сполуки вугілля впливають на властивості коксу доменного);

- показники петрографічного складу, що включають вміст окремих петрографічних компонентів (у відсотках) і показник відбиття вітриніту (R_0 , у відсотках);

- показники, які характеризують ступінь метаморфізму, наприклад, вміст вуглецю (C^{daf}), теплота згоряння, перелічена на одиницю сухої беззольної маси, вихід летких речовин (V^{daf});

- показники, що характеризують хімічну структуру вугілля: елементний склад, вміст функціональних груп, що визначається хімічними або фізико-хімічними методами (наприклад, методом інфрачервоної спектроскопії), вміст різних фрагментів структури (подвійних зв'язків, ароматичних ядер), а також дані рентгеноструктурного аналізу (розміри кристалічних, упорядкованих формувань і ступінь упорядкованості структури та ін.);

- показники, що характеризують фізичні властивості палива: уявна й дійсна густина, пористість, механічна міцність;

- показники, що характеризують спікливість вугілля, (зміна обсягу вугільного завантаження, що нагрівається, - пластометрична усадка X , Y міліметрах і товщина пластичного шару - Y , в міліметрах); індекс Рогу, що характеризує фактично міцності спікання; спучування вугілля, характеризує його плинність і щільність контакту в стадії спікання;

- вихід первинних продуктів термічної деструкції палив (смола, газів, твердого залишку - напівкоксу), який визначається за методом Фішера [2].

Вихідною сировиною для одержання шихти є коксівне вугілля України, Казахстану й інших закордонних вугільних басейнів.

Вугілля як сировина для коксування повинне володіти властивістю при нагріванні без доступу повітря утворювати кокс.

Споживча цінність і вартість вугілля, крім показників якості (зольності, масової долі вологи, вмісту сірки, виходу летких речовин), залежить від генетичних і технологічних властивостей. Узагальнюючою характеристикою цих властивостей є марка вугілля.

Сьогодні в Україні діє система класифікації вугілля згідно ДСТУ 3472-96 (таблиця 1.9), яка передбачає розподіл на 9 марок (Б, Д, ДГ, Г, Ж, К, ПС, П, А).

Серед класифікаційних показників :

- середній показник відбиття вітриніту R_0 , %;
- вихід летких речовин, %;
- товщина пластичного шару u , мм;
- індекс Рогу RI , відн. од.
- теплота згоряння, МДж/кг.

Цей стандарт поширюється на неокислене буре, кам'яне вугілля й установлює їхню класифікацію за видами, класами, категоріями, типами, підтипами і кодovими номерами, а також технологічними марками, групами і підгрупами на основі найбільш характерних загальних ознак, що відображають генетичні особливості й основні технологічні характеристики,

які дозволяють оцінити найбільш характерні загальні ознаки: ступінь метаморфізму, петрографічний склад і ступінь відновленості [3].

Таблиця 1.9

Класифікація вугілля згідно ДСТУ 3472-96

Марка вугілля	Позначення марки	Класифікаційні показники			
		Середній показник відбиття вітриніту $R_o, \%$	Вихід летких речовин, %	Товщина пластичного шару $u, \text{мм.}$	Індекс Рогу $R_I, \text{відн.од.}$
Буре	Б	<0,4	від 50 до 70	-	-
Довгополум'яне	Д	від 0,4 до 0,6	35-50	<6	-
Довгополум'яне-газове	ДГ	0,50-0,80	35-48	від 6 до 9	-
Газове	Г	0,50-1,00	33-46	10-16**	-
Жирне	Ж	0,85-1,20	28-36	17-38	-
Коксівне	К	1,21-1,60	18-28	13-28	-
Піснувате-спікливе	ПС	1,30-1,90	14-22	6-12	13 – 50
Пісне	П	1,60-2,59	8-18***	< 6	> 13
Антрацит	А	2,60-5,60	< 8	-	-

** - При значенні показника відбиття вітриніту <0,85% і товщині пластичного шару > 16 мм вугілля належить до марки "Г".

*** - При виході летких речовин <8% і теплоті згоряння >35,2 МДж/кг вугілля належить до марки "П".

Технічна характеристика призначених для коксування вугільних концентратів, що надходять, визначається згідно показників, зазначених у специфікаціях до діючих контрактів і договорів на поставку вугільних концентратів України, Росії, Казахстану й інших закордонних вугільних басейнів [4].

Міжнародна система кодифікації кам'яного вугілля була прийнята Комітетом ЕЕК ООН і затверджена в 1988 р. Європейською економічною комісією.

Для характеристики вугілля середнього й високого рангів були обрані основні параметри :

- відбивна здатність вітриніту;
- рефлектограма вітриніту;
- мацеральний склад;
- індекс вільного спучування;
- вихід летких речовин;
- зольність;
- вміст загальної сірки;
- вища теплота згоряння.

Вугіллям низького рангу є вугілля з найвищою теплотою згоряння менше 24 МДж/кг і середнім показником відбиття вітриніту R_0 , менше 0,6%.

Вугіллям більш високого рангу є вугілля з найвищою теплотою згоряння більше 24 МДж/кг; за умови, що R_0 більше 0,6%.

Система кодифікації вугілля середнього й високого рангів призначена для рядового й збагаченого вугілля окремих шарів або свити пластів.

Для характеристики вугілля середнього й високого рангів використовується 14-значна кодифікація, яка базується на вищезгаданих параметрах вугілля [4].

Для більш детальної характеристики вугілля, яке застосовується в тому чи іншому процесі, кодифікація передбачає можливість використання додаткових параметрів, кількість яких не обмежується. У перелік додаткових

параметрів включені найбільш важливі стандарти, розроблені Технічним комітетом ТК27 Міжнародної організації по стандартизації (ISO), а також деякі національні стандарти [3].

1.2.2 Технологічні властивості вугілля сировинної бази коксування

Вугілля, яке застосовується для коксування, надходить на завод з багатьох басейнів, воно неоднорідне за речовинним складом й має широкий діапазон технологічних властивостей. Підготовлена ж до коксування шихта, залежно від вимог до металургійного коксу, повинна мати цілком певні якісні показники, які обумовлені не тільки технологічними властивостями вугілля, але й методами їхньої підготовки [6].

Вугільні концентрати, що надходять на коксохімічне виробництво, володіють багатьма специфічними особливостями, це необхідно враховувати при складанні шихт для коксування й при їхній підготовці до коксування в операціях складування, дроблення й т.д.

Відомі схеми підготовки вугілля і шихт перед коксуванням розроблені роздільно для петрографічно однорідного вугілля Донбасу й петрографічно неоднорідного вугілля Кузбасу. Це обумовлено різними технологічними властивостями великих і дрібних класів цього вугілля. У російському вугіллі підвищеною зольністю володіють великі класи, а у донецькому ж вугіллі мінеральна частина зосереджена в дрібних класах [7].

Вугільні концентрати Донбасу є в основному петрографічно однорідними й мають суму спікливих компонентів до 90%. Відмінною рисою вугілля Донбасу є підвищений вміст загальної сірки - до 2,7% і більше. Це явище генетично обумовлене підвищеним вмістом піритної сірки.

Вугілля Росії представлене низькосірчистими, слабоспікливими вугільними концентратами. Сума спікливих компонентів становить 30 - 60%. Вугілля Печорського й Кузнецького басейнів петрографічно неоднорідне. Вугілля представлене в основному марками К, КП, КЖ, воно добре

спікається, малосірчисте (вміст сірки не перевищує 1%). Вугілля Печорського басейну більш петрографічно однотипне, ніж кузнецьке. Вміст фосфору не перевищує 0,1% (від 0,01 до 0,03%). Коксівність вугілля добра.

Австралійське й канадське вугілля характеризується середнім виходом летких речовин, а також високим вмістом інертиніту. Це вугілля має високу спікливість (товщина пластичного шару 12 і 24 мм)

Американське вугілля характеризується низькою зольністю й вмістом сірки, а також доброю спікливістю.

Аналіз результатів досліджень показує, що властивості міцності доменного коксу істотно залежать від властивостей вугільної шихти і її компонентного складу [8]. Також найважливішою умовою стабільності коксу є рівномірність у часі зольності, виходу летких речовин, вмісту загальної вологи й загальної сірки, спікливості, коксівності, гранулометричного складу й насипної щільності вугільної шихти.

Тому для одержання стабільного й задовільного за якістю коксу необхідний раціональний розподіл коксівного вугілля і підбір шихт оптимального для підприємства складу [9].

У наш час використовують дві характеристики міцності металургійного коксу: гарячу міцність (міцність коксу після реакції з діоксидом вуглецю при 1100°C) і холодну міцність (механічну). Показники механічної міцності характеризують поведінку коксу в процесі транспортування й завантаження його в доменну піч. Висока міцність коксу в холодному стані гарантує газопроникність шихтових матеріалів в «сухій» зоні доменної печі. Показник гарячої міцності CSR більш точно визначає якість коксу, оскільки характеризує його поведінку в доменній печі в процесі виплавки металу (цей показник ураховує ступінь механічного руйнування коксу після його попередньої газифікації) [10]. Індекс CRI (індекс реакційної здатності), що корелює з CSR, повинен бути якомога нижчим, щоб зрушити реакцію взаємодії коксу із CO₂ до високих температур, але при цьому залишатися в межах, які гарантують задовільне науглероження гарячого

металу [11]. Реакційна здатність коксу істотно впливає на роботу доменної печі, особливо на температуру й газові профілі. Тому перед коксохімічним виробництвом поставлене завдання досягти високих стандартів якості доменного коксу за показниками CSR, CRI, S^d , A^d , M_{25} , M_{10} .

На формування рівня «гарячої» міцності коксу в основному впливають:

- генетичні особливості використовуваного вугілля, виражені показниками відбиття вітриніту, сумою інертних компонентів, показниками пластичних властивостей органічної маси вугілля;
- вміст загальної сірки у вугільних концентратах є переважаючим чинником, що впливає на «гарячу» міцність коксу, й це підтверджують дослідні ящикові коксування окремих марок коксівних вугільних концентратів.
- хімічний склад мінеральної частини - наявність сполук сірки й заліза, а також вміст лужних металів;
- технологічні фактори - підвищення насипної щільності при оптимальному помелі, зменшення періодів коксування й збільшення кінцевої температури коксу [12].

Рівень реакційної здатності коксу залежить як від петрографічного складу вугільних шихт, так і від ступеня метаморфізму вихідного вугілля.

1.3 Висновки до аналітичної частини

Аналіз публікацій про вплив властивостей вугілля та технологічних факторів на формування властивостей коксу дозволяє констатувати, що основними з них є: характеристика вугілля та шихти, які використовуються, технологія їх підготовки та коксування, а також позапічна обробка коксу (спосіб гасіння, особливості сортування тощо).

У зв'язку з розширенням використання технології вдування пиловугільного палива (ПУТ) безпосередньо в доменні печі зросли вимоги до якісних характеристик доменного коксу – зниження зольності та вмісту сірки,

підвищення механічної міцності, зниження реакційної здатності та збільшення післяреакційної міцності.

У результаті аналізу сировинної бази коксування КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» встановлено, що вона формується з вугілля різних марок, родовищ і ступенів метаморфізму, що зумовлює значну варіабельність їхніх технологічних властивостей. Обмеженість власної сировинної бази та зростаюча частка імпортного вугілля ускладнюють забезпечення стабільної якості коксу та вимагають гнучкого підходу до формування вугільних шихт.

