

**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	заочна

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Ковальчук Дарії Олександрівни

на тему Вивчення можливості збільшення вмісту слабоспікливого вугілля у складах вугільних шихт при використанні технології трамбування

за матеріалами КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

науковий керівник

к.т.н.



Десна Н.А.

(підпис)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 14.01.2025 р. № 8

Завідувач кафедри



(підпис)

к.т.н., доцент

К.О. Шмельцер

ДУЕТ – 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Рівень вищої освіти

магістр

Спеціальність

161 Хімічні технології та інженерія

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Хімічних технологій та інженерії

(підпис)

доцент, к.т.н.

Шмельцер К.О.

(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)

« 15 » січня

2025 року

ЗАВДАННЯ

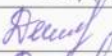



**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ
ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Ковальчук Дарії Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи магістра Вивчення можливості збільшення вмісту слабоспикливого вугілля у складах вугільних шихт при використанні технології трамбування
керівник кваліфікаційної роботи магістра Десна Наталя Анатоліївна, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затвержені наказом вищого навчального закладу №796-ст від «21» листопада 2024 р.
2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 15.01.2025 р.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи магістра Техніко-економічні показники роботи вуглепідготовчого цеху КХВ ПАТ «АМКР»
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 - 4.1 Аналітична частина: Розгляд вимог до якості коксу та технологій, які застосовуються для підвищення якості коксу. Обґрунтування існуючих вимог до складу вугільних шихт та наукові основи до їх складання при застосуванні різних технологій.
 - 4.2 Основна частина: Аналіз сировинної бази коксування коксохімічного виробництва ПАТ «АМКР». Можливості розширення сировинної бази зі збільшенням вмісту вугілля зі зниженими показниками спикливості. Прогнозування якісних характеристик коксу при використанні технології трамбування вугільної шихти перед завантаження в камеру коксування. Охорона праці та навколишнього середовища у вуглепідготовчому цеху, вивчення основних шкідливих та небезпечних чинників у вуглепідготовчому цеху та шляхів щодо зменшення їх впливу
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Завданням графічний матеріал не передбачений

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач



(підпис)

Ковальчук Д.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи



(підпис)

Десна Н.А.

(прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

Ковальчук Д.О. Вивчення можливості збільшення вмісту слабоспівного вугілля у складах вугільних шихт при використанні технології трамбування. – Рукопис.

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

Кваліфікаційна робота присвячена науково обґрунтованому формуванню складу вугільних шихт для коксування з використанням технології трамбування.

В випускній кваліфікаційній роботі магістра досліджено основні технологічні характеристики які необхідно застосовувати для визначення можливості використання вугілля в сировинній базі підприємства з технологією трамбування вугільних шихт.

На підставі аналізу вимог до якості коксу визначені межі за основними показниками якості вугільних шихт для отримання високоякісного коксу та вплив різних факторів на формування механічних і термомеханічних властивостей коксу.

Встановлено, що одним з важливих факторів для міцного трамбованого пирога є твердість вугілля, яку можна визначити за показником розмолоздатності за методом Хардгрова, гранулометричний склад вугільної шихти та кількість класу менше 0,5 мм. Розглянуто можливість використання у вугільній шихті пилу УСГК та УБВК, як опіснюючих присадок які не потребують подрібнення та мають обмежені шляхи до використання.

В кваліфікаційній роботі запропонований обґрунтований склад вугільної шихти для технології трамбування та обрані оптимальні режими підготовки цієї шихти до трамбування і коксування, а саме рішень помелу, вміст пиловидних класів та вміст вологи при таких характеристиках для найміцнішого вугільного пирога.

Ключові слова: трамбування, вугільний концентрат, вугільна шихта, помел, якість коксу, міцність трамбованого пирога, щільність трамбованого пирога.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	8
1.1 Обґрунтування сучасних вимог до якості коксу	8
1.2 Вплив впровадження технології трамбування вугільної шихти на якість отриманого доменного коксу	13
1.3 Принципи формування складів вугільних шихт	25
1.3.1 Основні компоненти вугільних шихт та особливості поведінки їх при коксуванні	26
2. ОСНОВНА ЧАСТИНА	33
2.1 Дослідження впливу складу вугільної шихти на якісні показники коксу	33
2.2 Дослідження доцільності використання коксового пилу у вугільних шихтах для трамбування	49
2.3 Вибір сировинних компонентів і науково-обґрунтоване формування складів вугільних шихт для трамбування	54
2.3.1 Оцінка трамбованості індивідуального вугілля	54
2.3.2 Оцінка показників трамбованості вугілля в бінарних сумішах	64
2.3.3 Оцінка впливу гранулометричного складу вугільної шихти на міцність трамбованого пирога	65
2.3.4 Оцінка впливу вологості шихти на міцність трамбованого пирога	68
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73

ВСТУП

Сучасна світова сировинна база коксування протягом більше 30 років потерпає від браку добре спікливих вугільних компонентів, що вимагає пошуків нових технологій коксування чи вдосконалення вже існуючих з метою отримання високоякісного коксу при невисокій якості шихти. України в цій тенденції не стала винятком, а останні 10 років військових дій на сході посилюють цю проблему.

Також, серйозним поштовхом розробки і впровадження нових технологій стали підвищення вимог до якості коксу. Застосування заміників коксу в доменному виробництві суттєво знизило використання коксу та посилює тиск на кокс з боку інших шихтових матеріалів процесу, що вимагає підвищення якості, як за основними, класичними показниками, вологості, зольності, вмісту сірки, фосфору, так і, за механічними показниками механічної міцності і стиранності та реакційної здатності і післяреакційної міцності коксу.

Пошук технологій які дозволяють збільшити масову частку слабо спікливого вугілля у вугільних шихтах для коксування здебільшого призвів до збільшення частки вугілля газової групи, що пояснюється доступністю та найнижчою ціною на ринку вугілля для коксування, що позитивно відображається на техніко-економічних показниках підприємств.

Технології, які набули найбільшого поширення та промислового застосування для розширення сировинної бази коксування спрямовані, здебільшого, на збільшення насипної маси завантаження вугільної шихти – сушіння, змащування, термічна підготовка, брикетування, трамбування, тощо.

Метою цієї роботи є вивчення можливості розширення сировинної бази коксування за рахунок слабоспікливих чи неспікливих компонентів при застосуванні технології трамбування вугільних шихт.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Обґрунтування сучасних вимог до якості коксу

Кокс використовується практично в усіх переділах металургійного виробництва – при підготовці руд та нерудних матеріалів, виплавлені чавуну та сталі, отриманні прокату. При цьому в собівартості кінцевої металургійної продукції – прокату – більшу частину складають витрати за першим переділом – доменним виробництвом. Це виробництво як паливо використовує в першу чергу кокс, який в доменній печі виконує три головні функції [1]:

- джерело тепла для здійснення хімічних реакцій та фазових перетворень матеріалів доменної шихти;
- відновлювач в хімічних реакціях;
- розпушувач стовпа шихтових матеріалів.

Кокс є найдорожчим компонентом доменної шихти, тому в сучасному доменному виробництві у великих масштабах використовують інші види палива, які надходять в доменну піч разом з нагрітим дуттям або коксом. Протягом ХХ ст. питома витрата коксу на виплавлення чавуну знизилась з 600-800 до 250-300 кг/т чавуну на провідних підприємствах.

Будь-які замітники можуть частково приймати на себе функції відновника та джерела тепла (найперспективнішим з таких є пиловугільне паливо). Кокс як розпушувач замінити нічим, бо він – єдиний компонент доменної шихти, який залишається в твердій фазі на нижніх горизонтах печі в зоні найвищих температур і забезпечує потрібну газопроникність засипу та дренаж рідких продуктів плавлення. При використанні заміників витрата коксу зменшується, і той кокс, що лишився, має бути ефективним розпушувачем в умовах збільшених навантажень, тобто значна частина коксу повинна надходити із збереженням своїх первинних властивостей до нижньої зони доменної печі, де вуглець коксу згорятиме при взаємодії з киснем дуття. Утворений діоксид вуглецю та водяну пару (яка надійшла в складі дуття та утворилася при спалюванні водню, близько

0,5 % якого міститься в органічній масі коксу) рухаються догори та газифікують кокс:



Оксид вуглецю та водень відновлюють залізо з рудних матеріалів. Хімізм цього процесу в спрощеному вигляді можна записати наступними рівняннями:



Таке відновлення є непрямим. Використання газів-відновників ефективніше, ніж пряме відновлення безпосередньо твердо-фазним вуглецем коксу:



Згідно з цим, вимоги до якості коксу при його частковій заміні іншими паливами значно збільшуються. Кокс повинен мати невелику реакційну здатність (не вище 35 % за ДСТУ 4703:2022 [2]), щоб більша його частина доходила до зони фурм. Однак до недавнього часу в Україні показники реакційної здатності металургійного коксу у більшості виробників дорівнювали 40-45 %, що є несумісним з вимогами сучасної доменної технології.

Загальні вимоги до якості коксу доменного, представлені в таблиці 1.1. Такі марки коксу рекомендовано використовувати для доменних печей невеликої продуктивності та без застосування заміників коксу. Присвоєння марки відбувається за результатами відповідності всім зазначеним показникам якості, та на підставі комплексної оцінки властивостей. Показники якості коксу визначаються за діючими нормативними документами з ідентифікацією цих

документів у протоколах випробування та сертифікатах якості. Кожне підприємство має право розробити технічні умови на свою продукцію з визначеним рівнем показників якості продукції, але останні не повинні бути нижчими за загальні вимоги до галузі. Тобто, підприємства які мають можливість і засоби отримувати кокс вищою якості, можуть розробити і використовувати технічні умови на доменний кокс з поліпшеними показниками.

Таблиця 1.1

Якість коксу доменного за ТУ У 322-00190443-114-96

Марка	КД	КД1	КД2	КД3
Клас, мм	25-60	>25	>25	>25
$A^d, \%, \geq$	12	11	12	13
$S^d_t, \%, \geq$	2	2	1.6	1.3
$W^r_t, \%, \leq$	5	5	5	5
$M_{25}, \%, \geq$	86	86	84	82
$M_{10}, \%, \leq$	7.8	7.5	8	9
>80 мм, %, ≤	-	11	15 ¹	20
>60 мм, %, ≥	20	-	-	-
<25 мм, %, ≤	4	3.5	4	4.5
$V^{daf}, \%, \leq$	1.2	1.2	1.2	1.2

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [3]

Наприклад, вимоги до властивостей доменного коксу, що виробляється на підприємствах ТОВ «МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ» [3], наведені в таблиці 1.2. Як бачимо, властивості коксу марки КДМ1, призначеного для використання в доменних печах одночасно з пиловугільним паливом, суттєво вищі, аніж для марки КДМ2, що використовується для виплавки чавуну без пиловугільного палива.

Для досягнення світового рівня виробництва треба працювати в декількох напрямках, зокрема:

- Досягти значного поліпшення якості коксу (в тому числі за показниками реакційної здатності та післяреакційної міцності) є необхідною умовою для скорочення його витрати в доменних печах шляхом заміни іншими видами палива (в першу чергу пиловугільним) [5].

- Розробити науково обґрунтовані фізико-хімічні та технологічні властивості вугільних шихт, які допоможуть досягти необхідного рівня високоякісного коксу.

Таблиця 1.2

**Вимоги до властивостей коксу підвищеної якості (%)
за ТУ У 19.1-0019044-065:2015**

Показники	Чисельні значення для марок		Методи визначення
	КДМ1	КДМ2	
Зольність сухої маси $A^d \leq$	11,4	11,4	ISO 1171
Сірчистість загальна сухої маси, $S^d \leq$	0,8	1,2	ДСТУ 3528
Вологість робоча, $W^r \leq$	5,0	5,0	ДСТУ ISO 573
Механічна міцність: $M_{25} \geq$	88,5	88,0	ISO 556
$M_{10} \leq$	7,2	7,6	
Вміст класів крупності: $> 80 \text{ мм}, \leq$	10	12	ДСТУ 7602 (ISO 723)
$< 25 \text{ мм}, \leq$	3	4	
Реакційна здатність, CRI, \leq	34	40	ДСТУ 4703 (ISO 18834)
Післяреакційна міцність, CRS, \geq	50	43	ДСТУ 4703 (ISO 18834)
Вихід летких речовин з горючої маси V_{daf}, \leq	0,8	0,8	ISO 52

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

- Визначити технологічні параметри підготовки вугільних шихт та режими коксування для стабільного забезпечення якості отриманого коксу на рівні кращих світових зразків [6].

Виконання такого плану дій призведе до практичних результатів, а саме:

Розроблення марочних та компонентних складів вугільних шихт, з використанням імпортного вугілля різних марок і басейнів та комплексом технологічних властивостей, які забезпечують отримання високоякісного коксу на рівні кращих світових зразків для роботи сучасних доменних печей з використанням пиловугільного палива [7]. Це можливо при формуванні раціональної сировинної бази коксування:

- забезпечення потрібних властивостей вугільної шихти, перш за все по зольності, сірчистості, ступеню метаморфізму;
- збільшення глибини збагачення та зменшення зольності вугільних концентратів;
- підвищення ступеня однорідності вугільних шихт за петрографічним складом;
- зменшення кількості концентратів, які використовують для приготування шихти на кожному підприємстві;
- збільшення видобутку малосірчистого вугілля із сприятливим хімічним складом мінеральної частини.