Дослідження технологічних властивостей вугілля сировинної бази коксування показало, що окремі компоненти шихти характеризуються зниженою спікливістю, підвищеним ступенем окиснення або несприятливими показниками пластичності. Це негативно впливає на процес коксування та фізико-механічні властивості доменного коксу, що обґрунтовує необхідність застосування коригувальних технологічних заходів.

Характеристика вугільної сировини для коксування з урахуванням нормативних джерел підтвердила, що оцінювання якості вугілля має здійснюватися відповідно до вимог чинних національних і міжнародних стандартів (DSTU, ISO), які регламентують методи відбору проб, визначення технічного та петрографічного складу, а також основних технологічних показників. Дотримання нормативної бази є необхідною умовою достовірності результатів досліджень і їх порівнюваності.

Аналіз технологічних властивостей вугілля сировинної бази коксування засвідчив, що формування оптимальних вугільних шихт потребує комплексного врахування показників спікливості, пластометричних характеристик, вмісту летких речовин, зольності та ступеня окиснення. Отримані результати свідчать про доцільність удосконалення технології підготовки вугілля до коксування з метою підвищення стабільності процесу та якості отриманого коксу.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Методика визначення співвідношення якості іноземного вугілля із вітчизняною класифікацією

При надходженні імпортованих концентратів на склади КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» гостро постає питання про раціональне їхнє використання в шихтах заводу. Цьому перешкоджає відсутність повної інформації про якість концентратів, що надходять, внаслідок негармонійності вітчизняних і іноземних нормативних документів.

Внаслідок цього, на підставі результатів дослідження концентратів, що надходять на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», а також даних аналізів великої кількості іноземного вугілля у роботі розроблена методика, що дозволяє за даними сертифікатів якості іноземного вугілля визначати орієнтовну марочну приналежність за ДСТУ 3472-96 «Вугілля буре, кам'яне й антрацит. Класифікація».

З різних варіантів віскозиметричних методів дослідження найбільше поширення в закордонній вуглехімії одержали метод і апарат Гізелера, показники якого включають у сертифікати якості вугілля.

Значення температур початку переходу в пластичний стан (t_1), максимальної плинності (t_2) і затвердіння (t_3), інтервалу пластичності (Δt), а також показники максимальної плинності (F_{\max}) використовують не тільки як характеристику індивідуального вугілля, але й при розробці оптимального складу шихти для коксування («принцип перекривання»). Для визначення спікливої здатності вугілля використовують польський стандарт PN-84/G-04536.

З різних варіантів дилатометричних методів дослідження частіше використовують метод і дилатометр Одібера-Арну. За цим методом визначають показники температур початку пластичного стану (t_1), максимального стиснення (t_2), максимального розширення (t_3), стиснення («а»)

і розширення («b»). Дана методика стандартизована в ГОСТ 13324-94 «Угли каменные. Метод определения дилатометрических показателей в приборе Одибера-Арну».

Крім того, у Міждержавному стандарті ГОСТ 30313-95 «Угли каменные и антрациты (угли среднего и высокого рангов). Кодификация» передбачено визначення індексу вільного спучування (FSI) за ГОСТ 20330, як одного з восьми параметрів кодування кам'яного вугілля для коксування.

У таблиці 2.1 наведено співвідношення зазначених вище показників якості з марочною приналежністю вугілля по ДСТУ 3472-96.

Таблиця 2.1

Зіставлення значень показників якості вугілля, які визначаються іноземними методами, із вітчизняною класифікацією

Показник	Марка вугілля по ДСТУ 3472-96			
	Г	Ж	К	ПС
Максимальна плинність, logFm, діл/хв	0,85-3,87	3,40-4,00	2,09-3,56	0,30-2,23
Температурний інтервал пластичності, Δt, °С	50-95	95-130	80-100	35-75
Стиснення, %	23-44	22-34	21-32	12-30
Розширення, %	-28-155	90-220	45-125	-10-25
Індекс вільного спучування, FSI	2-7	7-8 ^{1/2}	7-8 ^{1/2}	3 ^{1/2} -8 ^{1/2}
Індекс Рогу, од.	47-84	77-90	61-80	16-65

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [5]

Використовуючи дану таблицю при наявності сертифіката якості на іноземне вугілля, можна оперативно проаналізувати його марочну приналежність і визначити його раціональну участь у шихті [5].

2.2 Аналіз особливостей технології коксування шихт, які містять вугілля різних басейнів

Використання вугілля декількох континентів, країн та басейнів у вугільних шихтах для виробництва високоякісного металургійного коксу потребує вирішення цілого ряду задач, найважливішими з яких є: вибір науково-обґрунтованого комплексу методів, який дозволить правильно оцінити властивості вугільної сировини для коксування; оцінка ступеню взаємодії та взаємозамінності вугілля різних басейнів в процесі коксоутворення; вивчення впливу технологічних факторів, таких як підготовка вугілля, теплотехнічний режим їх коксування та способи гасіння коксу.

2.2.1 Взаємодія вугілля різних басейнів при коксування в сумішах

При вивченні питань взаємодії необхідно виділити три напрямки досліджень:

- дослідження властивостей вугілля та факторів, що визначають їх поведінку в процесах утворення пластичного стану та подальших перетворень, що впливають на формування речовини коксу;
- вибір методів оцінки цих властивостей вугілля з метою застосування їх для прогнозування якості коксу;
- безпосереднє вивчення взаємодії проміжних продуктів перетворення вугілля різних стадій метаморфізму при коксуванні в суміші.

Зазначені напрямки охоплюють три важливі аспекти вивчення процесу термічної деструкції вугілля та їх сумішей: теоретичний, методичний і

практичний. У теоретичному аспекті насамперед слід мати на увазі, що визначальною особливістю деяких видів вугілля є здатність їх переходити в пластичний стан і після завершення комплексу фізико-хімічних перетворень формуватися в кусковий кокс.

Відомо, що в процесі взаємодії вугілля та їх петрографічних складових беруть участь рідинні, паро-газові та тверді продукти термічної деструкції [14]. При цьому, велике значення має рідкорухлива складова пластичної маси, оскільки саме вона контактує з поверхнею твердих залишків реакцій термічної деструкції та бере участь у подальших процесах структурування продуктів, що утворюються.

Велике значення для розуміння процесу формування речовини коксу мають такі важливі параметри, як в'язкість (плинність), газопроникність і спучування пластичної маси.

Відомо, що кількісні та якісні характеристики пластичного стану вугілля, як результат утворення і накопичення рідких нелетких при даній температурі речовин, істотно змінюються під час їх нагрівання і залежать, зокрема, від їх кількості в пластичній масі. Тому при нагріванні вугілля настає період, коли в пластичному стані знаходиться найбільша кількість органічної маси вугілля (або суміші вугілля) і рідинної складової в ній, і пластична маса стає найбільш текучою (тобто найменш в'язкою). Від термічної стійкості речовин вугілля і кількості рідкорухливої складової пластичної маси залежить тривалість перебування її в стані мінімальної в'язкості. Після закінчення певного періоду (періоду мінімальної в'язкості) в результаті триваючої термічної деструкції і прискореного розвитку процесу структурування, в'язкість пластичної маси підвищується аж до її затвердіння, тобто до перетворення в напівкокс.

Для вугілля або його сумішей, що мають властивість утворювати пластичну масу, особливе значення мають показники в'язкості пластичного стану і динаміка її зміни при термічній деструкції. У метаморфічному ряді петрографічно однорідного вугілля величина в'язкості його пластичної маси

змінюється по кривій з мінімумом в області добреспівливого жирного вугілля. Вугілля з високим вмістом мацералів групи вітриніту утворюють менш в'язку пластичну масу, ніж вугілля того ж ступеня метаморфізму, але з більшим вмістом мацералів групи інертиніту [15-17].

У складній залежності від в'язкості пластичної маси знаходяться її розпушування і газопроникність. Розпушування вугілля багато дослідників пояснювали недостатньою газопроникністю пластичної маси, а опір руху газів ставили в пряму залежність від її в'язкості. Виходячи з цього, із зростанням в'язкості пластичної маси вугілля газопроникність її повинна зменшуватися, а спучування зростати. Однак роботами деяких дослідників [18] показано, що зі зменшенням в'язкості газопроникність пластичного шару вугілля може знижуватися.

Групи вітриніту утворюють менш в'язку пластичну масу, ніж вугілля того ж ступеня метаморфізму, але з більшим вмістом мацералів групи інертиніту [15-17].

У складній залежності від в'язкості пластичної маси знаходяться її спучування і газопроникність.

Спучування вугілля багато дослідників пояснювали недостатньою газопроникністю пластичної маси, а опір руху газів ставили в пряму залежність від її в'язкості. Виходячи з цього, із зростанням в'язкості пластичної маси вугілля її газопроникність повинна зменшуватися, а спучування зростати. Однак роботами деяких дослідників [18] показано, що зі зменшенням в'язкості газопроникність пластичного шару вугілля може знижуватися.

Своєрідність руху газів у пластичному шарі вугілля визначається тим, що останній формується з неоднорідної зернистої вугільної маси, яка зазнає термічного розкладання. У ній міститься 40-48% вільних проміжків від загального обсягу, що ще до її розм'якшення створює хороші умови для проходження газів. У міру ж появи і розвитку утворення пластичної маси вона заповнює порожнечі, а тиск в ній зростає з максимумом при їх блокуванні. У цьому випадку газу зосереджуються в пластичній масі і спучують її. При

подальшому ж затвердінні пластичної маси, обумовленому накопиченням твердої фази розкладання і утворенням при її агрегації жорсткої пористої структури, гази знову знаходять вихід через пори і тріщини і їх тиск знижується.

Всі розглянуті явища відбуваються в період перебування вугілля в пластичному стані, який для вугілля різних стадій метаморфізму характеризується різними температурами початку розм'якшення і затвердіння і, отже, різними температурними і часовими інтервалами. Звідси слід зробити висновок, що для поліпшення умов взаємодії вугілля в період його перебування в пластичному стані бажано підбирати компоненти з близькими температурами утворення і затвердіння пластичної маси (накладення інтервалів пластичності), що сприяє більш глибокому протіканню взаємодії як між компонентами окремих вугілля, так і їх сумішей. Для оцінки цих властивостей в комплекс методів дослідження включені показники, що характеризують спекаємість обраних вугілля (RI, X/Y), термостійкість (V^{daf}), петрографічний склад, пластично-в'язкі властивості (текучість) за Гезелером.

Особливості властивостей органічної маси при термічній деструкції вивчалися з використанням дериватографічного аналізу – методів ДТА (диференційний термічний аналіз) і ДТГ (диференційна термогравіметрія).

У таблиці 2.2 представлена порівняльна характеристика деяких показників властивостей вугілля та їх дериватографічний аналіз, що характеризує вугілля за температурою максимальної швидкості втрати маси (t_m , °C) і за втратою маси в інтервалі температур 400-500 °C (Δm , %). Цей температурний інтервал прийнятий для всіх досліджених вугілля, так як він характеризується найбільшими швидкостями втрати маси.

Як видно з даної таблиці, всі досліджені вугілля розділені за стадією метаморфізму на три групи: малометаморфізовані газове донецьке і кузнецькі вугілля (перша група); донецьке та американське вугілля марки Ж різного

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика властивостей та дериватографічного аналізу дослідженого вугілля

Група	Шахта, ЗФ	Марка	V ^{daf} , %	Індекс Рога RI	Пластометричні показники, мм		Петрографічні характеристики, %				Дериватографічні показники	
					X	Y					t _m , °C	Δm, %
1	ЗФ Добропільська	Г	37	65	31	11	82	0	12	6	450	14,5
	ЗФ Щедрухинська	Г	38	39	42	10	77	0	20	1	480	10,7
2	ЗФ Дуванська	Ж	32	83	16	22	93	2	2	3	460	15,7
	ш. ім. Скочинського	Ж	32	83	14	18	91	0	5	4	465	12,7
	Wellmore	Ж	32	78	23	20	70	1	24	5	470	13,8
	Carter Roag	Ж	31	74	26	17	92	7	1	0	480	10,8
3	ЗФ Узловська	ПС	18	49	18	9	94	0	5	1	510	1,1
	ЗФ Нерюнгринська	ПС	20	46	11	10	84	1	14	0	520	0,4
	Pocahontas	ПС	18	36	40	10	69	2	29	0	525	0,3

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [18]

ступеня відновленості середньої стадії метаморфізму (друга група); високометаморфізоване піснувате спікливе донецьке, південно-якутське та американське вугілля (третя група). Усі досліджені види вугілля є типовими представниками своєї стадії метаморфізму в кожному басейні.

Перша група. Вугілля представлене Донецьким і Кузнецьким басейнами. При близьких класифікаційних параметрах (V^{daf} , Y) кузнецьке вугілля ЗФ «Щедрухинська» містить майже в два рази більше мацералів групи інертиніту, ніж донецьке. Це позначилося на істотно нижчому значенні показника спікливості за Рогом, ніж у донецького газового вугілля.

Очевидно, це ж відбулося на пластично-в'язких властивостях: інтервал пластичності кузнецького вугілля на 15 °С менше донецького при дуже низькій плинності.

Температура максимальної швидкості втрати маси (t_m) даного вугілля істотно виходить за межі інтервалу пластичності, визначеного за Гезелером, тобто $t_m > t_3$. Дана обставина свідчить про те, що максимальне газовиділення при його термохімічних перетвореннях припадає не на період перебування вугілля в пластичному стані, а на період утворення напівкоксу. При цьому величина самої втрати маси (Δ_m) на 26% відносно менше, ніж у донецького вугілля.

Донецьке вугілля петрографічно більш однорідне, має більший температурний інтервал пластичності і більшу плинність. Температура максимальної швидкості втрати маси припадає на температурний інтервал пластичності ($t_m < t_3$).

Друга група. Дана група представлена українським та американським жирним вугіллям різного ступеня відновленості: Українське – ЦЗФ «Дуванська» (тип «в») і ш. ім. Скочинського (тип «а»); Американське – Wellmore (тип «в») і Carter Roag (тип «а»).

Вугілля цієї групи відноситься до середньої стадії метаморфізму, має практично однаковий вихід летких речовин (маловідновлене американське вугілля Carter Roag має на 1% менше), петрографічно однорідне. Привертає

увагу те, що як українське, так і американське маловідновлене вугілля (ш.ім. Скочинського і Carter Roag відповідно) мають меншу спікливість (18 і 17 мм проти 22 і 20 мм), ніж вугілля типу «в».

Однакову спрямованість показників пластично-в'язких властивостей мають українське і американське вугілля різних типів за відновленістю. Маловідновлене вугілля має більш пізню температуру початку розм'якшення вугілля (t_1) і більш високі температури максимальної пластичності (t_{max}). Температура затвердіння (t_3) або збігається (для українського вугілля), або дещо перевищує (для американського вугілля) температуру затвердіння пластичної маси відновленого вугілля.

Це визначило температурний інтервал пластичності: у відновленого вугілля він вищий (у донецьких на 10°C , в американських на 5°C), ніж у маловідновлених.

Плинність пластичної маси відновленого українського вугілля майже в 2 рази, а американського в 1,5 рази вище, ніж маловідновленого.

Третя група. До цієї групи входять три марки піснувато спікливого вугілля Донецького (Україна), Південно-Якутського (Росія) і Апполачського (США) басейнів. Ця група вугілля в шихтах для коксування відноситься до опіснюючої частини і характеризується невисокою спікливістю (9-10 мм), низьким виходом летючих речовин (18-20%). За петрографічним складом ближчими є українське і російське вугілля, що мають більше 80% вмісту мацералів групи вітриніту.

На відміну від них американське вугілля має помітно менше мацералів цієї групи і більше (29%) мацералів групи інертиніту. Характерною особливістю вугілля цієї групи є більш високі значення температур початку розм'якшення, максимальної пластичності і затвердіння.

Вугілля даної групи продукує досить невелику кількість пластичної маси низької плинності.

Можна стверджувати, що досліджене американське вугілля цієї групи за

характером термохімічних перетворень, що відбуваються в температурному інтервалі пластичності, дуже близьке до процесів, що протікають з донецьким вугіллям, що дозволяє судити про їх хорошу сумісність при коксуванні в сумішах. Це, в свою чергу, дає підстави не вносити якісь істотні коригування в теплотехнічний режим їх коксування.

Однак, враховуючи, що максимальна швидкість втрати маси донецького вугілля припадає на діапазон температур максимальної плинності за Гізелером ($t_{\max} = 430-440$ °C), можна припустити, що саме ця особливість їх термічних перетворень обумовлює отримання з них коксу з кращими показниками механічної міцності (зокрема, за стиранням) внаслідок поліпшення пластичного контакту між зернами під дією підвищеного тиску газоподібних продуктів термічної деструкції, що утворюються в замкненому об'ємі.

2.2.2 Формування поліпшених металургійних властивостей та структури коксу шляхом оптимізації складу петрографічно неоднорідних міжбасейнових вугільних шихт

Важливим моментом, який зумовлює необхідність урахування петрографічних характеристик при складанні шихт, є те, що збагачувальні фабрики України здебільшого не мають постійної вугільної сировинної бази. В результаті змушені збагачувати вугілля двох і більше марок, що призводить до взаємного засмічення та зниження технологічної цінності одержуваного концентрату [3]. У зв'язку з цим задекларована марка концентратів часто не відповідає дійсності, що ускладнює отримання коксу планованої якості.

Тому обов'язковим є формування вугільної суміші з урахуванням мацерального складу, показника відбиття вітриніту та розподілу вітринітової складової за стадіями метаморфізму, оптимального співвідношення між спікливими ($\Sigma\text{СК}$) і опіснюючими компонентами ($\Sigma\text{ОК}$). При прогнозуванні виходу та властивостей коксу, береться до уваги, що мацерали групи вітриніту, ліптиніту та 1/3 семівітриніту становлять суму реакційно-здатних,

спікливих компонентів, а весь інертиніт та 2/3 семівітриніту надають опіснюючий вплив на систему в цілому [4].

Для оптимізації складу шихт та прогнозування якості коксу розроблені різні моделі. Група моделей першого покоління фокусується на прогнозуванні показників холодної механічної міцності (тобто стабільності ASTM та індексів, отриманих при обробці коксу в барабані MICUM). Пізніші моделі другого покоління використовують як параметри якості коксу CRI і CSR. Не розроблено універсальних моделей прогнозування якості коксу, що пов'язано зі специфічними особливостями вугілля з різних вугільних басейнів, країн, континентів, які можуть різко розрізнятися за складом, будовою та властивостями.

Аналіз математичних моделей прогнозування якості коксу з урахуванням властивостей вугілля, розроблених сталеливарними компаніями та дослідницькими інститутами, представлений у роботах [4-7]. Основні змінні, які враховуються у деяких математичних моделях, представлені у таблиці 2.3.

Аналізуючи дані таблиці, можна сказати, що більшість математичних моделей враховує коефіцієнт відбиття вітриніту та вміст інертних (фюзенізованих) компонентів, максимальну плинність та основність золи вугільної сировини.

В ході дослідження проби відбирали та готували згідно State standard of Ukraine 4096-2002 “Brown coal, hard coal, anthracite, combustible shale and coal briquettes. Methods of sample selection and preparation for laboratory tests” [23].

Для визначення характеристик вугільної сировини використовували стандартизовані методики:

- ISO 1171-97 “Solid mineral fuels. Methods for determination of ash” [24];
- ISO 589-81 “Hard coal—Determination of total moisture”[25];
- ISO 7404-3-84 “Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and an-thracite—Part 3: Method of determining maceral group composition” [26];

Таблиця 2.3

Моделі прогнозування CSR та змінні, які вони враховують

Компанія/дослідний інститут/дослідники	Змінні характеристики вугілля			
	Петрографічні характеристики	Реологічні характеристики пластичного стану вугілля	Характеристики неорганічної частини	Інші
1	2	3	4	5
British Steel	Показник відбиття вітриніту		Зольність коксу	
Nippon Steel	Вміст інертиніту, %, відбивна здатність вітриніту	Максимальна плинність	Індекс основності золи	
BCRA	Вміст інертиніту, %	Максимальна плинність	Вміст основних оксидів у вугіллі	Вміст вуглецю та кисню у вугіллі, пористість коксу
Kobe Steel	Відбивна здатність вітриніту	Максимальна плинність	Основність золи	
BHP	Вміст інертних компонентів	Максимальна плинність	Основність вугільної золи	Вихід летких речовин
Inland Steel		Температура переходу вугілля у пластичний стан	Індекс основності золи	Вміст сірки у вугіллі
ISCOR	Показник відбиття вітриніту, вміст фюзенізованих компонентів	Максимальна плинність	Вміст основних оксидів у золі вугілля	
Tata Steel	Показник відбиття вітриніту, співвідношення між спікливими та інертними мацералами, рефлектограма вітринітової складової	Максимальна плинність, показник вільного спучення	Зольність, співвідношення $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, індекс лужності	Композитний потенціал коксування (ССР), тип коксового залишку за методом Грей-Кінга

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5
ISCOR	Показник відбиття вітриніту, вміст фюзенізованих компонентів	Максимальна плинність	Вміст основних оксидів у золі вугілля	
Tata Steel	Показник відбиття вітриніту, співвідношення між спікливими та інертними мацералами, рефлектограма вітринітової складової	Максимальна плинність, показник вільного спучення	Зольність, співвідношення $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, індекс лужності	Композитний потенціал коксування (ССР), тип коксового залишку за методом Грей-Кінга
Arcelor Mittal Ostrava	Мацеральний склад, рефлектограма вітриніту	Максимальна плинність, індекс вільного спучення; контракція та дилатація за методом Одибера-Арну	Зольність	Сірчистість, вихід летких речовин
Дослідницькі інститути/ДП «УХІН» (використовуються на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ВАТ «Запоріжжкокс»)	Мацеральний склад, рефлектограма вітриніту, показник відбиття вітриніту		Індекс основності золи, зольність	Вміст сірки у вугіллі, вихід летких речовин

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4-7]

- ISO 7404-5-85 “Methods for the petrographic analysis of coals—Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite” [27];

- State standard of Ukraine 7722:2015 “Hard coal. Method of Determining Plasto-metric Characteristics” [28];

ISO-FDIS 13029 Coal – Determination of plastic properties – Constant-torque Gieseler plastometer method. Technical Committee: ISO/TC 27/SC 5 ICS: 73.040, 2017 [29];

- ISO 349:2020 Hard coal — Audibert-Arnu dilatometer test [30];

- ISO 502:2025 Hard coal — Determination of caking power — Gray-King coke test [31].

Характеристики отриманих коксів (показники технічного аналізу, фізико-механічні властивості, термомеханічні властивості), визначались за наступними стандартними методиками:

- State standard of Ukraine ISO 579-2002 “Coke-Determination of total moisture” [32];

- ISO 556-80 “Coke (greater than 20 mm in size)-Determination of mechanical strength” [33];

- ISO 18894:2006 “Coke-Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)” [34].