Спрямувати технологічні зусилля на раціоналізацію технології коксування:

- спрямований вплив на фізико-хімічні процеси термічної деструкції та синтезу для отримання коксу з якнайбільшою часткою діляниць анізотропної структури (підвищення ступеня впорядкованості вуглецю коксу);
- зниження швидкостей коксування до рівня не більше 28 мм/годину;
- коригування температурного режиму при змінах умов коксування;
- додаткове витримування коксу в камері коксування з відповідним коригування режиму опалювання.

1.2 Вплив впровадження технології трамбування вугільної шихти на якість отриманого доменного коксу

Як уже зазначалося, одним із рішень розширення сировинної бази коксування і виробництва коксу високого рівня якості є використання відповідних технологій підготовки шихти для підвищення її щільності (сушіння, змащування, часткове брикетування або ущільнення шихти), що підвищує якість виробленого коксу, або дозволяє збільшити частку дешевшого слабкоспікливого вугілля у вугільній шихті зі збереженням якості коксу. Застосування цих методів направлені на насипну масу завантаження, а отже механізм взаємодії часток вугільної шихти між собою, за рахунок чого підвищується якість коксу та підвищують рівень продуктивності виробництва. Технології сушіння, змащування та часткового брикетування можуть бути використані на діючих і працюючих промислових виробництвах – коксових батареях з верхнім завантаженням [8]. Для впровадження технології трамбування необхідно будувати нові батареї або у випадку обмежених інвестиції і браку нових площ виробництва можлива реконструкція вже існуючих зі зміною технології завантаження з верхнього на завантаження з боку трамбованого вугільного пирога.

Щільність мокрого трамбованого пирога, що формується в трамбувальньо-завантажувальній машині (ТЗВМ) по вологості 10% становить в середньому $1,13 \text{ т/м}^3$, або по сухій масі - $1,017 \text{ т/м}^3$. При припиненні трамбування і випуску ущільненого вугільного пирога з трамбувальної камери ТЗВМ (або будь-якої матриці) його лінійні розміри зберігаються. Декомпресія не відбувається. Це пов'язано з тим, що між вологими вугільними зернами існують сили зчеплення, основними з яких є капілярні і механічні (внутрішні сили тертя). Однак при надмірному зволоженні шихти ($> 15\%$), коли вода вже починає частково грати роль мастила, може статися деяка деформація макухи – збільшення в довжину і ширину. При вологості шихти 10% і при середньозваженій уявній щільності вугілля шихтах для трамбування на рівні $1,25\text{-}1,27 \text{ г/см}^3$ обсяг міжзернового

простору (порізності) становить у трамбованому пирізі 19-20 %, тоді як у шихті, що завантажується в піч насипом при тій же вологості, цей показник становить 42-43 % (насипна густина – 0,80-0,81 т/м³). Виявлення особливостей термохімічних перетворень при коксуванні трамбованого вугільного завантаження має ґрунтуватися на сучасних уявленнях про молекулярну структуру вугілля та їх термохімічні перетворення при звичайному – насипному – завантаженні. Згідно з переважаючими поглядами, органічна маса вугілля розглядається як складна гетерогенна суміш високомолекулярних сполук, що складаються з просторово-структурованих (тривимірних) макромолекул. Принципово загальним для макромолекул є те, що вони складаються з подібних за хімічним складом та будовою елементарних структурних одиниць. Останні є двовимірні конденсовані ароматичні сітки (ядерна частина) і валентно пов'язані з ними нафтонові (головним чином, гідроароматичні), гетероциклічні та аліфатичні групи атомів, розташовані в периферійній частині. Тобто. органічні речовини вугілля відносяться до типу гетерополіконденсатних сполук. Якщо конденсовані вуглецеві сітки є регулярною частиною будови макромолекули, то ланцюжки периферійних груп - нерегулярна її частина [9-13]. Нагрів вугілля без доступу повітря призводить до розриву хімічних зв'язків на периферії ядерної частини структурних одиниць, у результаті вони стають дуже активними самостійними молекулярно-кінетическими одиницями – вільними радикалами. Останні з'єднуються один з одним або відбувається внутрішньорадикальний перерозподіл зв'язків – внутрішньомолекулярне диспропорціювання. Саме тому при нагріванні таких високомолекулярних сполук, як вугілля, паралельно протікають реакції деструкції макромолекул, і реакції синтезу, тобто. відбувається деструктивна поліконденсація. Особлива роль при цьому відводиться водню, що входить до складу функціональних груп, особливо аліфатичних та гідроароматичних. Під впливом теплової енергії атоми водню у цих групах щодо легко відщеплюються, перетворюючись на енергетично активний атомарний водень. Завдяки високій активності, такий водень легко заміщає вільні зв'язки фрагментів вугілля, що деструктуються макромолекул.

нейтральні молекули, що утворюються з цих фрагментів, при подальшому підвищенні температури знову піддаються деструкції, утворюючи вільні радикали. Останні знову можуть бути стабілізовані активним воднем і, таким чином, розкладання йтиме в бік утворення більш низькомолекулярних сполук (за механізмом відновлювальної деполімеризації) аж до переходу вугілля, що спікається, в пластичний стан [14, 15]. На підставі накопичених знань про пластичний стан вугілля і коксоутворення, М.Г. Скляр характеризує вугільну пластичну масу як складну гетерогенну систему, що складається з твердих, рідких і парогазових продуктів, що безперервно утворюються при нагріванні вугілля, що спікається без доступу повітря і вступають між собою у взаємодію в інтервалі температур 300-550 °С. Ця взаємодія дуже складна і включає фізичну, фізико-хімічну і хімічну взаємодію твердої фази з рідкою і газоподібною [16]. Основні особливості трамбованого вугільного завантаження порівняно із звичайним (насипним) полягають у наступному:

– в одиниці обсягу завантаження більша частка обсягу зайнята вугільною речовиною за рахунок зменшення міжзернового простору (порізності), при цьому з підвищенням насипної щільності вугільної завантаження відношення об'єму вугільного речовини в ній до об'єму порізності збільшується параболічної кривої (рис. 1);

- більша площа та кількість контактів між вугільними зернами;
- напруженість зерен (тиск одного на інше) у вологому трамбованому вугільному завантаженні, що має місце внаслідок дії сил внутрішнього тертя [17];
- більша теплопровідність і менша температуропровідність [18].

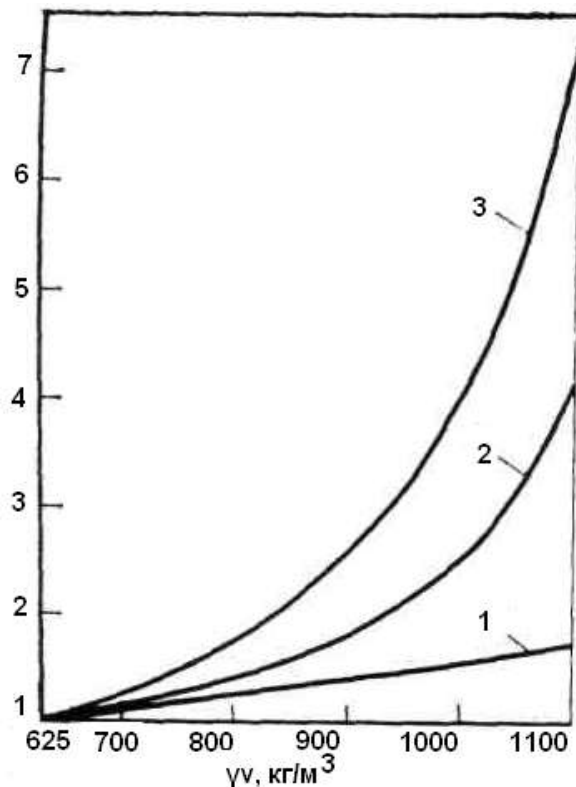


Рис. 1.1. Зміна відношення об'ємів, що займаються вугільними зернами у вугільному завантаженні при її ущільненні:

1 – відношення об'єму вугільних зерен при i -тій насипній щільності V_{yi} до вихідного їх об'єму - при $\gamma_v = 625 \text{ кг/м}^3$; 2 – відношення об'єму вихідної порізності вугільної завантаження (при $\gamma_v = 625 \text{ кг/м}^3$) до об'єму порізності при i -тієї насипної щільності V_{ni} ; 3 – відношення об'єму вугільних зерен V_{yi} до об'єму порізності V_{ni} .

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [20]

Дані особливості фізичного стану трамбованого вугільного завантаження зумовлюють особливості процесу коксування. Ущільнення вугільного завантаження призводить до підвищення внутрішньопластичного газового тиску. Так, при коксуванні трамбованого завантаження різного вугілля внутрішньопластичний газовий тиск підвищувався, причому, різною мірою. Якщо у вугілля, що добре спікається, марок Ж і К воно підвищувалося відповідно в 1,3 і 1,8 рази, то у вугілля марок Г і ПС - приблизно 5 разів [19].

Відомо, що підвищений газовий тиск, прикладений у процесі коксування, позитивно позначається під час термохімічних перетворень. Так, при

напівкоксуванні слабоспівливого вугілля при підвищеному тиску власних летких речовин виходив напівкокс, що добре спікся, тоді як при атмосферному тиску виходив порошкоподібний продукт. При цьому виходи твердого залишку та газу збільшувалися, а смоли та пірогенетичної води знижувалися [20].

Незважаючи на те, що технологія трамбування вугільної шихти для коксування використовуються вже давно, чітких залежностей підвищення показників якості в промислових умовах не існує. За механічними властивостями показник M_{10} коксу покращується з ущільненням вугільної шихти, а за показником $M_{40(25)}$ багато суперечливої інформації, в деяких джерелах показано, що трамбування вугільної шихти покращує якість коксу, а в деяких не покращує або може навіть погіршити якість [8].

За сучасними показниками реакційної здатності коксу і післяреакційної міцності, які останніми роками мають високий попит, у літературі є лише декілька статей, які безпосередньо стосуються впливу насипної щільності на параметри *CRI* та *CSR*. Дослідники, аналізуючи вплив щільності заряду в діапазоні 725–840 кг/м³ сухої шихти на якість коксу, виявили, що збільшення щільності призводить до покращення індексу *CSR* та зниження індексу *CRI*. За даними [9], використання технології трамбування призводить до покращення індексу *CSR* приблизно на 2–8 % та *CRI* на 3–7 % по відношенню до коксу з гравітаційної системи завантаження. Дослідження, що проводили в Австралії на *Ilwara Coke Company (ICC)* виявили незначне покращення *CRI* та *CSR* при збільшенні щільності вугільної шихти з 1120 до 1150 кг/м³, у порівнянні з коксом, отриманим із гравітаційної шихти, кокс, отриманий із трамбованої шихти, характеризувався дещо вищим значенням індексу *CSR* та аналогічним значенням індексу *CRI*. Вплив щільності вугільної шихти на якість коксу під час промислових випробувань також оцінювали на двопродуктовому коксохімічному заводі *Sesa Kembla* в Індії. Кокс, отриманий із ущільненої вугільної шихти, характеризувався подібним значенням показників *NSC*, як і у випадку гравітаційної системи, дослідження проводили в пілотній печі з використанням промислової шихти для шихти з щільністю 926 і 996 кг/м³. Встановлено, що

збільшення щільності в досліджуваному діапазоні позитивно вплинуло на індекс *CSR*, який збільшився з 57,5 до 62,9 %.

Для глибшого вивчення процесу коксування трамбованих шихт було проведено дослідження в адіабатичному калориметрі, наважка шихти (вугілля) у якому становить 10 кг. Конструкція калориметра та методика визначення питомої теплоти коксування описані у публікаціях [21, 22]. Для вивчення виходу продуктів коксування до реактора калориметра була приєднана вловлююча апаратура. Дослідженням піддавали шихти вар.1 та вар. 2.

Досліджувані шихти, містять 47% газового вугілля (вар. 1) та 60% цього вугілля (вар. 2). Вихід летких речовин V^{daf} та товщина пластичного шару у цих шихт становили відповідно 28,9 %; 14 мм та 30,5 %; 13 мм. Насипну щільність шихт змінювали від 750 до 1050 кг/м³ з кроком 50 кг/м³. Вологість шихт становила 7,0 %, помел – 80,0 % вмісту класу < 3 мм. Високі значення густини (≥ 900 кг/м³) досягалися шляхом трамбування. Кінцева температура коксування у центрі вугільної завантаження становила 970 °С, температура стінки реактора 1000 °С. Встановлено, що питома теплота коксування шихт після насипної щільності 900 кг/м³ починає знижуватися і досягнення щільності 1050 кг/м³ її зниження для зазначених шихт становило $\sim 6,0$ %. При цьому спостерігалася тенденція значного зниження теплоти коксування зі збільшенням вмісту газового вугілля в шихті. Щільність теплового потоку від стінки реактора, що гріє, у вугільне завантаження розраховували за формулою:

$$\Phi = \frac{Q}{S \cdot P_k} \quad (1.1)$$

де Q - кількість тепла, витрачене на коксування вугільної завантаження, кДж; S - поверхня реактора, що обігривається, м²; P_k – тривалість коксування, с.

Для шихти вар. 1 (47 % марки Г) при щільності 750, 900 і 1050 кг/м³ щільність теплового потоку склала відповідно 7,48, 7,67 та 7,73 кВт/м², а для вар. 2 – 7,62, 7,81 та 7,85 кВт/м². Тобто, зі збільшенням насипної щільності шихти і

вмісту газового вугілля в шихті від'єм тепла від стінки, що гріє, в одиницю часу підвищується.

При вивченні впливу насипної щільності завантаження вихід продуктів коксування в калориметрі температуру стінки реактора задавали 800 °С, а кінцеву температуру в центрі завантаження – 770 °С. У цьому температурі «підсклипінного» простору наприкінці досліду вбирається у 650 °С. Таким чином, леткі продукти коксування були мінімально піролізовані. Для досліджень використовували шихту вар. 1. Отримані дані представлені у табл. 1.3.