Додатково для характеристики впорядкованості структури коксів і ступеня їх готовності визначали питомий електричний опір за ДСТУ 8831:2019 “Кокс. Метод визначення питомого електричного опору порошку коксу кам'яновугільного” [35].

Для визначення оптимальних умов підготовки та коксування шихт з великим вмістом петрографічно неоднорідного вугілля в лабораторних і дослідно-промислових умовах були проведені дослідження з визначення їх раціонального марочного та компонентного складу, схем їх підготовки, режиму коксування, а також оцінки впливу цих заходів на якість одержуваного доменного коксу (за показниками механічної міцності, питомого електричного опору).

Проведення зазначених вище заходів особливо актуально в умовах коксохімічних підприємств України, сировинна база яких містить вугілля різних басейнів.

Були відібрані та досліджені зразки виробничої шихти, американського вугілля. Також були розроблені та складені три варіанти дослідних шихт. Компонентний склад шихти був наступним: А-10%, Е-11%, В-8%, F+G+H-10%, D-35%, С-26%.

Визначали технологічні властивості, а також петрографічні характеристики і пластично-в'язкі властивості цих проб. Отримані дані наведені в таблицях 2.4-2.6.

Таблиця 2.4

Технологічні властивості досліджених вугільних концентратів

Проба	Марка ДСТУ 3472-96	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм		Середній показатель отражения витринита, % R _o
		A ^d	S _t ^d	V ^d	V ^{daf}	X	Y	
А	Г	9,4	0,32	37,3	41,2	35	14	0,69
В	ГЖ	6,9	0,73	33,3	35,8	26	17	0,93
С	Ж	9,1	0,54	29,8	32,7	31	19	0,94
Д	К/КО/ КЖ	12,2	0,67	21,5	24,5	28	15	1,14
Е	К	8,8	0,72	26,6	29,2	17	12	1,06
F	К	12,8	1,75	24,0	27,5	36	14	1,31
G	ПС	9,9	0,40	19,0	21,1	16	11	1,53
Н	К	8,6	0,41	18,2	20,0	25	11	1,28

Примітка. Джерело: розроблено автором

Таблиця 2.5

Технологічні властивості досліджених проб

Проба	Марка ДСТУ 3472-96	Технічний аналіз, %				Пластометричн і показники, мм	
		A ^d	S ^d _t	V ^d	V ^{daf}	x	y
Вугілля США	Ж	6,9	1,03	30,8	33,1	17	20
Шихта	-	10,4	0,83	26,5	29,6	34	13

Примітка. Джерело: розроблено автором

Таблиця 2.8

Петрографічні характеристики досліджених проб

Проба	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній показник відбиття вітриніту, % R _o
	V _t	S _v	I	L	Σ ОК	
Вугілля США	73	-	22	5	22	1,02
Шихта	71	1	25	3	26	1,08

Примітка. Джерело: розроблено автором

Таблиця 2.9

Характеристика пластично-в'язких властивостей досліджених проб

Проба	Марка ДСТУ 3472-96	Товщина пластичног о шару, мм/ (Індекс Рогу, од.)	Індекс вільного спучення	Пластично-в'язкі властивості за Гізелером, °С					Дилатація за Одистером-Арну, °С			Спільність за Грей-Кінгом, ГК		
				y/(RI)	FSI	t ₁	t _{max}	t ₃	Δt	F _{max} , под/хв	t ₁	t _{II}	t _{III}	a, %
Вугілля США	Ж	20/80	6 1/2	370	435	480	110	>2800	360	415	475	29	191	G ₈
Шихта	-	13/58	5	370	430	475	105	692	380	430	460	23	18	G ₄

На підставі результатів дослідження концентратів, що надходять на коксохімічне виробництво, а також даних аналізів великої кількості імпортного вугілля, необхідно співставити значення показників якості імпортної вугільної сировини з вітчизняною класифікацією, що дозволить за даними сертифікатів якості імпортного вугілля визначати орієнтовну марочну приналежність за ДСТУ 3472-96 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація».

З різних варіантів віскозиметричних методів дослідження найбільшого поширення в зарубіжній вуглехімії набули метод і апарат Гізелера, показники якого включають в сертифікати якості вугілля.

Значення температур початку переходу в пластичний стан (t_1), максимальної плинності (t_2) і затвердіння (t_3), інтервалу пластичності (Δt), а також показники максимальної плинності (F_{\max}) використовують не тільки як характеристику індивідуального вугілля, але і при розробці оптимального складу шихти для коксування («принцип перекривання»). Для визначення спікливої здатності вугілля використовують польський стандарт PN-84/G-04536.

З різних варіантів дилатометричних методів дослідження частіше за інші використовують метод і дилатометр Одибера-Арну. За цим методом визначають показники температур початку пластичного стану (t_1), максимального стиснення (t_2), максимального розширення (t_3), стиснення («а») і розширення («б»). Дана методика стандартизована в ІСО 349-75 «Вугілля кам'яне. Метод визначення дилатометричних показників в приладі Одибера-Арну».

Крім того, в Міждержавному стандарті ГОСТ 30313-95 «Вугілля кам'яне та антрацити (вугілля середнього та високого рангу). Кодифікація» передбачено визначення індексу вільного спучування (FSI) за ДСТУ 7599:2014 Вугілля кам'яне. Метод визначення індексу вільного спучування (ISO 501:2012), як одного з восьми параметрів кодування кам'яного вугілля для коксування.

За результатами аналізу можна зробити наступний висновок. Американське вугілля характеризується низькою зольністю і вмістом сірки. За всім комплексом генетичних характеристик і пластично-в'язких властивостей воно є типовим жирним вугіллям. У процесі термічної деструкції він утворює значну кількість нелетких рідкорухливих продуктів, що характеризуються високою плинністю і здатністю запікати не тільки залишковий матеріал деструктивних вугільних зерен, але і велику кількість неспекаючих добавок, про що свідчать дані, отримані за методами Рога і Грей-Кінга. Пластична маса цього вугілля, як і всіх жирних вугілля, має яскраво виражену властивість спучуватися, що підтверджується високими значеннями індексу вільного спучування і дилатації за методом Одибера-Арну. Таким чином, за всім комплексом вивчених властивостей американське вугілля є аналогом донецьких жирних вугілля, відрізняючись від останніх меншою зольністю і вмістом сірки, а також дещо підвищеним вмістом неспекаючих мацералів групи інертиніту.

Виробнича шихта заводу має підвищену зольність ($A^d=10,4\%$) порівняно з шихтами інших заводів України, де зольність шихти, як правило, коливається в межах 8,5-9,0 %. Вміст сірки в шихті невисокий ($S_t^d=0,83\%$). Слід зазначити, що в складі вітриніту шихти представлені вугілля практично всіх стадій метаморфізму від «ДГ» до «П» і «А». Основна кількість складових вітриніту зосереджена в інтервалі значень показника відбиття, що відповідає газовим (Г-20%) і жирним вугіллям (Ж-59%).

Сумарний вміст складових вітриніту, що відповідає жирним і коксовим вугіллям, склав 66%. Однак, враховуючи, що абсолютний вміст вітриніту в шихті становить всього 71%, фактична кількість складових вітриніту, що відповідають вугіллю марок «Ж» і «К», в органічній масі склала всього 46,9%, що досить далеко від рекомендованого мінімального значення, рівного 53%, яке забезпечує отримання високоміцного металургійного коксу. Знижена кількість добре спікаючих складових вітриніту і підвищений вміст неспікаючих мацералів групи інертиніту, а також висока зольність, зумовили

низьку спіканість і коксуваність шихти в цілому, що знайшло відображення в результатах дослідження пластично-в'язких властивостей шихти.

Виробнича шихта була розсіяна на класи крупності, для яких визначали показники технічного аналізу, здатність до спікання за методом Рога, а також петрографічні характеристики. Крім того, визначали в класах крупності шихти більше 1 мм вміст і якість фракцій легше і важче 1400 кг/м³. Зазначені дані наведені в табл. 2.8 і 2.9 і були використані для розрахунку оптимального ступеня подрібнення шихти за методикою, викладеною в роботі [21].

Таблиця 2.11

Властивості класів крупності виробничої шихти

Шихта	Гранулометричний склад, %		Технічний аналіз, %				Спікливість за методом Рога, од. RI
	Класи крупності, мм	Вихід, %	W ^a	A ^d	V ^d	V ^{daf}	
	>10	3,2	1,4	17,5	26,4	32,0	45
	10 - 6	5,5	1,6	11,0	26,3	29,5	53
	6 – 3	8,6	2,0	9,4	28,7	31,7	48
	3 – 2	11,6	1,8	9,3	27,5	30,4	53
	2 – 1	11,5	1,7	8,4	27,3	29,8	66
	1 – 0,5	14,0	2,2	8,5	26,7	29,2	65
	0,5 – 0,25	13,0	2,0	8,1	27,5	29,9	65
	< 0,25	32,6	2,1	12,8	25,0	28,6	56
Загальна шихта (фактична)		100,0	1,7	10,4	26,5	29,6	58
Загальна шихта (розрахункова)		100,0	2,0	10,4	26,5	29,6	58
Фракційний склад шихти (кл. > 1 мм)							
фракція <1400 кг/м ³		78,7	2,1	6,4	29,3	31,3	60
фракція >1400 кг/м ³		21,3	2,2	28,4	19,6	27,4	21

Таблиця 2.12

Петрографічні характеристики класів крупності виробничої шихти

Класи крупності, мм	Вихід класу крупності, %	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній показник відбиття вітриніту, % R _o	Стадії метаморфізму вітриніту, %						
								0,50 - 0,65	0,66 - 0,89	0,90 - 1,19	1,20 - 1,39	1,40 - 1,69	1,70- 2,59	2,60 та більше
		Марки вугілля, які умовно відповідають стадіям метаморфізму вітриніту							ДГ	Г	Ж	К	ПС	Т
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
>10; 10 – 6; 6 – 3	17,3	61	1	34	4	35	1,11	4	25	55	3	4	4	5
3-2; 2-1	23,1	70	1	28	1	29	1,08	4	23	58	6	5	1	3
1-0,5; 0,5-0,25; <0,25	59,6	72	1	25	2	26	1,10	4	14	61	11	6	3	1
Загальна шихта (фактична)	100,0	71	1	25	3	25	1,08	4	20	59	7	5	2	2
Загальна шихта (розрахункова)	100,0	70	1	27	2	28	1,10	4	18	59	8	5	3	3
Фракційний склад шихти (кл. > 1 мм)														
фракція <1400 кг/м ³	78,7	79	-	18	3	18	0,98	8	31	48	6	4	3	-
фракція >1400 кг/м ³	21,3	54	2	39	5	41	1,21	2	16	57	8	7	4	6

Примітка. Джерело: розроблено автором

Отримані результати дослідження вказують на неоптимальний розподіл класів крупності та їх якість. Так, у шихті міститься 45,6% пилоподібних фракцій крупністю менше 0,5 мм, які помітно ускладнюють процес бездимного завантаження, сприяючи потраплянню в смолу найдрібніших вугільних частинок, що підвищує її зольність і щільність.

У той же час, шихта містить багато високозольних слабоспівливих крупних зерен розміром більше 6 мм, які в коксі є центрами тріщиноутворення, знижуючи його опір подрібнюючим зусиллям.

Зерна шихти розміром понад 1 мм містять 21,3% промпродуктових фракцій із зольністю 28,4% і зниженою спікливою здатністю, характеризується методом Рога і дорівнює всього 21 од., тоді як решта шихти має значення цього показника на рівні 60 од.