Помітне підвищення виходу коксу та зниження виходу кам'яновугільної смоли відбувається після досягнення насипної густини 950 кг/м³. При цьому простежується тенденція збільшення виходу коксового газу та зниження – пірогенетичної води. Виходи інших продуктів коксування не залежать від насипної густини завантаження.

Якість коксу, отриманого за різної насипної щільності шихти вар. 2 та при зазначеному температурному режимі представлено в табл. 1.4.

Таблиця 1.3

Результати визначення виходу продуктів коксування в калориметрі

Насипна маса шихти, кг/м ³	Вихід продуктів коксування, %						
	Кокс	Смола	Коксовий газ	Сирий бензол	NH ₃	CO ₂ +H ₂ S	Пірогенетична волога
750	76,54	5,59	11,68	0,84	0,14	0,80	4,41
800	76,60	5,53	11,72	0,86	0,16	0,78	4,35
850	76,55	5,55	11,84	0,87	0,15	0,81	4,23
900	76,66	5,60	11,76	0,83	0,16	0,79	4,20
950	76,72	5,24	11,95	0,90	0,14	0,77	4,28
1000	76,80	5,15	11,94	0,84	0,17	0,80	4,30
1050	76,90	4,98	12,02	0,88	0,15	0,83	4,24

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [20]

Таблиця 1.4

Характеристика коксу, отриманого при коксування шихти в калориметрі

Показник	Насипна маса шихти, кг/м ³						
	750	800	850	900	950	1000	1050
Час коксування, хв.	180	191	200	209	217	225	235
Середня питома теплоємність коксу, кДж/кг·К	1,692	1,679	1,675	1,679	1,662	1,650	1,633
Абразивна твердість по УХІН, мг	64	66	70	74	80	85	88
Питомий електроопір, Ом·см	0,262	0,257	0,253	0,248	0,239	0,226	0,214
Пористість, %	48,0	47,6	47,0	46,5	45,7	44,9	44,3
Вихід летких речовин, %	5,34	5,33	5,27	5,20	5,17	5,08	5,05

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [20]

Середню питому теплоємність коксу визначали шляхом нагрівання в калориметрі охолодженого коксу. Дані таблиці 1.4 показують, що середня питома теплоємність коксу та питомий електроопір, тобто, показники, що характеризують завершеність молекулярної структури коксу, зі збільшенням насипної густини завантаження починають помітно знижуватися після досягнення густини 950 кг/м³.

Абразивна твердість з ущільненням вугільного завантаження практично прямолінійно підвищується у всьому дослідженому діапазоні щільностей. Вивчення впливу насипної щільності вугільного завантаження на пластичний стан проводили в апараті торзійного типу конструкції Н.Р. Кушнірєвича [21].

Ущільнення випробуваної навішування вугілля здійснювали шляхом збільшення навантаження верхній диск приладу. Зазвичай застосовується показник «зусилля деформації» F. Дослідниками було застосовано комплексний

показник – середньодинамічний зусилля деформації $F_{срд.}$, що враховує динаміку зміни в'язкості у відповідному температурному інтервалі пластичності. Значення $T \cdot F_{срд}$ при тиску 15 і 100 кПа визначали як відношення площі S_{15} або S_{100} , обмеженою ділянкою кривої динаміки в'язкості, відтятою абсцисою, проведеної через точку початку розм'якшення вугілля (а) при тиску 15 кПа і відповідними ординатами (Рис. 1.2).

З рисунка 1.2 видно, що мінімальна в'язкість вугілля при більшому механічному навантаженні навіть трохи менше, ніж при меншому навантаженні. Температурний інтервал пластичності зі збільшенням механічного навантаження розширюється, причому лише за рахунок збільшення температури затвердіння. При навантаженні 15 кПа $F_{срд}$ становить 16,7 кПа, а за 100 кПа – 12,8 кПа. Температурний інтервал пластичності становить відповідно 41 та 58 °С.

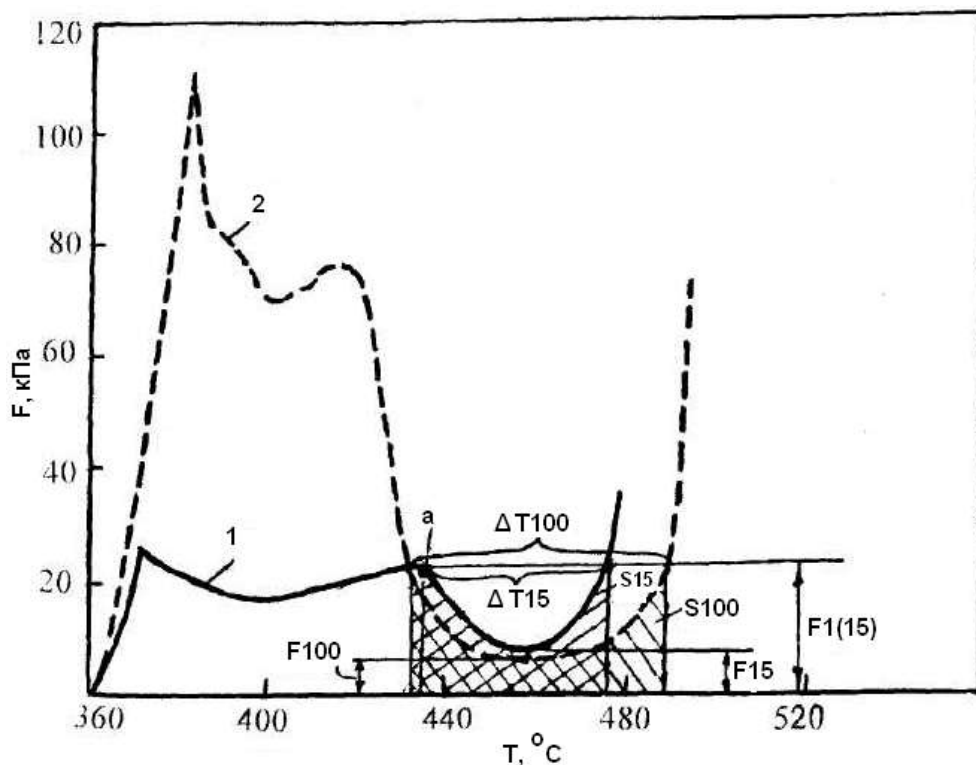


Рис. 1.2. Динаміка пластичного стану газового вугілля при різному механічному навантаженні P на випробувану навішування 1 – $P = 15$ кПа; 2 – $P = 100$ кПа

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [20]

Таким чином, виходячи з вищевикладеного, особливості термохімічних перетворень при коксуванні трамбованого вугільного завантаження включаються в наступному. Утруднення виходу парогазових продуктів із пластичного шару, що призводить до підвищення в ньому газового тиску, призводить до інтенсифікації реакцій відновлювальної деполімеризації. В результаті цього утворюється більша кількість рідкоплавких продуктів, що беруть участь у спіканні вугілля. Це, поряд із збільшенням у пластичному шарі трамбованого завантаження поверхні та тісноти контакту між твердими та рідкими фрагментами макромолекул, призводить до більш повної їх взаємодії та утворення більш міцного твердого залишку – напівкоксу та коксу. Крім того, при підвищеному газовому тиску в реакцію більшою мірою залучаються парогазові продукти (найбільш висококиплячі), що сприяють утворенню додаткової кількості рідкоплавких речовин.

Для детального вивчення зміни виходу коксу та встановлення, який із факторів є визначальним, було проведено коксування у широких (ширина 380 мм) та вузьких (44 мм) ретортах. Реторти із шихтою вар. 1 розташовували по осі камери коксування, а потім завантажували камеру такою ж шихтою. Щоб шихта, що завантажується в камеру, не потрапила в реторту, вона була забезпечена спеціальною кришкою, що забезпечує вільний вихід з неї летких продуктів. Такий підхід дозволив визначити вихід коксу в залежності тільки від величини газового тиску, так як вплив відкладень піровуглецю на вихід коксу в цьому випадку виключалося або принаймні максимально обмежувалося. Отримані дані подано на рис. 1.3.

З рисунка видно, що криві виходу коксу, отриманого в широких і вузьких ретортах, залежно від щільності насипної шихти також мають параболічну форму. Вони практично паралельні, різниця між виходом коксу в широких і вузьких ретортах, обумовлена піролізом на поверхні коксу парогазоподібних продуктів коксування, становить 0,36-0,33%.

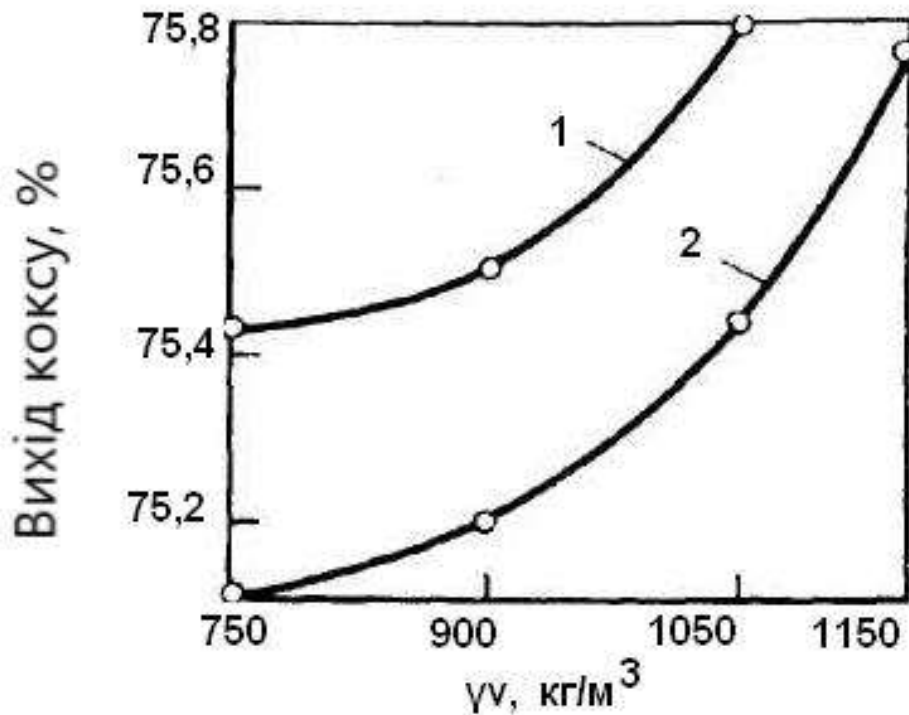


Рис. 1.3. Вплив насипної щільності γ_v на вихід валового коксу в широких (1) та вузьких (2) ретортах

Примітка. Джерело: розроблено за допомогою [20]

Це вказує на те, що вихід валового коксу при підвищенні щільності насипу завантаження збільшується за рахунок збільшення газового тиску в пластичному шарі.

Кокс, отриманий у широких та вузьких ретортах із шихт вар. 1 та вар. 2, а також з газового вугілля при різній насипній щільності, випробовували в малому колосниковому барабані УХІН після двох скидань валового коксу на металеву плиту з висоти 1,8 м. Випробовували кокс класу крупності > 25 мм. Міцність коксу оцінювали після виходу класу < 1 мм. Дані випробувань подано на рис. 1.4.

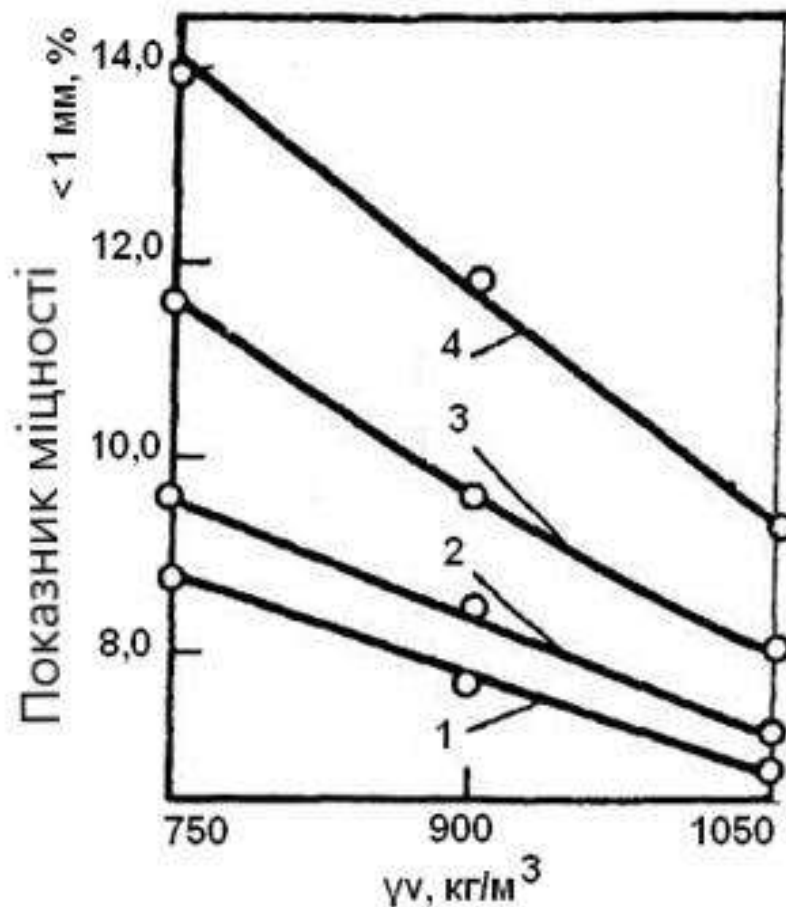


Рис. 1.4 Вплив насипної щільності вугільної завантаження γ_v на міцність коксу, отриманого в широких та вузьких ретортах 1, 2 - шихта відповідно, вар. 3,4 – відповідно, шихта вар. 1 та газове вугілля, вузькі реторти

Примітка. Джерело: розроблено за допомогою [20]

З рисунка 1.4 видно, що зі збільшенням насипної щільності шихт міцність коксу суттєво зменшується, причому ця залежність має прямо-лінійний характер. Вища міцність коксу, отриманого у вузьких ретортах, пояснюється лише тим, що він становить лише осову, тобто. найменш міцну частину коксу. Трамбування більш ефективно у застосуванні до газових вугілля та до шихт з високим їх вмістом.

Інтенсифікація реакцій конденсації (що протікають з виділенням тепла) підтверджується підвищенням виходу коксу від маси шихти, зниженням питомої

теплоти коксування, зниженням середньодинамічної в'язкості пластичної маси, утворенням коксу більш завершеної молекулярної структури (судячи з показників абразивної твердості та середньої питомої). Оскільки ці особливості виявляються при щільності трамбованого завантаження $> 900 \text{ кг/м}^3$, то поліпшення спікаємості шихт при ущільненні області $750\text{-}900 \text{ кг/м}^3$ слід віднести переважно на рахунок збільшення в одиниці обсягу завантаження вугільного речовини як наслідок, – збільшення поверхні і щільності контакту між твердими і рідкими продуктами розкладання органічної маси вугілля. Прямолінійна залежність міцності коксу від насипної щільності вугільного завантаження зберігається у всьому діапазоні від насипного завантаження до трамбованої. Це вказує на те, що ефект від підвищення поверхні та тісноти контакту між продуктами розкладання після досягнення густини понад 900 кг/м^3 слабшає, але посилюється ефект від зміни хімізму реакцій, що протікають у пластичному стані вугілля, у бік інтенсифікації реакцій відновлювальної деполімеризації. Не пропорційне, а менше збільшення тривалості коксування трамбованого вугільного завантаження в порівнянні з насипним завантаженням пов'язане не тільки з підвищенням її теплопровідності, але і зниженням питомої теплоти коксування та утворенням коксу з меншою питомою теплоємністю.

1.3 Принципи формування складів вугільних шихт

Сучасні уявлення про склад і властивості вугілля та процеси їх перетворення при коксуванні дозволяють сформулювати деякі загальні положення щодо складання вугільних шихт для виробництва коксу доменного:

– при підборі складу шихт для коксування в першу чергу необхідно враховувати вимоги, що пред'являються до якості коксу споживачем (ту, контрактні умови, та ін.) та вплив якості коксу, що використовується на доменний цех

– вимоги, що пред'являються споживачами до якісних параметрів коксу (зольність, вміст сірки, механічна міцність, реакційна здатність та післяреакційна

міцність та ін.), повинні забезпечуватися відповідним марочним та компонентним складом вугільної шихти.

– склад вугільної шихти повинен підбиратися за технологічними властивостями та особливостями (наприклад, величина тиску розпирання, кінцева усадка та ін.), з урахуванням ролі кожного компонента в шихті та його поведінки в суміші при коксуванні.

– для забезпечення стабільної роботи та рівномірної якості коксу необхідно підтримувати нормативний запас вугілля, правильну організацію їх зберігання, відповідні прийоми усереднення та підготовки до коксування [23-24].

1.3.1 Основні компоненти вугільних шихт та особливості поведінки їх при коксуванні

Газове вугілля, присутність в шихті, знижують тиск розпирання і забезпечують усадку і легку видачу коксового пирога з камер коксування, мають високий хімічний потенціал. При самостійному коксуванні утворюють порівняно дрібний кокс із відносно невисокою механічною міцністю. Кокс з газового вугілля має високу реакційну здатність, що негативно позначається на реакційній здатності і післяреакційної («гарячої») міцності коксу.

Жирне вугілля є важливим компонентом сучасних шихт процесу шарового коксування і забезпечує отримання добре проплавленого коксу з високою механічною міцністю. Основна маса жирного вугілля, що надходять на коксування, при самостійному коксуванні утворює добре проплавлений малостираний кокс невисокої міцності. Деяке жирне вугілля з товщиною пластичного шару більше 30 мм має дуже рідкорухливу пластичну масу в період пластичності і за значної участі в шихті розвивають у коксі підвищену тріщинуватість. Жирне вугілля невисокої спекливості ($y = 17 - 19$ мм) практично приймає опіснюючі компоненти, які у шихті мають приблизно такі ж якість коксу, як газове вугілля з аналогічною спіканням.

Коксове вугілля забезпечує у шихті найбільш впорядковану структуру, високу міцність і однорідну кускуватість коксу, якщо жирне вугілля з товщиною пластичного шару 18 – 22 мм здатне приймати 50-60% пісневатих компонентів, то коксове вугілля з товщиною пластичного шару 18-22 мм можуть приймати всього 10-15% таких добавок. Деяке коксове вугілля (ЗФ Свято – Варваринська) може розвивати при коксуванні високий тиск розпирання.

Піснувате спікливе вугілля є опіснюючим компонентом шихти, що знижує тріщинуватість коксу, яка розвивається жирним вугіллям.

На підставі результатів досліджень, а також промислової практики коксохімічних заводів встановлено певний зв'язок між виходом летких речовин, товщиною пластичного шару та показниками механічної міцності коксу:

- при одній і тій же товщині пластичного шару в звичайних умовах коксування, як правило, утворюється тим більше міцний і крупнокусковий кокс, чим менше вихід летких речовин;

- при одному і тому ж рівні виходу летких речовин зі збільшенням пластичного шару підвищується спікаємість вугілля і здатність їх приймати присадки, що опіснюють, зі зростанням або без зниження характеристик міцності одержуваного коксу;

- при однаковій товщині пластичного шару здатність петрографічно однорідного вугілля приймати опіснюючі присадки підвищується з збільшенням виходу з них летких речовин;

- при додаванні до жирного вугілля, що добре спекаються, опіснюючих компонентів, як правило, виходить кокс тим більш міцний, чим нижче вихід летких речовин з доданого вугілля при одній і тій самій їх спікливості.

Сучасні багатокомпонентні шихти, що включають велику кількість вугілля різних родовищ, є складними системами, що вимагають обліку певного впливу того чи іншого вугілля та технологічного фактору на процес коксування та якість коксу. У цих умовах шихту для коксування слід розглядати як двокомпонентну суміш, що складається з спікливої та опіснюючої частини. До спікливої частини слід відносити вугілля переважно середньої частини стадії метаморфізму, а саме

марок Ж, К (ДСТУ 3472:2015). До опіснюючої - малометаморфізоване вугілля марок ДГ, Г, ГЖО, ГЖ, і високометаморфізоване - ПС. При цьому небажано в шихтах для шарового коксування одночасно використовувати велику кількість добавок, що опіснюють низької і високої стадій метаморфізму.

Практика роботи коксохімічних виробництв ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ» показує, що для отримання коксу з показниками механічної міцності $M_{25} = 87,0 - 89,0 \%$ та $M_{10} = 7,0 - 7,5 \%$, зольністю $A^d \leq 11,4 \%$, вмістом сірки $S_t^d \leq 0,80 \%$ необхідно забезпечити такі параметри якості шихти: $A^d \leq 8,4 \%$, $S_t^d \leq 1,00 \%$, спікливість $y = 15,5 - 18,0 \text{ мм}$, $V^{daf} \leq 29,0 - 32,0 \%$ [23-24].

При цьому слід мати на увазі, що збільшення зольності шихти призводить до підвищення стирання коксу; зниження спікливості призводить до погіршення показників механічної міцності, підвищення тріщинуватості і зниження, у зв'язку з цим, виходу металургійного коксу; підвищення спікливості призводить до ожирнення шихти, а, отже, також до підвищення тріщинуватості коксу та зниження виходу коксу доменного.

Зниження виходу летких речовин із шихти може призвести до підвищення тиску розпирання, тугого ходу при видачі коксового пирога з камери коксування і навіть «буріння». Підвищення виходу летких речовин супроводжується зниженням виходу валового коксу, зменшенням його крупності та погіршенням показників міцності.

Щоб забезпечити вимоги до якості вугільної шихти, та виконати вимоги до її технологічності використовується низка обмежень моделі вугільної шихти. Їх порушення може призвести до неконтрольованого погіршення якості коксу, а порушення принципів технологічності може спричинити нестабільність процесу ведення виробництва та призвести до аварійних наслідків таких як буріння, руйнування кладки печей та інше. Дані обмеження розроблялися в умовах ресурсної бази, характерної для вугільних шихт України за останні п'ять років. Тому при оновленні бази вугілля та появі нових вугільних ресурсів до обмежень можуть вноситись зміни, якщо така необхідність буде підтверджена [24].

Також зміна обмежень може відбуватися у таких випадках:

– у разі обґрунтування економічної доцільності. актив спрямовує обґрунтування необхідності зміни обмеження щодо розрахунку ефективності виконуваних змін, якщо початкові гіпотези підтверджуються, то в подальшому при розрахунку вугільних шихт повинні використовуватися нові обмеження.

– у разі зміни ключових показників роботи обладнання через зміну його стану та інших причин з метою забезпечення безперебійної та безпечної роботи.

– у разі дефіциту необхідних вугільних ресурсів задля збереження обсягів виробництва, якщо доступні вугільні ресурси не дозволяють сформувати вугільну шихту, у разі відсутності серйозних ризиків для якості продукції, що випускається.

– окремий порядок встановлюється зміну тиску розпирання вугільної шихти. цей показник може періодично змінюватися через зміни амперажу видачі коксових печей, у цьому випадку статистика амперажу видачі повинна вестися і аналізуватися, для вчасного реагування на ситуацію.

Обмеження для вугільних шихт представлені у таблиці 1.5.

Такі обмеження допомагають сформувати науково-обґрунтований склад вугільної шихти, для використання у технології шарового коксування з гравітаційним завантаженням, з метою отримання високоякісного коксу.

З огляду на викладене вище, шихта, що застосовуються для коксування з технологією трамбування, повинне характеризуватися невисоким індексом основності, достатнім рівнем спікливості і необхідною трамбуемістю для досягнення стійкості пирога при завантаженні його в камеру коксування.

Таким чином, при розгляді питання впровадження технології коксування трамбованої шихти на тому чи іншому коксохімічному виробництві, необхідна і попереднє узгодження ув'язка оптимальної (доступної) сировинної бази з плануванням основних конструкційних параметрів коксової печі (наприклад – з висотою коксової камери), що в комплексі дозволить забезпечити на основі переважно слабкоспікливих марок вугілля отримання кам'яновугільного коксу з характеристиками, максимально близькими до вимог провідних світових виробників чавуну [25].

Таблиця 1.5

Обмеження складу і якісних характеристик вугільних шихт при їх складанні

Найменування показника	Позначення, одиниці виміру	Інтервал значень
Зольність	$A^d, \%, \leq$	У відповідності до ТУ
Вміст сірки	$S_t^d, \%, \leq$	У відповідності до ТУ
Вихід летких речовин	$V^{daf}, \%, \geq$	28-32
Товщина пластичного шару	$y, \text{мм}, \geq$	15 - 18
Середній довільний показник відбиття вітриніту	$R_o, \%, \geq$	1,00 – 1,15
Вміст вітриніту,	V_t, \geq	80
Індекс основності	Ио, од.	2,50
Тиск розпирання	$R_n, \text{кПа}, \leq$	7
Вміст окремих марок вугілля	K, \geq	25
	$Ж, \geq$	25
	$\Gamma \leq$	22
	Γ, \geq	28-32
	$K+Ж, \geq$	60

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [23-24]

Основи вимог до шихти, призначеної для технології трамбування, зокрема й з урахуванням вітчизняної специфіки, сформульовані вже досить давно на підставі теоретичних уявлень і виробничого досвіду. Так, практика освоєння даної технології на Алчевському КХЗ показала, що спіклівість шихт для трамбування, яка забезпечує виробництво кондиційного доменного коксу ($M_{25} \geq 86,0 \%$; $M_{10} \leq 8,0 \%$) за показником товщини пластичного шару (y) знаходиться в широкому діапазоні: 10-20 мм. При цьому марочні склади (%) крайніх за

спікливістю шихт відповідно наступні: Г – 65, Ж – 10, ПС – 12, Т – 13 і Г – 40, Ж – 45, ПС – 9, Т – 6 [20]. Шихту батарей №№ 5-6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», призначену для технології трамбування, також характеризує підвищена участь у ній описуючих компонентів різних стадій метаморфізму, наприклад: малометаморфізованого газового вугілля – 55-57 %; високометаморфізованого – КО + КС + СС – 24,8 % [25].

Тому як приклад оцінки умов застосовності технології коксування трамбованої шихти в якості вихідних компонентів були обрані вугільні концентрати, марочна належність і деякі характеристики яких наведені в табл. 1.6.