Ступінь подрібнення вугільної шихти за зазначеною вище методикою [21] в залежності від її петрографічних характеристик і спікливості може бути визначений за рівнянням:

$$k = \frac{75 \cdot V_t \cdot \frac{\sum(0,9 - 1,39)}{100} + 90 \cdot V_t \cdot \frac{\sum(0,5 - 0,89) + \sum(1,4 - 2,6)}{100} + 90 \cdot \sum OK}{100}, \% \quad (2.1)$$

де k – оптимальний ступінь подрібнення вугільної шихти, %; 75 – рекомендований рівень подрібнення вугілля марок Ж і К, %; 90 – те ж, для вугілля марок Г, ПС, П, %; V_t – вміст мацералів групи вітриніту, %; $\sum(0,5 \div 2,6)$ – вміст складових вітриніту з величиною показника відбиття 0,5-2,6 %; $\sum OK$ – сума фіузенізованих компонентів, %.

Отже, розрахунок оптимального рівня подрібнення, що забезпечує максимальні показники міцності металургійного коксу з урахуванням даних табл. 7 і 8, показав, що він повинен становити величину 76% вмісту класу менше 3 мм замість 82,7%, як це має місце в дослідженій пробі виробничої шихти. З огляду на те, що при фактичному рівні подрібнення вміст

пилоподібних фракцій в шихті вже дуже великий, що обумовлює зниження насипної маси шихти в камері коксування і виникнення ряду технологічних труднощів при наборі шихти в бункера завантажувального вагона, бездимному завантаженні і т.д.

У зв'язку з цим необхідно встановити пристрої для відсіву дрібних класів шихти перед її остаточним подрібненням, щоб уникнути її значного переподрібнення.

Були розроблені варіанти дослідних шихт для перевірки їх ящиковими коксуваннями. Марочний і компонентний склад дослідних шихт, а також технологічні властивості і петрографічні характеристики вугілля і шихт наведені в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13

**Петрографічні характеристики дослідних шихт
та вугільних концентратів**

Компонент шихти	Марка ДСТУ 3472-96 или ГОСТ 25543-88	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній показник відбиття вітриніту, % R _o
		V _t	S _v	I	L	Σ ОК	
G	Г	85	-	12	3	12	0,69
GZh	ГЖ	73	-	23	4	23	0,93
Zh	Ж	79	-	20	1	20	0,94
K1	К	91	-	8	1	8	1,06
K2	К	89	1	8	2	9	1,31
K3	К/КО/КЖ	76	3	21	-	23	1,14
K4	К	38	2	60	-	62	1,28
OS	ПС	89	1	10	-	11	1,53
шихта базова		74	1	22	3	23	1,07
шихта дослідна вар. 1		79	-	20	1	20	1,00
шихта дослідна вар. 2		78	1	19	2	20	1,10
шихта дослідна вар. 3		80	1	18	3	18	1,05

Примітка. Джерело: розроблено автором

При розробці варіантів дослідних шихт керувалися тим, що перш за все необхідно було в дослідних шихтах порівняно з базовою зменшити вміст опіснюючих мацералів групи інертиніту насамперед за рахунок вугілля К4, а також вивести з шихти вугілля марки К3, яке фактично не містить вітриніту, відповідного цій марці, а має в своєму складі підвищену кількість складових, що відповідають газовим, жирним і худим вугіллям. Вирішенню зазначених вище завдань також сприяє введення в шихту петрографічно однорідного вугілля OS, а також збільшення вмісту вугілля К2 і G, у яких вміст мацералів групи інертиніту мінімальний.

Аналіз даних таблиці 2.13 показує, що поставлені завдання були досягнуті.

Вміст опіснюючих мацералів (суми опіснюючих компонентів Σ ОК) в дослідних шихтах порівняно з базовою знижено з 23% до 19-20%. Кількість складових вітриніту, що відповідають вугіллю марок Ж і К, в органічній масі зросла з 45,1% в базовій шихті до 51,4; 49,9 і 48,8% відповідно в дослідних варіантах.

Ящикові коксування проводили за наступною методикою. Дослідні шихти масою 5,5 кг завантажували в металеві ящики. При обсязі ящика 7,3 дм³, щільність дослідних шихт в них склала приблизно 0,760 т/м³, тобто відповідала середнім практичним даним про щільність шихти в камері. Фото ящиків представлені на рисунку 2.1.

Коксування дослідних шихт проводилося на коксових батареях (корисний об'єм камери 21,6 м³) у спеціально обраних печах з хорошим станом кладки обігрівальних простінків і стабільним теплотехнічним режимом.



Рис.2.1. Ящики металеві для коксування дослідних шихт

Завантаження ящиків здійснювали через середній люк після випуску шихти з коксового і машинного бункерів вуглезавантажувального вагона, з тим щоб ящики з шихтою розташовувалися на рівні приблизно 2,5 м від пода камери коксування, тобто в зоні оптимальних температурних умов. У кожну камеру завантажували по чотири ящики, за кількістю дослідних шихт. Дослідні коксування здійснювалися при теплотехнічному режимі, параметри якого представлені в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14

Умови коксування вугільних шихт

Період коксування, год	Температури в контрольних вертикалах, °С		Температура по осі коксового пирога, °С
	машинна сторона	коксова сторона	
15 годин 30 хвилин	1320	1350	1035

Примітка. Джерело: розроблено автором

Після закінчення процесу коксування видача коксового пирога з ящиками здійснювалася за звичайною технологією (видача з камери в гасильний вагон, гасіння, вивантаження на коксівну рампу), при необхідності ящики дотушували водою і доохолоджували на повітрі.

Отриманий дослідний кокс витягували з ящиків, зважували і сушили до постійної маси для визначення виходу валового коксу з шихти і проведення подальших аналізів. Результати досліджень дослідних коксів наведені в таблицях 2.15 і 2.16.

Таблиця 2.15

Якісні показники коксу ящикових коксувань та коефіцієнти озолення та знесірчення

Варіант шихти	Технічний аналіз, %			Коефіцієнт озолення	Коефіцієнт знесірчення	CRI, %	CSR, %	ρ , Ом·см
	A ^d	S _t ^d	V ^{daf}					
шихта базова	12,9	0,61	0,9	1,303	0,806	38,3	40,5	0,0597
шихта дослідна вар. 1	12,9	0,53	0,6	1,330	0,815	36,5	44,0	0,0568
шихта дослідна вар. 2	12,6	0,52	0,5	1,299	0,800	36,1	44,9	0,0562
шихта дослідна вар. 3	12,8	0,53	1,1	1,312	0,869	35,2	48,8	0,0547

Примітка. Джерело: розроблено автором

Таблиця 2.16

Вихід та якість коксу ящикових коксувань

Варіант шихти	Вихід та міцність коксу ящикових коксувань, %		
	V _{вал. сух.}	M ₂₅	M ₁₀
шихта базова	76,31	92,1	7,3
шихта дослідна вар. 1	75,26	92,3	7,5
шихта дослідна вар. 2	76,60	92,4	7,0
шихта дослідна вар. 3	75,82	92,7	6,9

Як видно з наведених даних, зольність базового та дослідних коксів висока і коливається в межах 12,6-12,9 %. У той же час, вміст сірки низький і змінюється в інтервалі 0,52-0,61%.

Коефіцієнти озолення залежать від виходу летких речовин із шихти, знижуючись при меншому виході і збільшуючись при його підвищенні. Коефіцієнт залишкової сірки в коксі укладається в межах 0,800-0,869.

Питомий опір є мірою температурної дії при протіканні процесу термічної деструкції вугілля і перетворення коксу. При температурному впливі, внаслідок структурних змін органічної матриці вугілля трансформуються фізичні властивості, а в даному випадку – і електропровідність (опір). Залежно від кінцевої температури процесу питомий електричний опір зменшується тим більше, чим вище ця температура. Оскільки визначення електричного опору є простішим, не потребує реагентів та займає значно менше часу, ніж вимірювання реакційної здатності, його можна вважати оперативним методом визначення структурних характеристик та готовності коксу. Тому показник питомого електроопору може характеризувати ступінь готовності коксу.

Для забезпечення раціонального температурного режиму коксування петрографічно неоднорідних міжбасейнових вугільних шихт необхідним є систематичний контроль температурного режиму коксування, підвищення готовності коксу в головочних зонах камери коксування, систематичний контроль повноти завантаження. Висоти та температури підсводного простору. Отже, готовність отриманого коксу хороша, на що вказують дані про вихід летких речовин, величина якого дорівнює 0,5-1,1%, і величина питомого електричного опору, значення якого знаходяться в межах 0,0547-0,0597 Ом·см. Залежність питомого опору коксу від його реакційної здатності ілюструє графік на рисунку 7, причому коефіцієнт кореляції становить 0,83.

Показники реакційної здатності CRI і післяреакційної міцності CSR виявилися найгіршими у коксу з базової шихти, а найкращі значення були отримані у коксу з шихти варіанту №3. Кокс із шихт варіантів №1 і 2 також

кращий за кокс із базової шихти. Це обумовлено насамперед тим, що зі складу дослідних шихт виведено вугілля К3, яке має екстремально високий індекс основності, рівний 8,32.

Таким чином, перехід на коксування шихти без участі вугілля К4 і К3 дозволяє помітно поліпшити показники якості коксу.

2.3 Забезпечення раціонального температурного режиму коксування петрографічно неоднорідного вугілля

Як ми вже відзначали, особливістю вугільної сировинної бази КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є використання значної кількості петрографічно неоднорідного вугілля Кузнецького, Карагандинського й Печорського басейнів. Практикою роботи коксохімічних підприємств України, а також дослідженнями ДП «УХІН» доведено, що при коксуванні такого вугілля для забезпечення необхідної готовності і якості коксу потрібно підвищувати рівень температур у контрольних вертикалах на 3-5°C на кожні 10% участі такого вугілля у шихтах [34]. Зокрема, для складу шихти, рекомендованого УХІНом 28.09.07р. (%): Г - 6, Ж США - 20, 2Ж - 10, К+КП+ПС - 40, Ж Канада - 10, КО+КП+КС - 14, рекомендується підвищити рівень температур на 25-30°C у зв'язку з участю в шихті 70% такого вугілля. Підвищення температур необхідно здійснювати поетапно по 5-10°C через кожні 2-3 обороти печей.

Це дозволило забезпечити необхідну готовність коксу.

Батареї № 5 і 6 у зазначений період часу працювали при обороті печей 15 годин 30 хвилин. Склад шихти відповідно до розпорядження по КХВ № 271 від 22.10.2007р. був наступним (%): Г - 5, ГЖ США - 30, 2Ж - 8, К+КП+ПС - 35, К - 12, К+КП+КС - 10, тобто вміст петрографічно неоднорідного вугілля Кузнецького, Карагандинського й Печорського басейнів становив 58%. Це вимагає підвищення температури в опалювальній системі на 20-25 °С. Відповідно до цього рівень температур у контрольних

вертикалах при зазначеному періоді коксування був підвищений до 1315°C з машинної сторони й 1345°C з коксової.

Такий рівень температур забезпечував необхідну готовність коксу, що було підтверджено при візуальному огляді коксу в момент його видачі з печей.

У цілому рівень прогріву був достатнім, що підтверджується величиною зусилля видачі коксового пирога (амперажу) - більше 70% печей були видані при максимальній силі струму привода штанги 140-160А, інші - при силі струму до 200А.

Як ми вже відзначали, шихти всіх батарей характеризуються близькими за складом і технологічними властивостями (розрахункові значення виходу летких речовин змінюються в межах 0,5 %, а товщини пластичного шару - до 0,3мм) і дробляться за однією схемою ДШ. У таких умовах на якість коксу в основному впливає швидкість коксування, а при однаковій ширині камер на всіх батареях (410 мм) - тривалість періоду коксування. У таблиці 2.17 наведені дані про якість коксу по блоках батарей.