На підставі виробничих показників українських підприємств, що використовують технологію трамбування вугільної шихти [26], приймаються наступні первинні обмеження для складання кам'яновугільних шихт:

- для отримання коксу з зольністю не вище ніж 13 % зольність вихідної шихти повинна не перевищувати 9-10 %;
- товщина пластичного шару шихти, що містить обмежену кількість добре спікливих марок вугілля (див. табл. 1.6), становить ≤ 15 мм;

Таблиця 1.6

Основні технологічні властивості вугільних концентратів

№	Марка	Технічний аналіз, %		Товщина пластичного шару, мм	Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Вміст вітриніту, %
		A ^d	V ^{daf}			
1	ГЖ	7-10	36-39	18-23	0,70-0,84	84-90
2	ГЖ+Ж	7-8	33-36	19-21	0,85-0,89	80-90
3	Ж	8-9	32-35	23-26	0,90-0,99	80-90
4	КП	10-12	21-24	8-12	1,02-1,07	50-60
5	КС	8-11	16-27	6-9	0,98-1,65	40-50
6	ПС	9-10	20-23	11-13	1,30-1,45	60-70

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [23-24]

- тиск розпирання вихідних компонентів і їх вміст у планованій шихті має забезпечувати в ній величину цього показника не вище критичного значення 7 кПа, перевищення котрого створює небезпеку руйнування вогнетривкої кладки. Тиск розпирання індивідуальних марок вугілля і складених з них шихт визначається за методом, розробленим у ДП «УХІН».

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Дослідження впливу складу вугільної шихти на якісні показники коксу

З метою вивчення впливу марочного складу шихт для трембування на міцність коксу після реакції було проведено коксування в лабораторній 5-кг печі за матрицею планування двофакторного експерименту. Матриця планування та рівні варіювання факторів впливу для дослідних трембованих шихт мали такі значення (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Матриця планованого експерименту

Шихта	Кодування значень факторів		Вміст газового вугілля в шихті	Вміст пісного вугілля в шихті
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	+	-	60	0
2	-	+	40	10
3	+	+	60	10
4	-	-	40	0
5	0	0	50	5

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Як видно з таблиці 2.1, для експерименту заплановано 5 варіантів вугільних шихт з різним вмістом опіснюючих компонентів. В ролі опіснюючих компонентів вугільної шихти виступає вугілля низької стадії метаморфізму - марки Г, та вугілля високої стадії метаморфізму марок ПС, СС, П. Це дає можливість оцінити вплив зниження спікливості вугільних шихт на механічні властивості коксу в однакових лабораторних умовах коксування, не враховуючи теплопровідність і теплоємність шихт з підвищеним вмістом вугілля газової групи.

Характеристика компонентів вугільних шихт представлена в таблиці 2.2 – 2.4.

Таблиця 2.2

Якісна характеристика компонентів вугільних шихт

Марка вугілля, ЗФ, розріз, шахта	Технічний аналіз, %				у, мм / RI, ед.
	A ^d	S ^d _t	V ^d	V ^{daf}	
Г, Комсомольська / Добропільська 1:1	7,8	1,75	35,6	38,8	12
Ж, Самсонівська / Дуванська 1:1	9,0	3,37	31,3	34,4	30
ПС, Узловська	8,4	2,33	14,8	16,2	6
СС, розріз Чернігівець	8,1	0,37	22,4	24,4	5/16
П, шахта «Світанок»	7,5	1,28	8,2	8,9	0

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Таблиця 2.3

Петрографічні характеристики компонентів вугільних шихт

Марка вугілля, ЗФ, розріз, шахта	Петрографічний склад, %					Показник відбиття вітриніту, R _o , %	Стадії метаморфізму вітриніту (%) і марка вугілля, що умовно відповідає цим стадіям					
	V _t	S _v	I	L	Σ ОК		0,50-0,64 ДГ	0,65-0,89 Г	0,90-1,19 Ж	1,20-1,39 К	1,40-1,69 ПС	1,70-2,20 Т
Г, Комсомольська / Добропільська 1:1	73	1	17	9	18	0,77	13	76	11	-	-	-
Ж, Самсонівська / Дуванська 1:1	81	1	14	4	15	0,88	-	53	47	-	-	-
ПС, Узловська	92	1	7	-	8	1,60	-	-	3	22	42	33
СС, розріз Чернігівець	25	4	69	2	72	1,02	-	18	64	18	-	-
П, шахта «Світанок»	95	1	4	-	5	2,15	-	-	-	-	-	100

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

З представлених таблиць 2.2 і 2.3 видно, що вугілля обране для дослідних шихт за характеристиками якості типові представники марок. Тобто, вугільні концентрати марки Г Комсомольська і Добропільська характеризуються найвищим значенням виходу летких речовин 38,8 %, невисокою зольністю 7,8 %, характерним для західного Донбас вмістом сірки 1,75 %, та товщиною пластичного шару 12 мм. Показник відбиття вітриніту цих концентратів складає 0,77 %, вміст вітриніту 73 % - тобто вугілля петрографічно однорідне, а рефлектограма вітриніту відповідає маркам ДГ, Г і Ж.

Вугільні концентрати марки Ж Самсонівська і Дуванська у відповідності до марки характеризуються найвищою товщиною пластичного шару 30 мм та відповідним виходом летких речовин 34,4 %, мають підвищену зольність 9,0 % та високий вміст сірки 3,37 %, що не сприяє високим значенням післяреакційної міцності. Ці концентрати мають показник відбиття вітриніту 0,88 % та петрографічну однорідність, що виражається вмістом вітриніту 81 %, який майже на 50 % відповідає жирній стадії метаморфізму.

Групу вугільних концентратів високої стадії метаморфізму характеризує низька товщина пластичного шару, та в концентратах де її важко визначити додатковим параметром обраний показник індексу Рога.

Вугілля ЗФ Узловська марки ПС має середній вихід летких речовин цієї групи 16,2 % товщину пластичного шару 6 мм та зольністю 8,4 %, вміст сірки складає 2,33 %. Це вугілля петрографічно однорідне, вміст вітриніту – 92 %, з довільним середнім показником відбиття вітриніту 1,60 %.

Вугілля розрізу Черніговець петрографічно неоднорідне, вміст вітриніту складає 25 %, який знаходиться в середній стадії метаморфізму, показник відбиття вітриніту складає 1,02 % та цієї кількості вітриніту не вистачає для утворення пластичної маси це обумовлює низьке значення товщини пластичного шару 5 мм та низьке значення індексу Рога 16 од., також це вплинуло на вихід летких речовин 24,4 % і, у відповідності, з комплексом характеристик цьому вугілля присвоєна марка СС. Показники зольності і вмісту сірки складають 8,1 і 0,37 % відповідно.

Пісне вугілля шахти Світанок типовий представник вугілля високої стадії метаморфізму і всі показники: вихід летких речовин – 8,9 %, показник відбиття вітриніту – 2,15 % і відсутність спімаємості цілком відображають його марку. Таке вугілля без втрат можна замінити будь-яким інертним компонентом шихти, а саме: коксовим дріб'язком, пилом УСГК, пилом УБВК, тощо.

Таблиця 2.4

Хімічний склад золи компонентів вугільних шихт

Марка вугілля, ЗФ, розріз, шахта	Вміст оксидів елементів, %								Індекс основності золи, I_o
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
Г, Комсомольська / Добропільська 1:1	43,92	24,74	18,45	1,26	4,56	1,52	1,55	2,55	5,06
Ж, Самсонівська / Дуванська 1:1	35,04	24,10	31,45	1,25	2,98	0,88	1,83	1,59	8,90
ПС, Узловська	39,25	23,46	25,93	1,63	2,98	1,00	2,33	2,30	5,41
СС, розріз Чернігівець	58,94	27,41	7,48	0,76	1,05	0,64	2,86	0,12	1,59
П, шахта «Світанок»	46,30	19,65	18,44	1,63	4,03	1,71	2,36	3,65	3,52

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

За хімічним складом золи ми можемо розбити наші компоненти на дві групи, а саме за вмістом оксиду кремнію, який у більшості концентратів знаходиться в діапазоні 35,04 – 46,30 %, виключенням є вугілля розрізу Черніговець вміст оксиду кремнію в золі якого складає 58,94 %. Для зручності прогнозування показників реакційної здатності і післяреакційної міцності був розрахований індекс основності, для компонентів дослідної шихти він знаходиться в діапазоні від 1,59 до 8,90. Індекс основності розраховували за формулою:

$$I_o = \frac{100 \cdot A^d \cdot (Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)}{(100 - V^{daf}) \cdot (Al_2O_3 + SiO_2)} \quad (2.1)$$

де: A^d – зольність, %; V^{daf} – вихід летких речовин, %;

Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 , SiO_2 – масовий вміст відповідних оксидів в золі.

Треба звернути увагу, що за формулювання вимог до вугільних шихт для отримання високоякісного коксу, обмеження показника індексу основності для шихт складає 2,50, тож для насипних шихт така сировинна база не доцільна.

Вміст жирного вугілля всіх варіантів шихт було незмінним – 20 %. Вміст у шихтах вугілля марок ПС і СС визначалося по різниці. При цьому співвідношення цих марок у шихтах витримувалося рівним 1:2. Склад дослідних шихт за марками представлений у табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Марочний склад дослідних шихт

Шихта	Марка вугілля, ЗФ, розріз, шахта				
	Г, %, Комсомольська/Добропільська	Ж, %, Самсонівська/Дуванська	ПС, %, Узловська	СС, %, розріз Черніговець	П, %, шахта «Світанок»
1	60	20	7	13	-
2	40	20	10	20	10
3	60	20	3	7	10
4	40	20	13	27	-
5	50	20	8	17	5

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Марочний склад дослідних вугільних шихт відповідає концепції експерименту та відображає коливання слабоспівликих компонентів. Складена вугільна шихта була проаналізована за основними технологічними показниками якості. Характеристика властивостей вугільних шихт представлена в табл. 2.6, а хімічний склад золи цих шихт – в табл. 2.7.

Таблиця 2.6

Технологічні властивості і характеристики дослідних вугільних шихт

Шихта	Технічний аналіз, %				у, мм	Петрографічний склад, %					Показник відбиття вітриніту, R _o , %	Стадії метаморфізму вітриніту (%) і марки вугілля, що умовно відповідають цим стадіям					
	A ^d	S ^d _t	V ^d	V ^{daf}		V _t	S _v	I	L	ΣOK		0,50-0,64	0,65-0,89	0,90-1,19	1,20-1,39	1,40-1,69	>1,70
											ДГ	Г	Ж	К	ПС	Т	
1	8,1	1,94	31,6	34,3	14,3	70	1	23	6	24	0,88	8	59	24	4	3	2
2	8,1	1,81	27,3	29,7	12,4	69	2	25	4	27	1,06	5	45	27	4	3	12
3	8,0	1,95	30,5	33,1	13,7	74	1	18	7	19	0,97	8	57	21	2	2	10
4	8,2	1,78	28,5	31,0	12,9	64	2	29	5	31	0,97	5	46	31	8	6	4
5	8,1	1,86	29,5	32,1	13,3	69	1	24	6	25	0,97	6	52	26	5	4	7

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Таблиця 2.7

Хімічний склад золи дослідних шихт

Шихта	Вміст оксидів елементів, %								Індекс основності золи, I _o
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
1	43,77	24,87	20,14	1,22	3,68	1,24	1,83	2,03	5,05
2	44,92	24,51	19,60	1,23	3,33	1,18	2,03	1,96	4,54
3	43,29	24,25	20,50	1,27	3,90	1,33	1,80	2,29	5,10
4	45,29	25,17	19,05	1,17	3,09	1,09	2,06	1,67	4,44
5	44,44	24,71	19,78	1,22	3,49	1,21	1,93	1,98	4,77

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Показники якості вугільних шихт, представлені у таблиці 2.6 показують досить рівномірні якісні показники: за зольністю коливаються 8,0-8,2 %, за вмістом сірки – 1,78-1,95 %, за виходим летких речовин – 29,7 – 33,1 %, з

товщиною пластичного шару – 12,4-14,3 мм, за показником відбиття вітриніту – 0,88-1,06 %, основні коливання обумовлені вмістом пісного вугілля в другому варіанті шихти.

Як і окреслювали хімічний склад золи компонентів не дозволив скласти шихти з обмеженими значеннями індексу основності, тобто отримали діапазон значень 4,44 – 5,10 од.

Коксування дослідних шихт проводили у лабораторній 5-кг печі з визначенням виходу продуктів коксування (рис. 2.1). При цьому методика коксування в цій печі була вдосконалена стосовно трамбованого вугільного завантаження. Трамбування шихти безпосередньо в реторті до щільності промислового трамбованого пирога було неприйнятним через великий тиск розпирання в процесі коксування, деформації та розриву реторти. Тому, як і в промисловому процесі, у спеціальній збірно-розбірній матриці виготовляли трамбований пиріг, а потім на бляшаному піддоні його переносили та встановлювали в реторту.

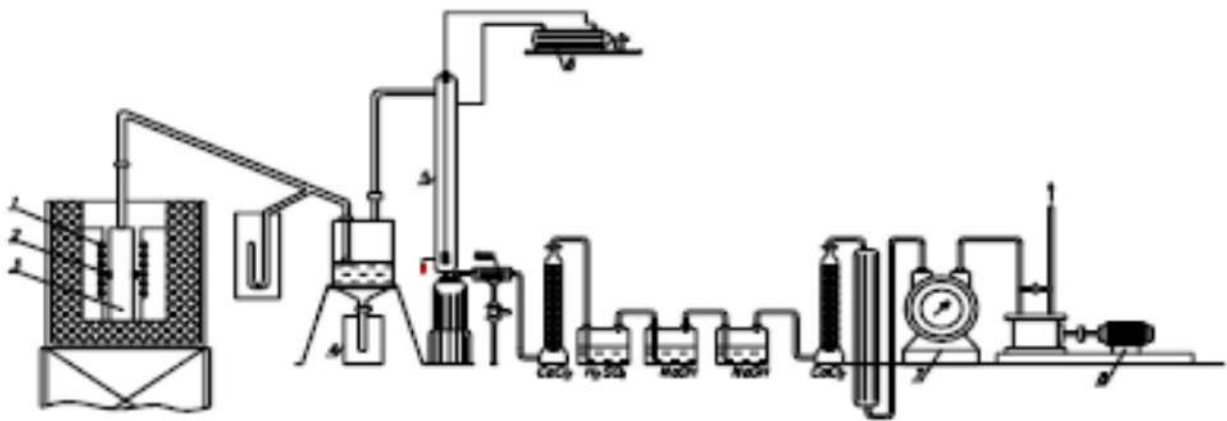


Рис. 2.1. Схема лабораторної установки:

1 – карборундовий нагрівач; 2 – чохла термопар; 3 – камера; 4 – збірник смоли; 5 – електрофільтр; 6 – трансформатор; 7 – газовий лічильник; 8 – насос.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Дослід проводиться наступним чином: піч (без вугільного завантаження) розігрівається до температури 1050–1100 °С протягом 3-4 годин.