Таблиця 2.17

Показники якості коксу (%)

Батареї	ПК, год.	W_t^r	A_t^d	V^{daf}	S_t^d	M_{25}	M_{10}	>80	<25
1,2,4	17,5	3,5	12,6	0,7	0,61	87,2	7,9	6,6	4,3
5,6	15,5	3,5	12,6	0,6	0,60	86,2	8,0	5,4	5,6
7,9	19,5	3,6	12,7	0,6	0,62	87,7	8,3	9,2	3,5

Примітка. Джерело: розроблено автором

Як бачимо, показники технічного аналізу коксу різних блоків близькі між собою і їх значення визначаються в першу чергу властивостями вугільної шихти. Показники механічної міцності й ситового складу залежать головним

чином від тривалості періоду коксування. Для одержання низької реакційної здатності коксу потрібна достатня витримка при кінцевій температурі коксування в умовах, коли вже відсутній процес активації. Однак тривала витримка коксу при кінцевій температурі приводить до зміни гранулометричного складу в бік збільшення вмісту дрібних класів. Регулюючи кінцеву температуру коксування й тривалість витримки при цій температурі, можна деякою мірою впливати на структуру коксу й тим самим на його реакційну здатність [17].

Особливості технологічних схем і рівня механічних навантажень на кокс при його сортуванні проявляються в набагато меншому ступені.

Цікаво, що чітко простежується залежність показника реакційної здатності від терміну служби коксових батарей, тобто від стану пічного фонду: чим «старіше» коксові батареї, тим вище реакційна здатність одержуваного в них коксу [17].

Дослідженнями, виконаними УХІНом на Маріупольському й Авдіївському КХВ [35, 36], показано, що при подовженні періоду коксування на 1 годину показник M_{25} коксу зростає в середньому на 0,4%, а M_{10} знижується на 0,05%. Дійсно, на батареях № 1, 2 і 4 при періоді коксування 17,5 годин у порівнянні з батареями № 5 і 6 (період коксування 15,5 год.) якість коксу за M_{25} вище на 1,0%, а M_{10} зменшується на 0,1%.

Відзначені особливості технологічних властивостей шихти (наявність великої кількості пилоподібних класів менше 0,5 і 0,25мм) і температурного режиму коксування (підвищення температур у контрольних вертикалах при переробці петрографічно неоднорідного вугілля) викликають підвищену увагу до виходу і якості хімічних продуктів коксування, насамперед кам'яновугільної смоли й сирого бензолу. У першій половині жовтня 2007 року погіршилася якість смоли за показниками густини й вмісту нерозчинних речовин, особливо на батареях № 5 і 6. Проведене обстеження показало, що найбільш імовірними причинами цього можуть бути:

- значне віднесення пилоподібних класів шихти в газозбірник;

- вторинний піроліз парогазових продуктів у підсводовому просторі коксових печей.

Завантаження камер коксування характеризувалося достатньою повнотою, висота підсводового простору відповідала вимогам п. 7.21 ПТЕ (250-350 мм відразу після завантаження печі) [37].

Персоналом цеху були вжиті заходи, спрямовані на забезпечення необхідної якості смоли: був збільшений коефіцієнт надлишку повітря на спалювання опалювального газу й температура в підсводовому просторі приведена у відповідність із ПТЕ (750-800°C). Також тиск пари на інжекцію було знижено до 5 атм, що трохи зменшило віднесення пилоподібних класів шихти в газозбірник.

У результаті була відзначена тенденція деякого поліпшення якості смоли батарей № 5 і 6.

Слід зазначити, що ці питання є актуальними й для інших батарей заводу.

У цілому ж, необхідний пошук «компромісу» у питанні забезпечення необхідної якості смоли одночасно із забезпеченням якості коксу (температурний режим коксування) і екологічних вимог (коефіцієнт надлишку повітря, робота системи бездимного завантаження).

Таким чином, для забезпечення раціонального температурного режиму коксування петрографічно неоднорідних міжбасейнових вугільних шихт КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» необхідно:

1. Підвищення рівня температур у контрольних вертикалах на 3-5°C на кожні 10% участі такого вугілля у шихтах.
2. Систематичний контроль температурного режиму коксування:
 - кінцеві температури коксування шляхом пірометричних вимірів - щодня;
 - вимірювання температур за віссю коксового пирога термопарами - не рідше одного разу на квартал.

За результатами цих вимірів необхідно виявити відповідність між результатами пірометричного й термопарного вимірів і використовувати

отримані результати для коректування рівня температур в опалювальній системі.

3. Підвищення рівня готовності коксу в головочних зонах камери коксування:

- подача в крайні й передкрайні вертикали додаткової кількості опалювального газу й повітря для компенсації підвищених тепловтрат у навколишнє середовище й запобігання обвалів коксу;

- забезпечення справного стану вогнетривкої футеровки дверей коксових печей.

4. Систематичний контроль повноти завантаження камер, висоти й температури підсводового простору, роботи системи бездимного завантаження шихти.

2.4 Економічна ефективність дослідницьких рішень

Темою кваліфікаційної роботи передбачається дослідження можливості використання імпортного вугілля в сировинній базі коксування КХВ ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Вітчизняна сировинна база не в змозі самостійно забезпечити виробництво доменного коксу поліпшеної якості. Внаслідок цього, гостро постає питання про раціональне використання імпортних компонентів у вугільних шихтах для коксування.

У рамках даної кваліфікаційної роботи проводилися дослідні ящикові коксування із варіюванням участі вітчизняного та імпортного вугілля (базова шихта та три варіанти дослідних шихт). В даний період на коксохімічному виробництві використовується базова шихта, яка складається із вугілля різного походження: 30% - США, 35% - Казахстан, 10% - Україна, 25%-інші постачальники. В даній роботі ми пропонуємо збільшити участь імпортного вугілля у шихті. Третій варіант дослідних шихт (проектна шихта) складається з 30% вугілля близького зарубіжжя, 30% американського і 40%

казахстанського вугілля. Кокс із цієї шихти має найкращі показники якості: показник CSR (показник гарячої міцності коксу) – 48,8% проти 40,5% коксу з базової шихти. Економічна ефективність використання у вугільній шихті імпортного вугілля розраховується на основі показника якості CSR коксу з дослідних вугільних шихт та його ефекту на показники роботи у доменному виробництві. За рахунок покращення якості коксу знижується його витрата на 1 тону чавуну. Отже, витратний коефіцієнт коксу з базової шихти, у порівнянні з витратним коефіцієнтом коксу з проектної шихти, за нашими підрахунками, знизиться з 0,445т/т чавуну до 0,436т/т.

В даній кваліфікаційній роботі досліджується можливість використання імпортного вугілля в сировинній базі коксування КХВ ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Тому дослідні ящиківі коксування проводилися з метою подальшої рекомендації впровадження у виробництво найбільш оптимальних шихт.

Дослідні коксування проводилися на батареях 5 – 6 КХВ ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Коксували три дослідні варіанти шихти а також базову шихту. Склад та якісні показники дослідних вугільних шихт представлені у таблиці 2.18.

Виходячи з цілей роботи, доцільно порівняти базову шихту з третім варіантом шихти, який складається тільки з компонентів імпортного вугілля, тобто компоненти вітчизняної сировинної бази не використовуються. Показники якості коксу з цієї шихти найкращі серед інших дослідних шихт. Порівняння якості коксу з базової та проектної шихти представлене у таблиці 2.19. Крім того, заготівельна вартість проектної шихти нижча, ніж базової, 727,90 грн/т шихти проти 735,85 грн/т шихти. Заготівельна вартість проектної та базової шихт представлена в таблиці 2.20.

Таблиця 2.18

Склад та якісні показники дослідних вугільних шихт

Компоненти шихти	Марка	Склад шихт, %			
		база	1	2	3
A	Г	5	10	-	10
B	ГЖ	30	30	30	30
C	Ж	10	10	10	10
D	К	-	10	10	-
E	К	10	-	-	-
F	К, КП, КЖ	35	40	40	40
G	К	10	-	-	-
H	ПС	-	-	10	10
Всього		100,00	100,00	100,0	100,0
Якість шихти					
A ^d , %		9,9	9,7	9,7	9,8
S ^d _t , %		0,76	0,65	0,65	0,61
V ^d , %		26,5	28,0	26,1	27,2
V ^{daf} , %		29,3	30,9	28,8	30,0
X, мм		28	27	25	27
Y, мм		16	16	16	16
R _o , %		1,10	0,99	1,09	1,03
OK		23	19	20	19

Примітка. Джерело: розроблено автором

Таблиця 2.19

Якісні показники коксу з базової та проектної шихт

Варіант шихти	Технічний аналіз, %			CRI	CSR	Прогнозовані показники виходу й міцності промислового коксу, %		
	A ^d	S _t ^d	V ^{daf}			%	%	B _{вал.} ^{сухий.}
Базовий	12,9	0,61	0,9	38,3	40,5	76,31	87,1	8,0
Проектний	12,8	0,53	1,1	35,2	48,8	75,82	87,7	7,4

Таблиця 2.20

Заготівельна вартість проектної та базової шихт

Компоненти шихти	Кількість		Ціна за договором		Послуги ЗДЦ, тис. грн.	Залізничний тариф		Вартість заготовлення	
	% участі	Факт. вага, тис. тон	1 т., грн	Всього, тис. грн.		1 т., грн	Всього, тис. грн.	1 т., грн	Всього, тис. грн.
Базова шихта									
Кирова	5	16,5	448,69	7 403,4	97,9	28,96	477,8	523,22	7 979,1
США	30	99,0	969,60	95 990,4	591,1	39,6	3520,5	1049,00	96 581,5
Печорская	10	33,0	525,45	17 339,9	194,9	34,14	1126,6	614,67	18 661,4
Укркокс	10	33,0	540,35	17 831,6	192,6	28,96	955,7	632,66	18 979,9
Восточная	35	115,5	494,90	57 161,0	672,6	28,96	3344,9	583,99	61 178,5
Северная	10	33,0	550,45	18 164,9	195,4	34,14	1126,6	640,38	19 486,9
Всього	100	330,0	648,16	213 891,2	1 944,5	21,31	7 031,6	735,85	222 867,3
Проектна шихта									
Кирова	10	33,0	448,69	14 806,8	195,7	28,96	955,7	523,39	15 958,2
США	30	99,0	969,60	95 990,4	591,1	39,6	3520,5	1049,00	96 581,5
Печорская	10	33,0	525,45	17 339,9	194,9	34,14	1126,6	614,67	18 661,4
Восточная	40	132,0	494,90	65 326,8	768,6	28,96	3822,7	584,01	69 918,1
Нерюнгринская	10	33,0	550,45	18 164,9	195,4	34,14	1126,6	640,38	19 486,9
Всього	100	330,0	641,30	211 628,8	1 345,7	24,31	7 031,6	727,90	220 606,1

Аналіз показників якості коксу згідно таблиці 2.19, показує що значення показника CSR коксу з проектної шихти становить 48,8% проти 40,5% коксу з базової. Високе значення CSR має позитивний вплив на зниження руйнування коксу у доменній печі, також поліпшується проникність газів і рідин у зоні плавлення доменної печі, підвищується продуктивність печі і т.д. Практикою доведено, що з підвищенням даного показника на 1% знижується витрата коксу на 1,0 кг на тону чавуну. Розрахуємо зміну витратного коефіцієнту в запропонованому проекті.

$$(48,8 - 40,5) \times 1,00 = 8,3 \text{ кг/т} \quad (2.1)$$

Таким чином, при використанні у доменній печі коксу з проектної шихти за участю імпортного вугілля витратний коефіцієнт коксу на виробництво чавуну зменшиться на 8,3 кг/т, що дасть можливість знизити собівартість виробництва.

Розрахуємо вихід коксу валового із сухої шихти, вихід коксу валового із сухої шихти складає 77%, отже:

$$3657894 \times 0,77 = 2816578 \text{ т коксу валового} \quad (2.2)$$

Вихід коксу доменного із коксу валового складає 93%, тоді:

$$2816578 \times 0,93 = 2619418 \text{ т коксу доменного} \quad (2.3)$$

Розрахуємо економію собівартості чавуну за рахунок запропонованого проекту за формулою:

$$\Delta B_k = (\kappa_1 - \kappa_2) \times C_0 \times A_0 \quad (2.4)$$

де C – ціна одиниці сировини;

κ_1, κ_2 – відповідно витратні коефіцієнти коксу на тону чавуну до впровадження і після впровадження проекту;

A_0 – обсяг виробництва в базовому варіанті.

$$\Delta B_k = (\kappa_1 - \kappa_2) \times C_0 \times A_0 = 0,0083 \times 2619418 \times 735,85 = 15961594 \text{ грн.}$$

Використання коксу з проектної шихти дозволяє знизити собівартість продукції на 15961,6 тис.грн.

Таким чином, при впровадженні у виробництво запропонованого проекту шихти підприємство за рахунок зниження на 1,87% витратного коефіцієнту коксу для виробництва чавуну, в результаті використання коксу з імпортного вугілля із значенням показника CSR 48,8% проти 40,5% в коксі з базової шихти, дає можливість знизити собівартість продукції на 15961,6 тис.грн. за рік.

2.5 Висновки до основної частини

При дослідженні ступеня взаємодії вугілля різних марок і басейнів в процесі коксування з метою отримання коксу заданої якості, а також для визначення впливу марочного складу вугільної шихти на величину показників «гарячої» міцності та реакційної здатності коксу доменного доцільно проводити ящикові та дослідно-промислові коксування основних марок вугілля та їх сумішей з отриманням різних зразків коксу з визначенням їх показників реакційної здатності (CRI) та міцності після реакції з CO_2 (CSR).

Головним завданням у цьому випадку є встановлення впливу частки зміни тієї чи іншої марки в шихті на величину цих показників.

Через скорочення ресурсів рядового коксівного вугілля більшість збагачувальних фабрик збагачує від двох і більше марок вугілля, що призводить до їх змішування і погіршення марочної приналежності і якості вугілля, а в окремих випадках - до повної втрати технологічних властивостей концентратів.

Якщо врахувати, що збагачувальні фабрики випускають такі суміші, то стає зрозумілим, що якість поставляються концентратів для коксування не забезпечує вимоги металургійного виробництва до якості доменного коксу, виробленого коксохімічним виробництвом.

Найважливішою умовою стабільності коксу є рівномірність у часі зольності, виходу летючих речовин, вміст вологи і сірки, спікливості, коксівності, гранулометричного складу і насипної щільності вугільної шихти. Якість шихти і стабільність її властивостей визначається сировинною базою коксування.

Тому для отримання стабільного і задовільного за якістю коксу необхідно застосування раціонального розподілу коксівного вугілля і підбору шихт оптимального складу для підприємства.

Якщо для отримання високоміцного коксу основною вимогою є достатня спікливість шихти (що забезпечувалося наявними ресурсами українських вугілля), то для отримання низькорекційного, малосірчистого коксу з високою термомеханічною міцністю необхідне залучення імпортованих вугілля різних стадій метаморфізму.

Використання поряд з українськими імпортованими вугілля різних країн і басейнів вимагало подальшого проведення експериментального вивчення їх властивостей, технологічних особливостей, а також уточнення схем їх підготовки і теплотехнічних режимів коксування.

Особливу актуальність ці дослідження набули у зв'язку із залученням до сировинної бази коксування заводів України американського вугілля різних стадій метаморфізму, що зробило необхідним подальший розвиток і

уточнення наукових принципів та вироблення практичних рекомендацій для отримання коксу поліпшеної якості.

Коксівне вугілля було і залишається надзвичайно важливим сировинним ресурсом стратегічного значення для функціонування та економічного розвитку промисловості багатьох країн. Забезпечення економічної ефективності та результативності виробництва коксу в умовах багатобасейнової сировинної бази для коксування вимагає оптимізації складового складу вугільних партій та вдосконалення основних технологічних методів підготовки з урахуванням його петрографічних характеристик.

В основній частині роботи використовувалися стандартизовані методи дослідження технологічних і пластично-в'язких властивостей вугілля та вугільних партій. Якісні характеристики коксу визначалися за допомогою фізико-механічних і термохімічних методів дослідження стандартизованих показників: подрібнюваності (M_{25}), абразивності (M_{10}), реактивності (CRI), міцності після реакції (CSR) і питомого електричного опору (ρ). Статистичний аналіз результатів, аналіз впливу факторів сировини на механічні та термохімічні властивості коксу проводилися за допомогою ліцензійної комп'ютерної програми Microsoft Excel.

За результатами експериментального промислового коксування науково обґрунтованих складів шихти, розроблених із використанням імпортного вугілля, запропоновано два варіанти вугільних шихт, кокс з яких має найкращі показники якості. Якісні показники металургійного коксу були поліпшені за рахунок додавання до шихти 10% вугілля G. Таким чином, механічна міцність за показником дробимості M_{25} збільшилася на 0,6%, а стирання M_{10} зменшилося на 0,4%. Зафіксовано істотне поліпшення термохімічних властивостей і підвищення впорядкованості структури вуглецю: реактивність CRI знизилася на 3,1%, міцність після реакції CSR збільшилася на 8,3%, а питомий опір знизився на 8,4%.

ВИСНОВКИ

Підвищення ефективності виробництва металургійного комбінату значною мірою визначається економним витрачанням сировинних і енергетичних ресурсів. У зв'язку з цим зниження питомої витрати коксу на виробництво чавуну, сировинних і енергетичних витрат на виробництво коксу - головний напрямок розвитку металургійного комбінату. Найважливішою умовою зниження питомої витрати коксу є підвищення якості доменного коксу. Кокс є паливом, відновником і розпушувачем шихтових матеріалів. Це єдиний сировинний матеріал, здатність якого дозволила здійснити процес переробки залізорудної сировини в чавун.

В умовах роботи коксохімічного виробництва важливу роль відіграє якісне складання вугільних шихт для виробництва металургійного коксу. Крім того, сучасний розвиток доменного виробництва значною мірою залежить від виробництва та поліпшення якості металургійного коксу. Зростаючі вимоги до якості та збільшення обсягу виробництва коксу висувують нові завдання щодо вдосконалення технології складання вугільних шихт.

Вирішувати ці завдання доводиться в умовах скорочення запасів і видобутку добре спікаючихся вугілля, необхідних для виробництва коксу необхідної якості при сучасному процесі шарового коксування.

Забезпечення сучасних доменних печей високоякісним металургійним паливом і проблема поліпшення фізико-механічних властивостей коксу нерозривно пов'язані з питаннями розширення сировинної бази коксування і раціонального використання в процесі коксового виробництва вугілля різних басейнів.

Впровадження в практику контролю вихідних концентратів дозволило стабілізувати основні показники якості одержуваного коксу, проте якість його механічної міцності не завжди задовольняє доменне виробництво. Тому останнім часом у металургії вважають, що визначальними показниками якості

коксу в світі визнано індекс реакційності (CRI) і міцність після реакції з діоксидом вуглецю (CSR).

Реакційна здатність коксу відіграє важливу роль у доменному процесі. Вона визначає не тільки питому витрату коксу, але і продуктивність доменної печі, впливаючи на газопроникність і розподіл газів. Роль реакційної здатності зводиться, перш за все, до інтенсифікації процесу руйнування коксу в нижніх горизонтах доменної печі внаслідок його газифікації. Реакційна здатність і міцність коксу тісно взаємопов'язані: чим вища реакційна здатність коксу, тим інтенсивніше він руйнується при опусканні в нижні горизонти доменної печі.

Експериментальні дослідження, проведені в рамках даної дослідницької роботи, дозволили сформулювати наступні висновки.

1. Сировинна база коксування КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є багатомарочною та різнобасейною, що спричиняє певні труднощі при розробці раціональних складів вугільних шихт, з урахуванням умов їхньої підготовки й коксування для одержання доменного коксу стабільної якості
2. На підставі комплексного дослідження показників якості вітчизняного й імпортного вугілля, що входить до складу сировинної бази коксування КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», встановлено співвідношення значень показників якості вугілля, які визначаються іноземними методами, з вітчизняною класифікацією.
3. За підсумками дослідно-промислових коксувань науково-обґрунтованих складів шихт за участю в них імпортного вугілля, запропоновані два варіанти вугільних шихт, кокси з яких мають найкращі показники якості.
4. Для запобігання великого вмісту пилоподібних фракцій, рекомендовано встановити пристрої для відсівання дрібних класів шихти перед її остаточним подрібненням.
5. Для забезпечення раціонального температурного режиму коксування петрографічно неоднорідних міжбасейнових вугільних шихт КХВ

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» необхідно:

- підвищення рівня температур у контрольних вертикалах на 3-5°C на кожні 10% участі такого вугілля у шихтах;
- систематичний контроль температурного режиму коксування;
- підвищення рівня готовності коксу в головочних зонах камери коксування;
- систематичний контроль повноти завантаження камер, висоти й температури підсводового простору, роботи системи бездимного завантаження шихти.

б. Внаслідок нестабільності марочного й компонентного складу сировинної бази КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» складання раціональних вугільних шихт, із урахуванням умов їхньої підготовки й режимів коксування, необхідно проводити на постійній основі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Suárez-Ruiz, I. and Crelling, J.C. Applied Coal Petrology. The Role of Petrology in Coal Utilization. Elsevier, 2018. Amsterdam, 388 p.
2. Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація: ДСТУ 3472–1996. – [Действующий от 1997–01–01]. – К.: Держстандарт України, 1997. – 22 с. – (Національний стандарт України).
3. Кафтан Ю.С., Дроздник И.Д., Мирошниченко Д.В и др. Развитие научных основ составления угольных шихт из углей разных бассейнов. Углекимический журнал. 2010. № 3-4. С. 25-31.
4. 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.
5. 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.
6. Dash, P.S., Guha, M., Chakraborty, D., Banerjee, P.K. Prediction of coke CSR from coal blend characteristics using various techniques: A comparative evaluation. (2012). Int. J. Coal. Prep. Util., 32, 92–169. doi:10.1080/19392699.2011.640301
7. Grigore, M., Sakurovs, R., French, D., Sahajwalla, V. Properties and CO₂ reactivity of the inert and reactive maceral derived components in cokes. (2012). Int. J. Coal Geol., 98, 1–9. doi:10.1016/j.coal.2012.04.004
8. Lyalyuk, V.P., Kassim, D.A., Shmeltser, E.O., Lyakhova, I.A. Improving the technology of preparing coal for the production of blast - Furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 2. Optimizing the degree of crushing by means of petrographic characteristics of the batch. *Petroleum and coal*. 2019. Vol. 61(1). P.94-99.
9. Miroshnichenko, D., Shmeltser, K., Kormer, M. Factors Affecting the Formation the Carbon Structure of Coke and the Method of Stabilizing Its