Окремо проводиться завантаження камери вугіллям (шихтою), подрібненим до <3 мм (маса завантаження змінюється, в залежності від насипної густини, від 4 до 6 кг). Для зменшення контакту летких речовин з залізом і для запобігання перегріву вугільного завантаження з боку поду камери стінки її обкладають доверху папером, а на дно камери укладають листовий азбест.

Висота підсклепінного простору в камері після завантаження її вугіллям повинна складати 100 мм.

У нагріту піч камера вводиться за допомогою каретки, після чого патрубком з'єднують стояк камери з апаратурою конденсації і уловлювання. Апаратуру заздалегідь випробують на герметичність. Після з'єднання апаратури з камерою включають електрофільтр і вакуум-насос; відсмоктування газу регулюють затискачем на байпасі так, щоб тиск в збірнику смоли дорівнював 10–20 Па. Через кожні 15 хв. контролюють температуру і показники газового лічильника.

При досягненні 900–950 °С в центрі завантаження електрофільтр вимикають і досвід вважається закінченим. Тривалість досліду при високотемпературному коксуванні 2–2,5 год. Вихід коксу визначають зважуванням твердого залишку в перерахунку на суху масу.

Для визначення мінімальних зазорів між трамбованим пирогом та стінками реторти заміряли максимальний тиск розпирання шихт – $P^{12\max}$, $P^{10\max}$ та $P^{8\max}$. Індокси 12, 10 і 8 показують, що вимірювання тиску починали проводити після вільного розширення трамбованого пирога на 12, 10 або 8 мм [27].

Визначення тиску розпирання виконували за ДСТУ 8724:2017 [28] в лабораторних умовах, схема лабораторної установки представлена на рисунку 2.2.

Метод визначення тиску розпирання полягає в двосторонньому нагріванні камери електropечі, з експериментальною вугільною шихтою пластиною 6 в металевій реторті 4, при температурі прогріву стінок: передніх – 880°C, задніх – 600°C. Тиск, що утворюється в процесі розширення вугільного завантаження 6 при утворенні пластичної маси з первинними продуктами термічної деструкції

передається на плиту (стінки коксових камер) 7 і через кварцовий стержень 9 на п'єзоелектричний прес редуктор 10.

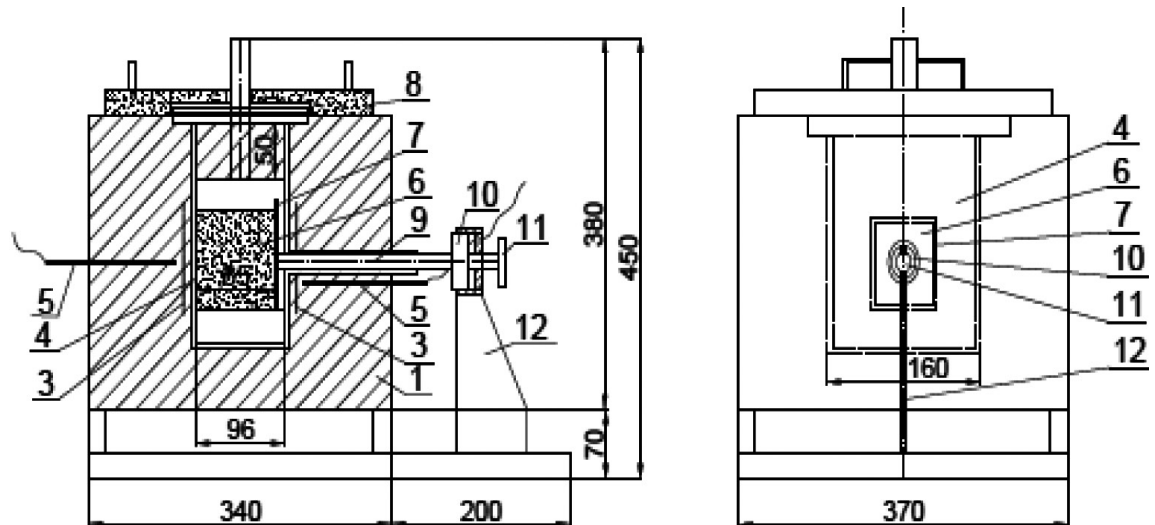


Рис. 2.2 Лабораторне обладнання для визначення тиску розпирання вугілля і сумішей

1 – фундамент; 2 – шафа; 3 – нагрівальний елемент; 4 – реторта;
5 – термопара; 6 – завантаження вугілля; 7 – пластинка; 8 – кришка; 9 – кварцове стержень; 10 – прес редуктор; 11 – гвинт; 12 – кронштейн

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Результати вимірів тиску розпирання всіх варіантів шихт з різними зазорами між вугільним завантаженням і стінкою камери представлені у табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Тиск розпирання трамбованих дослідних вугільних шихт

Тиск розпирання	Величина тиску розпирання дослідних шихт, кПа				
	1	2	3	4	5
P_{\max}^{12}	0,8	0,5	0	1,1	0,7
P_{\max}^{10}	3,3	2,9	2,2	4,6	3,2
P_{\max}^8	8,5	7,7	7,2	9,0	8,1

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

При зазорі 12 мм тиск розпирання всіх варіантів шихт незначний. Для шихти 3 трамбований пиріг у процесі коксування навіть не торкається стінок реторти (нульове значення тиску розпирання). Зі зменшенням величини зазору тиск розпирання суттєво збільшується. При величині зазору 8 мм усі шихти розвивають тиск вище нормативного (7 кПа). Враховуючи, що за високих температур міцність сталі різко падає, такі тиски можуть призвести до деформації реторти і, можливо, розриву по зварних швах. У зв'язку з цим враховуючи той факт, що за даною методикою можуть коксуватися і шихти, що більше розпирають, величина зазору прийнята рівною 10 мм. При розмірах реторти 150×270×300 мм (ш×д×в) розміри трамбованого вугільного пирога становили відповідно 130×240×170 мм. Об'єм пирога становив 5,3 дм³, густина 1,13 кг/дм³, маса 6,0 кг, вологість 12,0 %.

Реторту з трамбованим пирогом завантажували в піч при температурі стінок, що гріють 1100 °С. Піч оснащена приймачем для конденсованої кам'яновугільної смоли, що вловлює апаратурою для поглинання аміаку, сірководню та вуглекислого газу, електрофільтром для уловлювання туманоподібної смоли, патроном з активованим вугіллям для адсорбції бензольних вуглеводнів. Дослід закінчували після досягнення температури в центрі пирога 950 °С. Період коксування становив 3,0-3 год 10 хв. Гасіння коксу – сухе [29].

Отриманий кокс для реалізації тріщин піддавали зусиллям руйнівним шляхом 4-кратного скидання з висоти 1 м на металеву плиту (Рис. 2.3). Кокс більший за 25 мм випробовували в 4-секційному випробувальному барабані (Рис. 2.4) з параметрами випробування - 300 оборотів, 45 об/хв.

Після випробування в барабані кокс розсіювали на ситах з круглими отворами діаметром 25 і 10 мм, дробимість P_{25} оцінювали по виходу класу >25 мм, а стирання I_{10} - по виходу класу <10 мм. Визначали також показники гарячої міцності за методом "Ніппон Стіл". Дані про вихід продуктів коксування з дослідних шихт наведено в табл. 2.9, а якісні характеристики дослідних коксів – у табл. 2.10.

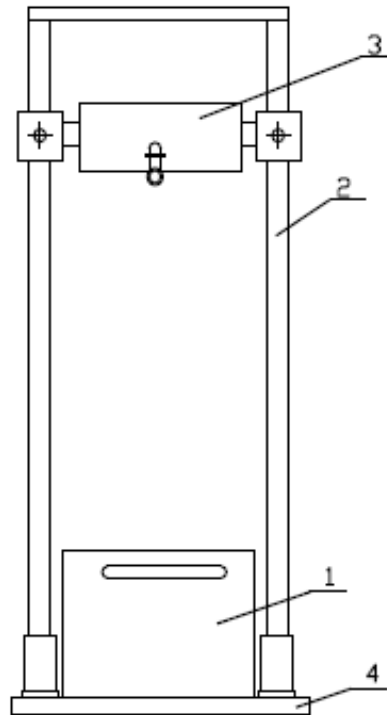


Рис. 2.3. Апарат для скидання коксу:

1 – ящик для коксу після скидання; 2 – стійка; 3 – ящик для коксу до скидання; 4 – плита

Примітка. Джерело: розроблено за допомогою [26]

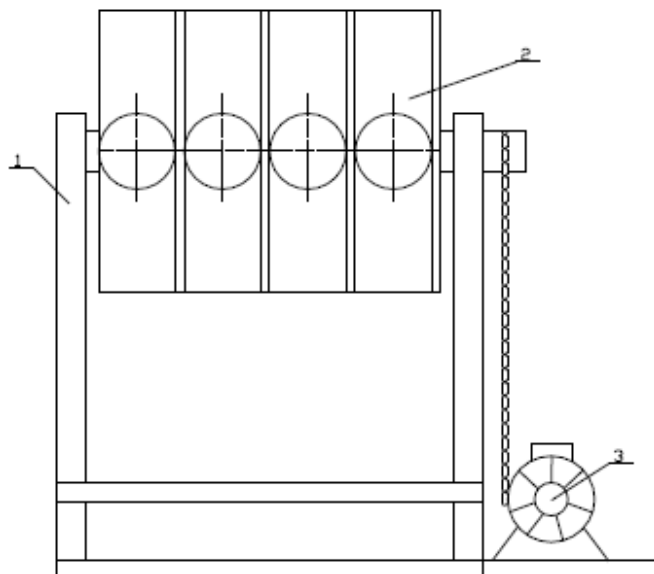


Рис. 2.4 Барабан:

1 – рама; 2 – барабан; 3 – привід.

Примітка. Джерело: розроблено за допомогою [26]

Таблиця 2.9

Вихід продуктів коксування з дослідних вугільних шихт

Шихта	Кокс	Смола	Коксовий газ	Сирий бензол	NH ₃	H ₂ S	CO ₂	Пірогенетична вода
1	71,54	4,49	16,08	1,15	0,12	0,37	1,04	5,21
2	74,37	3,98	13,82	1,12	0,14	0,40	1,07	5,10
3	72,24	4,43	15,63	1,15	0,11	0,33	1,01	5,01
4	73,65	4,17	14,52	1,11	0,11	0,30	1,00	5,14
5	73,00	4,37	14,96	1,09	0,12	0,34	1,01	5,11

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

З даних табл. 2.9 видно, що зі зниженням вмісту газового вугілля в шихті і відповідно зі зниженням виходу летких речовин із шихти вихід коксу збільшується, а смоли та коксового газу – падає. Вихід інших компонентів мало змінюється.

Таблиця 2.10

Якісна характеристика дослідних коксів

Шихта	Технічний аналіз, %		Показники механічної міцності, %		Показники реакційної здатності і післяреакційної міцності, %	
	A ^d	S ^d _t	П ₂₅	И ₁₀	CRI	CSR
1	11,2	1,64	90,0	8,4	47,4	35,3
2	10,9	1,42	88,5	10,3	44,3	37,1
3	11,1	1,61	88,6	9,3	46,9	34,5
4	11,0	1,43	88,6	10,3	43,5	38,0
5	11,0	1,50	88,7	9,4	45,3	35,8

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [27]

Якість коксу за показниками зольності і вмісту сірки, як і в шихті, коливається не значно та співпадає з розрахунковими значеннями. Показники механічної міцності коксів, крім варіанта 1, практично однакові. У той самий час показник I_{10} коливається у межах (22,6 % від.). Досить високе значення механічної міцності коксу варіант 1 пояснюється найважчим значенням товщини пластичного шару вугільної шихти 1 варіанту, що складав 14,3 мм. Закономірно, з високим значенням механічної міцності $P_{25} = 90,0$ коксу варіант 1, цей кокс має найнижче значення стиранності $I_{10} = 8,4$ %.

Як показали коксування шихти 5 в промислових умовах, механічна міцність лабораторного коксу P_{25} більша за показник механічної міцності промислового коксу на 1,5%, а показник стиранності I_{10} приблизно на 3,0% більше показника M_{10} . Отже, при коксуванні дослідних шихт у промислових умовах міцність коксу буде на рівні $M_{25} = 87,0 - 88,5$ %, $M_{10} = 5,4 - 7,3$ %.