- Physical and Mechanical Properties. (2023). *C-Journal of Carbon*, 9(3), 66.
<https://doi.org/10.3390/c9030066>
10. Miroshnichenko, D., Shmeltser, K.O, Kormer, M., Soloviov, Y.; Pyshyev, S., Korchak, B., Shved, M., Prysiaznyi, Y. Electrical Resistance as an Aggregate Characteristic of Coke Properties for Electrochemical and Coke Production. *Electrochem.* 2024. 5(2). P.258–273.
 11. Lyalyuk, V.P., Kassim, D.A., Shmeltser, E.O., Lyakhova, I.A.Improving the technology of preparing coal for the production of blast - Furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 2. Optimizing the degree of crushing by means of petrographic characteristics of the batch components. (2019). *Petroleum and coal*, 61(1), 94-99.
 12. Зеленський О.І. Сучасні напрямки використання неспікливих добавок у виробництві коксу / О.І. Зеленський. *Вуглехімічний журнал*. 2013. № 3. С.21-28.
 13. Wojtaszek M. The use of waste ion exchange resins as components of the coal charge for the production of metallurgical coke / M. Wojtaszek, R. Wasielewski. *Fuel*. 2021. vol.286 (119249). DOI:10.1016/j.fuel.2020.119249.
 14. Choudhury S.B. Solvent-refined coal from high-ash non-coking coals and washery middlings for use in metallurgical coke making Part 1. Production, testing and characterisation // S.B. Choudhury, B.B. Brahmachari, S.R. Dwivedi, A.K. Roy, P.K. Dasgupta, M. Chakraborty, R. Haque. *Fuel Processing Technology*. 1996. vol.4.7 P.203-213. DOI:10.1016/0378-3820(96)01010-7.
 15. Zubkova V. Investigation of influence of the additives of expired paracetamol (PR) and naproxen (NP) on the changes in volume of heated charge of a higher rank coal / V. Zubkova, A. Strojwas, M. Kaniewski, S. Ziomber. *Fuel*. 2018. vol.21(7). P.605–616. DOI:10.1016/j.fuel.2020.117752.

16. Ковальов Є.Т. Теорія та практика виробництва доменного коксу високої якості з трамбованих шихт зниженої спіклivosti / Є.Т. Ковальов, Ю.С. Васильєв, В.М. Кузніченко, В.В. Кривоніс, А.Б. Данилов, М.О. Соловійов. *Вуглехімічний журнал*. 2009. №3-4. С.24-30.
17. Kuymcu, HZ; Sander, S. Stamped and pressed coal cakes for carbonisation in by-product and heat-recovery coke ovens. *Fuel*. 2014. 121:48–56. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.028>.
18. Васильєв Ю.С. Перша промислова коксова батарея з установкою термічної підготовки шихти в Україні як спосіб підвищення ресурсо- та енергоефективності металургійної галузі / Ю.С. Васильєв, А.І. Гордієнко, І.М. Лашенко [та ін.]. *Вуглехімічний журнал*. 2010. №3-4. С.48-52.
19. Гордієнко А.І. Досвід освоєння та експлуатації дослідно-промислової установки термічної підготовки шихти на ВАТ «Ясинівський коксохімічний завод» / А.І. Гордієнко, В.А. Редін, Г.В. Долгарев, В.І. Чаленко, І.М. Вегеря. *Вуглехімічний журнал*. 2008. №5-6. С.22-25.
20. Nomura S. Recent developments in cokemaking technologies in Japan / S. Nomura. *Fuel Processing Technology*. 2017. vol.159. P.1–8. DOI:10.1016/j.fuproc.2017.01.016.
21. Васильєв Ю.С. Про вплив якості коксу отриманого з термічнопідготовлених шихт, які містять слабоспікливе вугілля, на ефективність доменного процесу з використанням ПВП / Ю.С. Васильєв, А.І. Гордієнко, Г.В. Долгарев, Є.А. Юшков, В.М. Дудяк. *Вуглехімічний журнал*. 2008. №5-6. С.38-40.
22. Vega M. F. Influence of the Heating Rate on the Quality of Metallurgical Coke / María F. Vega, Elvira Díaz-Faes, Carmen Barriocanal. *ACS Omega*. 2021. vol.6. P.34615-34623. DOI:10.1021/acsomega.1c05007.
23. State standard of Ukraine 4096-2002 “Brown coal, hard coal, anthracite, combustible shale and coal briquettes. Methods of sample selection and preparation for laboratory tests”

24. ISO 1171-97 “Solid mineral fuels. Methods for determination of ash”
25. ISO 589-81 “Hard coal—Determination of total moisture”
26. ISO 7404-3-84 “Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite—Part 3: Method of determining maceral group composition”
27. ISO 7404-5-85 “Methods for the petrographic analysis of coals—Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite”
28. State standard of Ukraine 7722:2015 “Hard coal. Method of Determining Plastometric Characteristics”
29. ISO-FDIS 13029 Coal – Determination of plastic properties – Constant-torque Gieseler plastometer method. Technical Committee: ISO/TC 27/SC 5 ICS: 73.040, 2017
30. ISO 349:2020 Hard coal — Audibert-Arnu dilatometer test
31. ISO 502:2025 Hard coal — Determination of caking power — Gray-King coke test
32. State standard of Ukraine ISO 579-2002 “Coke-Determination of total moisture”
33. ISO 556-80 “Coke (greater than 20 mm in size)-Determination of mechanical strength”
34. ISO 18894:2006 “Coke-Determination of Coke reactivity index (CRI) and Coke strength after reaction (CSR)”
35. ДСТУ 8831:2019 “Кокс. Метод визначення питомого електричного опору порошку коксу кам'яновугільного”



Звіт подібності

Метадані

Назва організації		підрозділ		
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY		STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY		
Автор		Заголовок	Науковий керівник / Експерт	
161-04д-д		161-04д-д	Шмельцер К.О.	
Кількість слів	Кількість символів	Дата звіту	Дата редагування	ІД документа
9616	75481	1/12/2026	1/12/2026	333089464

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



9616
Кількість слів



75481
Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		19
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		69

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз		Колір тексту
ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://studfile.net/preview/11288028/	327 3.40 %
2	https://dspace.duet.edu.ua/bitstreams/dd60e738-c9d2-41c1-bc34-935220125c96/download	312 3.24 %
3	https://dspace.duet.edu.ua/bitstreams/dd60e738-c9d2-41c1-bc34-935220125c96/download	248 2.58 %

4	Сулова Карина 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	121 1.26 %
5	https://dspace.duet.edu.ua/bitstreams/dd60e738-c9d2-41c1-bc34-935220125c96/download	108 1.12 %
6	Сулова Карина 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	93 0.97 %
7	https://pdfs.semanticscholar.org/ce2d/1d06c5075b6f2ab78b41dba39c05caec09f4.pdf	90 0.94 %
8	Сулова Карина 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	66 0.69 %
9	Сулова Карина 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	53 0.55 %
10	Тесленко Сергій 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	45 0.47 %
з бази даних RefBooks (0.00 %)		
ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
з домашньої бази даних (8.28 %)		
ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	Сулова Карина 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	428 (10) 4.45 %
2	Тесленко Сергій 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	194 (10) 2.02 %
3	Олійник Людмила Михайлівна 6/3/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	140 (11) 1.46 %
4	Карпенко Данило Сергійович 6/3/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	20 (3) 0.21 %
5	Мінкін Олександр Олександрович 6/3/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	14 (1) 0.15 %
з програми обміну базами даних (0.53 %)		

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА

про підготовку здобувача-випускника

Синельникової Олександри Михайлівни

(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 Формування металургійних властивостей
коксу шляхом оптимізації компонентного
складу міжбасейнових петрографічно
неоднорідних шихт

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 консультанта	Примітка
1	Аналітична частина	Шмельцер К.О.				
2	Основна частина	Шмельцер К.О.				
3						
4						

Завідувач кафедри _____
(підпис)

К.О. Шмельцер
(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

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

**ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ
 МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Здобувачки Синельникової Олександри Михайлівні

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-24-м

Тема кваліфікаційної роботи магістра

Формування металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації
 компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних шихт

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	<u>71;</u>
таблиць	<u>29;</u>
схем і рисунків	<u>1;</u>
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	<u>-.</u>

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи магістра

Робота має виражений дослідницький характер і спрямована на вирішення актуальної науково-технічної задачі — формування металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних вугільних шихт.

Використано комплексний науково обґрунтований підхід до формування складу шихт з урахуванням петрографічних та технологічних властивостей вугілля.

Отримані результати підтверджені експериментальними даними промислового коксування, що підвищує їх достовірність і практичну значущість.

Якісні показники металургійного коксу були поліпшені за рахунок додавання до шихти 10% вугілля G. Таким чином, механічна міцність за показником дробимості M_{25} збільшилася на 0,6%, а стирання M_{10} зменшилося на 0,4%. Зафіксовано істотне поліпшення термохімічних властивостей і підвищення впорядкованості структури вуглецю: реактивність CRI знизилася на 3,1%, міцність після реакції CSR збільшилася на 8,3%, а питомий опір знизився на 8,4%.

Недоліки кваліфікаційної магістерської роботи

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

Здобувачка Синельникова А.М. під час написання кваліфікаційної магістерської роботи показала відмінну загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працювала самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та економічно обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної магістерської роботи

Розроблені рішення та рекомендації оптимізації складу виробничих шихт з урахуванням петрографічних характеристик вугільної сировини мають **прикладне значення** та можуть бути використані в умовах вуглепідготовчого цеху КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в умовах зміни джерел постачання вугілля.

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 2026 р.

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

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

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу _____ магістра
(бакалавра, магістра)

Здобувачки _____ Синельникової Олександри Михайлівни
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи
Тема кваліфікаційної роботи _____ магістра <small>(бакалавра, магістра)</small>
Формування металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних шихт
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи _____ магістра <small>(бакалавра, магістра)</small>
Вибір та обґрунтування методу підвищення якості металургійного коксу при бази внесенні добавки відпрацьованої прокатної окалини з метою розширення сировинної коксування
Переваги кваліфікаційної роботи _____ магістра <small>(бакалавра, магістра)</small>
Кваліфікаційна робота дослідницького характеру. Використано комплексний науково обґрунтований підхід до формування складу шихт з урахуванням петрографічних та технологічних властивостей вугілля. Отримані результати підтверджені експериментальними даними промислового коксування, що підвищує їх достовірність і практичну значущість.
Недоліки кваліфікаційної роботи _____ магістра <small>(бакалавра, магістра)</small>
Суттєвих недоліків не виявлено. В деяких місцях пояснювальної записки допущені стилістичні та орфографічні помилки та огріхи, в тексті зустрічається невдалий переклад.
Рекомендації: робота може бути рекомендована до захисту.
Рецензент _____ <small>(прізвище, ім'я та по-батькові)</small>

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання)

_____ (підпис)

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

Текст (вибрати необхідне):

- кваліфікаційної роботи;
 навчальної/наукової праці;
 наукових матеріалів

Формування металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних шихт

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

Синельникова Олександра Михайлівна

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 71 сторінка друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 25,28 %.

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) кафедри Хімічних технологій та інженерії

на засіданні _____
(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від «14» січня 2026 р. протокол № 9.

Керівник підрозділу _____

(підпис)

К. Шмельцер

Дата «14» січня 2026 р.

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

Я, *Синельникова Олександра Михайлівна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська робота (Формування металургійних властивостей коксу шляхом оптимізації компонентного складу міжбасейнових петрографічно неоднорідних шихт) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

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

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

20.01.2026