У той же час міцність після реакції характеризується дуже низькими значеннями показника CSR і високими - реакційної здатності CRI. Для розуміння чи вплинуло трамбування вугільної шихти на ці показники, розрахуємо ці значення за прогнозними формулами і порівняємо з фактичними. Візьмемо найпоширеніші формули 2.2 і 2.3, які для прогнозу використовують індекс основності.

$$CRI = 13,4 + 9,35 \cdot I_o - 0,45 \cdot I_o^2 \quad (2.2)$$

$$CSR = 94,23 - 1,275CRI \quad (2.3)$$

Результати розрахунків представлені в таблиці 2.11.

Математичну обробку даних вели методами комп'ютерного пошуку мінімуму залишкової дисперсії за програмою Math CAD 2000 Professional (c) Mathsoft.

Таблиця 2.11

Якісна характеристика дослідних коксів

Шихта	Індекс основності шихти, од.	Розрахункові показники реакційної здатності і післяреакційної міцності, %		Показники реакційної здатності і післяреакційної міцності, %	
	И _о	CRI _р	CSR _р	CRI	CSR
1	5,05	49,1	31,6	47,4	35,3
2	4,54	46,6	34,8	44,3	37,1
3	5,10	49,4	31,3	46,9	34,5
4	4,44	46,0	35,5	43,5	38,0
5	4,77	47,8	33,3	45,3	35,8

Примітка. Джерело: розроблено автором

Звісно, як і очікували, отримали невтішні прогнози і розрахункові значення CRI_р високі, а значення післяреакційної міцності CSR_р низькі, та все ж вони гірші за отримані фактичні. Для наглядності побудуємо графічні залежності (Рис. 2.5).

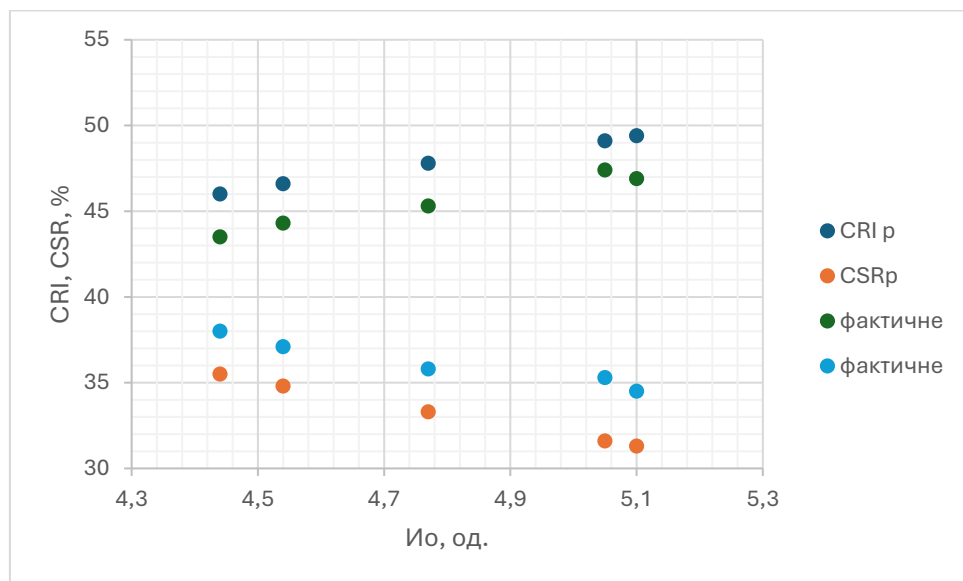


Рис. 2.5 Математичні залежності реакційної здатності і післяреакційної міцності дослідних коксів від індексу основності шихти

Примітка. Джерело: розроблено автором

В результаті отримані регресійні рівняння множинної кореляції першого ступеня зі статистичними оцінками розроблених моделей: R - Коефіцієнт множинної кореляції; $D = 100R^2$ – коефіцієнт детермінації; δ – середньоквадратичне відхилення розрахункових та фактичних даних (табл. 2.12).

Таблиця 2.12

Математичні моделі опису властивостей коксу в залежності від властивостей шихти

№ моделі	Вид моделі	Статистична оцінка		
		R,	D, %	δ , %
2.4	$V_k=93,33 - 0,643V^{daf}$	0,998	99,7	0,06
2.5	$\Pi_{25}=79,923 + 0,679 \cdot y$	0,806	64,9	0,34
2.6	$I_{10}=23,414 - 0,017V^{daf} - y$	0,862	92,5	0,20
2.7	$CRI=20,043+0,158V^{daf}+10,255S_t^d+1,97I_0$	0,984	96,8	0,68
2.8	$CSR=48,347+1,777V^{daf}+13,666S_t^d-22,104I_0$	0,948	89,8	1,81

Примітка. Джерело: розроблено автором

Аналіз отриманих рівнянь показує, що вихід коксу на 99,7% детермінується виходом летких речовин із шихти. Стирання коксу на 92,5% детермінується виходом летких речовин та товщиною пластичного шару шихти. Дробимість коксу детермінується лише товщиною пластичного шару, причому лише на 64,9 %. Показники "гарячої" міцності коксу на 89,8-89,85 визначаються показниками V^{daf} , S_t^d та I_0 . При цьому величина середньоквадратичного відхилення не перевищує 1,81 %, що значно менше допустимої похибки паралельних визначень за методом «Ніппон Стіл» (відповідно до проекту стандарту 3,5 %). Таким чином, використовуючи розроблену методику лабораторних коксувань трамбованих шихт, що складаються в основному з донецького вугілля, були виведені математичні залежності виходу та міцності коксу від технологічних властивостей шихт. Показано, що за високої «холодної» міцності коксу з цих шихт показники «гарячої» міцності мають низькі значення. При цьому введення в шихту 27% вугілля з дуже низьким індексом основності (СС, розріз Чернігівський) не дає

суттєвого покращення цих показників. Для отримання коксу з гарячою міцністю на рівні європейських виробників ($CRI < 35 \%$, $CSR > 55 \%$) необхідно вводити в шихту для трамбування набагато більшої кількості вугілля з низьким індексом основності, що може призвести до зміни її структури.

На наступному етапі визначали трамбуємість складених модельних шихт на установці [30]. Отримані результати наведені в табл. 2.13.

Таблиця 2.13

Гранулометричний склад шихт для трамбування та їх трамбуємість

№	Вміст класів крупності (мм), %				Трамбуємість	
	>3,15	3,15-1,0	1,0-0,5	<0,5	$\sigma_{сз}$, кПа	γ , г/см ³
1	9,0-9,5	29,5-30,0	12,0-13,0	48,0-49,0	11-12	1,130- 1,135
2	7,0-7,5	28,0-29,5	10,0-10,5	53,0-54,0	12-13	1,140- 1,150

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [25]

Дані табл. 2.13 показують, що рівень міцності трамбованих брикетів ($\sigma_{сз}$) знаходиться вузькому діапазоні 11-13 кПа, який відповідає мінімальній трамбуємості шихт для побудованих за проектом ДП «Гипрококс» і успішно освоєних батарей № № 5 і 6 КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (≥ 11 кПа).

На наступному етапі виконали лабораторні коксування для оцінки якості коксу з модельних шихт. При цьому спочатку готували трамбований брикет, для чого в спеціальну збірно-розбірну матрицю завантажували 5 кг вугільної шихти з вологістю 11 %, що містить 93 % класу 0-3 мм (умова, необхідна для підвищення достовірності порівняльної оцінки шихт). За допомогою спеціального вантажу-молотка кожне завантаження трамбували до щільності брикету 1,130 г/см³.

За результатами досліджень шихт за показником трамбуємості важливим показником вугілля є його гранулометричний стан і дробимість, наприклад, за розповсюдженим показником індексу Хардгрова [31].

Також можливо використовувати дрібнодисперсні присадки, наприклад пил УСГК, УБВК, коксовим шлам як замітники в шихтах вугілля високої стадії метаморфізму.

2.2 Дослідження доцільності використання коксового пилу у вугільних шихтах для трамбування

При сухому гасінні коксу неминуче утворення дрібнодисперсного коксового пилу. Вона утворюється при розвантаженні коксу з печі в коксовозний вагон, при завантаженні камери УСГК, при опусканні маси коксу в камеру (за рахунок тертя шматків один про одного), при розвантаженні коксу з камери гасіння на конвеєр, а також на перепадах з конвеєра на конвеєр. Для уловлювання пилу в різних місцях пилоутворення технології сухого гасіння коксу передбачені ефективні аспіраційні системи. Великі частинки пилу, що мають найбільшу ерозійну дію на труби котла-утилізатора і лопаті димососа, що нагнітає циркуляційний газ в камеру гасіння УСТК, вловлюються в бункері пилообладнання. У циклонах УСТК уловлюється більш дрібнодисперсний пил, і на кінцевому щаблі очищення – у рукавних фільтрах з різною поверхнею очищення (ФРІР-650, ФРІР-800) – уловлюються найменші пилові частинки. Всі ці пилові опади пневмотранспортом подаються до загального пилозбірника, з якого періодично вивантажуються. Пил установки безпилової видачі коксу (УБВК) утворюється при уловлюванні дисперсних частинок коксу повітряного середовища під час видачі коксової печі. Пилоподібні відходи, що утворюються в процесі сухого гасіння і видачі коксу, доцільно повертати в цикл виробництва коксу із застосуванням трамбування шихти. При цьому необхідно вивчити вплив таких добавок на трамбуємість шихти. Методика внесення пилу в шихту під час проведення дослідів була такою. Спочатку пил зволожували до значення вологості шихти, потім додавали до останньої у розрахунковій кількості, ретельно перемішували та поміщали у герметичну ємність.

Трамбуємість шихти визначали з використанням відомих методик [25] з деякими змінами: два удари падаючим вантажем замість трьох, маса навішування – 0,75 кг (замість 1,1 кг). При цьому питома робота трамбування не змінилася і становила ~ 500 Дж/кг, що відповідає роботі трамбування в промисловій трамбувально-завантажувально-виштовхувальній машині (ТЗВМ). Трамбуємість оцінювали за міцністю зразка трамбованого на зріз (σ_{cz}) і за щільністю зразка (γ).

Визначення міцності трамбованого брикета на зріз виконують у спеціальному апараті (рис. 2.6).

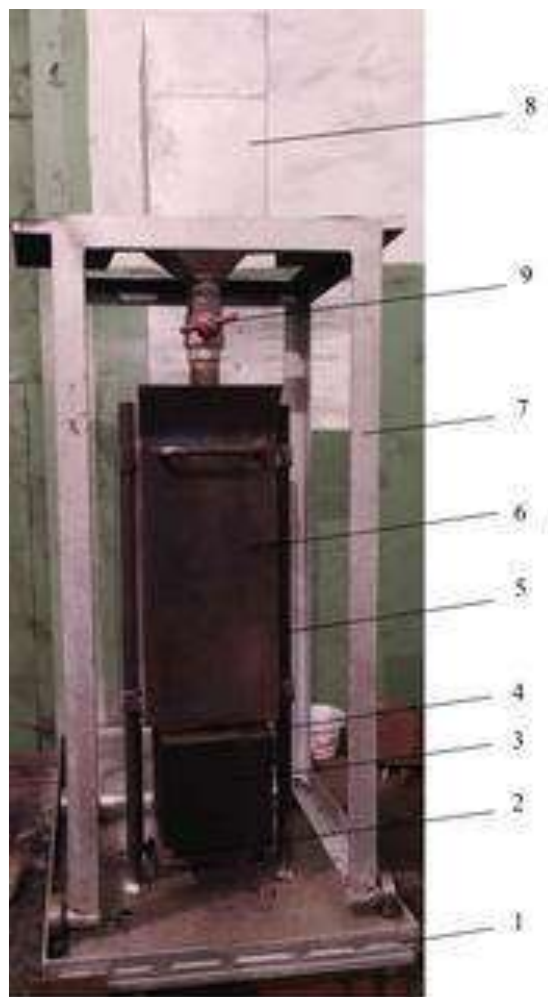


Рис. 2.6 Апарат для визначення міцності трамбованого пирога на зріз (σ_{cz}):

- 1 – основа, 2 – столик, 3 – випробуваний трамбований зразок (брикет),
 4 – металева пластинка, 5 – направляюча контейнера, 6 – контейнер,
 7 – пересувний пристрій бункера, 8 – бункер з свинцевим дрібом, 9 – кран

Примітка. Джерело: розроблено за допомогою [25]

Трамбований брикет встановлюють на столик апарата 2 таким чином, щоб задньою, більш короткою гранню зразок 3 щільно стикався з обмежувальним бортиком столика рівномірно по всій довжині бортика, а рівно половина більш довгої його сторони консольно звисала зі столика. У всіх дослідах брикет встановлюють, не перевертаючи його при витягуванні з матриці трамбування. Притримуючи однією рукою трамбований брикет, на нього поміщають накладку 10, простягнувши її через дві шпильки апарата, і злегка притискають пиріг накладкою за допомогою гайок.

Потім одночасно докручують гайки до упору з невеликим зусиллям притискання. Після притискання брикета він не повинен вільно рухатися на столику, однак і не повинен бути перетиснутий накладкою, тому що надмірне натискання може призвести до порушення внутрішньої структури пирога і знизити його міцність.

Після закріплення трамбованого брикета на столику на його консольну частину поміщають металеву пластинку 4, а на пластинку встановлюють контейнер 6. Товщина цієї пластинки в ~ 2 рази менше, ніж товщина накладки. Потім в контейнер 6 з бункера 8 за допомогою крана 9 насипають свинцеву дріб. Як тільки відбувається зріз трамбованого брикета, одразу ж припиняють подачу дробу краном 9. Після цього контейнер з дробом та платівкою зважують з точністю до 1 г.

$$\sigma_{zz} = \frac{9,8 \cdot P}{S}, \quad (2.9)$$

Міцність трамбованого пирога на зріз обчислюють як відношення ваги вантажу до площі зрізу в кПа, за формулою:

де P – сумарна вага контейнера з дрібом і платівки, кг;

S – площа зрізу зразка, см^2 ; 9,8 – прискорення сили тяжіння, $\text{м}/\text{с}^2$.

Площу зрізу S (см^2) обчислюється за формулою:

$$S = b \cdot h, \quad (2.10)$$

де b – ширина трамбованого пирога, см; h – висота трамбованого пирога, см.

Для дослідження були взяті зразки пилу різної крупності, гранулометричний склад яких представлений в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14

Гранулометричний склад пилу УСГК і УБВК

Місце відбору пилу	Вміст класу крупності (мм), %							
	+5	5-3,15	3,15-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	-0,125	$\leq 0,5$	$\leq 3,15$
Пилоосаджувальний бункер	5,1	7,0	53,8	23,9	7,8	2,4	34,1	87,9
Рукавний фільтр ФРИР-650	-	-	-	2,3	14,4	83,3	100,0	100,0
Пилозбірник УСГК (загальний пил)	0,4	1,5	4,1	20,6	38,5	34,9	94,0	98,1
УБВК (загальний пил)	-	-	2,2	10,8	34,9	52,1	97,8	100,0

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Найменшою крупністю характеризується пил із рукавного фільтра, найбільшою – з пилоосаджувального бункера. Результати випробувань шихти на трамбуємість при різному масовому вмісті в ній зазначених добавок представлені в таблиці 2.15. Трамбуємість вихідної шихти при вологості 11,5 % і при рівні подрібнення 91,0 % класу $< 3,15$ мм характеризувалася такими значеннями показників: $\sigma_{сз} = 0,68$ Н/см², $\gamma = 1,146$ г/см³.

Отримані дані показують, що найбільш високою трамбуємістю характеризується шихта з добавками найбільш дисперсного пилу, що уловлюється рукавним фільтром. Максимум міцності трамбованих зразків

спостерігається при вмісті цього пилу в кількості 3-5%. Перевищення $\sigma_{сз}$ проти аналогічним показником вихідної шихти становить 0,14-0,15 Н/см².

Таблиця 2.15

Вплив коксового пилу УСГК і УБВК на трамбуємість вугільної шихти

Місце відбору пилу	Показники трамбуємості шихти ($\sigma_{сз}$, γ) при вмісті коксового пилу, %									
	1		2		3		5		7	
	$\sigma_{сз}$, Н/см ²	γ , г/см ³	$\sigma_{сз}$, Н/см ²	γ , г/см ³	$\sigma_{сз}$, Н/см ²	γ , г/см ³	$\sigma_{сз}$, Н/см ²	γ , г/см ³	$\sigma_{сз}$, Н/см ²	γ , г/см ³
Пилоосаджувальний бункер	0,68	1,144	0,67	1,141	0,65	1,138	0,61	1,131	0,53	1,114
Рукавний фільтр ФРИР-650	0,72	1,154	0,78	1,161	0,82	1,167	0,83	1,171	0,80	1,171
Пилозбірник УСГК (загальний пил)	0,70	1,149	0,73	1,152	0,76	1,161	0,76	1,159	0,74	1,154
УБВК (загальний пил)	0,72	1,152	0,77	1,159	0,80	1,163	0,81	1,165	0,79	1,161

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

При подальшому додаванні пилу до шихти міцність трамбованого зразка знижується. Щільність трамбованого зразка також істотно підвищується, причому, практично синхронно з $\sigma_{сз}$. За максимальної щільності зразка її приріст порівняно з аналогічним показником вихідної шихти становить 2,2 %. Майже таким же ефективним є вплив на трамбуємість шихти добавки пилу УБВК, хоча він трохи більший, ніж пил з рукавного фільтра. Добавка в шихту пилу з пилоосаджувального бункера УСГК, що характеризується високою крупністю (вищою, ніж крупність шихти для трамбування), призводить до зниження міцності і щільності трамбованого зразка - особливо при внесенні $\geq 3\%$ добавки. Загальний пил УСГК, що включає пил з циклонів, бункера пилоосаджувального і рукавних фільтрів, надає позитивний вплив як на міцність, так і на щільність шихти. Максимальні значення цих показників спостерігаються за вмістом пилу в діапазоні 3-5 %. При цьому збільшення густини зразка становить 1,2%. Подальше

збільшення добавки пилу (до 7 %) призводить до зниження значень обох показників, хоча вони залишаються вищими, ніж для вихідної шихти. Таким чином, внесення загального пилу УСГК та УБК у шихту для трамбування дозволяє помітно підвищити міцність трамбованого пирога, а також на 1,2 % збільшити разове завантаження шихти в коксівну камеру. Для більш повної оцінки ефективності подачі пилу УСГК та УБК у шихту доцільно вивчити їх вплив на механічну міцність коксу та його вихід від шихти.

2.3 Вибір сировинних компонентів і науково-обґрунтоване формування складів вугільних шихт для трамбування

2.3.1 Оцінка трамбованості індивідуального вугілля

Для визначення трамбованості індивідуального вугілля, були відібрані вугільні концентрати, що входять в сировинну базу коксування КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ». Після відбору, вугільні концентрати були досліджені за такими параметрами: технічний (W^a , A^d , S_t^d , V^{daf}), пластометричний (x , y), петрографічний (R_0 , V_t , S_v , I , L , ΣOK , рефлектограма витринита), елементний (C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} , S_t^d , O^{daf_d}) і ситовий (> 50 ; 25-50; 13-25; 6-13; 3-6; 1-3; 0,5-1; 0,2-0,5; $< 0,2$ мм) аналізи. Крім того, були визначені значення коефіцієнтів розмолотності по Хардгроу (HGI) і показники окиснення (Δt) дослідженого вугілля. Результати досліджень наведені в табл. 2.16-2.19.

Аналізуючи наведені в табл. 2.16–2.19 дані, можна констатувати, що з 10 проб вугільних концентратів: 1 проба маркується як марка «Г»; 3 – «Ж»; 1 – «К», 1 – «К» + «КП», 1 – «КП»; 2 – «КС»; 1 – «ПС». Можна додати, що 7 проб представлені вугіллям РФ, 2 проби вугілля з США і 1 - з Казахстану.

Необхідно зазначити, що досліджене переважна кількість вугілля не окиснене ($\Delta t \leq 6$ °C), але 3 проби мають вище значення окиснення та знаходяться на стадії помірно окисненого.

Таблиця 2.16

Технологічні властивості вугільних концентратів

Постачальник, країна	Марка	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Коефіцієнт розмолодатності за Хардгровим, од.	Показник окиснення, °С
		A ^d	S _t ^d	V ^{daf}	x	y	HGI	Δt
ТОВ «Ресурс», РФ	Г	9,9	0,34	37,7	36	11	48	10
Rock Leack, США	Ж	7,9	1,08	34,3	27	24	60	2
ЗФ «Щедрухинская», РФ	Ж	9,5	0,53	35,7	5	30	66	4
ЗФ «Березовская», РФ	Ж	8,6	0,51	32,5	-8	24	64	2
Integrity, США	К	7,5	1,14	25,2	24	16,5	80	2
ЗФ «Восточная», Казахстан	К+КП	10,8	0,39	26,3	18	17,5	69	7
ЗФ «Березовская», РФ	КП	7,6	0,40	21,3	27	12	75	5
Р-з Краснобродский, РФ	КС	7,8	0,32	24,7	32	7	70	2
ТОВ «Барзасское товарищество», РФ	КС	8,6	0,27	20,3	28	9	77	6
ЗФ «Березовская», РФ	ПС	9,9	0,33	19,2	21	9	86	11

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Таблиця 2.17

Петрографічна характеристика вугільних концентратів

Постачальник, країна	Марка	Петрографічний склад (Без мінеральних домішок),%					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %					
								0,50-0,79			0,50-0,79		
		Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту						ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС	П
		Vt	Sv	I	L	ΣОК	R ₀						
ТОВ «Ресурс», РФ	Г	81	0	18	1	18	0,73	88	12	0	0	0	0
Rock Leack, США	Ж	85	0	12	3	12	0,96	2	19	78	1	0	0
ЗФ «Щедрухинская», РФ	Ж	90	0	9	1	9	0,93	0	31	69	0	0	0
ЗФ «Березовская», РФ	Ж	95	0	5	0	15	1,01	0	0	100	0	0	0
Integrity, США	К	81	0	18	1	18	1,22	10	11	20	39	18	2
ЗФ «Восточная», Казахстан	К+КП	76	0	23	3	23	1,18	0	0	60	40	0	0
ЗФ «Березовская», РФ	КП	47	2	51	0	53	1,20	0	0	53	42	4	0
Р-з Краснобродский, РФ	КС	43	2	56	0	58	1,03	2	14	74	8	0	3
ТОВ «Барзасское товарищество», РФ	КС	24	1	75	0	76	1,19	0	0	52	48	0	0
ЗФ «Березовская», РФ	ПС	69	0	31	0	31	1,54	0	0	0	42	49	9

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Таблица 2.18

Елементний склад вугільних концентратів

Постачальник, країна	Марка	Елементний склад, %				
		C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	O_d^{daf}
ТОВ «Ресурс», РФ	Г	83,51	5,43	2,17	0,34	8,55
Rock Leack, США	Ж	86,40	5,58	1,57	1,08	5,37
ЗФ «Щедрухинская», РФ	Ж	86,38	5,79	2,67	0,53	4,63
ЗФ «Березовская», РФ	Ж	86,22	5,80	2,97	0,51	4,50
Integrity, США	К	87,96	5,10	1,65	1,14	4,15
ЗФ «Восточная», Казахстан	К+КП	88,80	5,15	1,75	0,39	3,91
ЗФ «Березовская», РФ	КП	87,45	4,86	2,10	0,40	5,19
Р-з Краснобродский, РФ	КС	87,85	4,67	2,38	0,32	4,78
ТОВ «Барзасское товарищество», РФ	КС	88,31	4,74	2,03	0,27	4,65
ЗФ «Березовская», РФ	ПС	89,89	4,83	2,33	0,33	2,62

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Таблиця 2.19

Гранулометричний склад вугільних концентратів

Постачальник, країна	Марка	Гранулометричний склад (мм), %									Середній діаметр частинок, мм d _s
		>50	50–25	13–25	6–13	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3	
ТОВ «Ресурс», РФ	Г	0,0	4,3	12,0	17,6	19,4	22,5	9,6	14,6	46,8	6,99
Rock Leack, США	Ж	0,0	8,1	11,8	12,9	15,7	19,2	10,6	21,6	51,4	7,75
ЗФ «Щедрухинская», РФ	Ж	0,0	0,0	5,5	7,6	13,4	24,8	19,2	29,4	73,5	3,09
ЗФ «Березовская», РФ	Ж	0,0	0,8	2,8	7,0	11,7	25,7	18,3	33,8	77,8	2,74
Integrity, США	К	0,0	4,5	9,8	8,7	12,5	22,8	16,3	25,4	64,5	5,58
ЗФ «Восточная», Казахстан	К+КП	0,0	0,3	4,5	5,2	9,7	24,5	23,7	32,0	80,3	2,65
ЗФ «Березовская», РФ	КП	14,9	7,1	10,5	7,4	10,3	20,2	11,1	18,4	49,7	17,58
Р-з Краснобродский, РФ	КС	18,8	6,0	9,4	10,9	11,2	17,2	9,4	17,2	43,7	20,14
ТОВ «Барзасское товарищество», РФ	КС	3,3	5,6	10,0	12,5	14,1	21,0	11,7	21,9	54,6	8,82
ЗФ «Березовская», РФ	ПС	9,3	13,5	9,8	6,4	7,7	16,5	16,3	20,6	53,3	15,33

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Газове вугілля ТОВ «Ресурс» характеризується значенням виходу летких речовин на рівні 37,7 %, рівнем товщини пластичного шару – 11 мм, вмістом фюзенізованих компонентів – 18 %. Вітриніт вугілля на 100 % складається зі складових, що відповідають стадіям метаморфізму вугілля газової групи.

Жирне вугілля (РФ і США ЗФ «Березовская», ЗФ «Щедрухинская», «Rock Leack») характеризується вмістом вітриніту 85–95 %; сумою фюзенізованих компонентів, що не перевищує 15 % та показником відбиття вітриніту 0,93–1,01 %, та товщиною пластичного шару 24 і 30 мм. Сума складових вітриніту, що знаходяться в стадії жирного вугілля, становить 69–100 %.

Вугілля коксової групи (Integrity, ЗФ «Восточная», ЗФ «Березовская» р-з Краснобродский, «Барзасское товарищество») можна умовно розділити на 2 групи. В першу групу можна віднести петрографічне однорідне ($\Sigma\text{OK} < 25\%$) вугілля Integrity і ЗФ «Восточная», а в другу петрографічне неоднорідне ($\Sigma\text{OK} > 25\%$) вугілля розрізу «Краснобродский» і ТОВ «Барзасское товариство».

Різниця в петрографічному складі відобразилася на показниках якості вугілля, що входить до цих двох груп. Перша група характеризується більш високими значеннями товщини пластичного шару (16–18 мм), ніж вугілля другої групи (6–8 мм), і виходу летких речовин (23,9–25,6 % проти 16,3–21,7 %).

Вугілля марки ПС (ЗФ «Березовская») має зольність 9,9 %, вміст загальної сірки 0,33 %, вихід летких речовин 19,2 %, товщину пластичного шару 9 мм, значення показника відбиття вітриніту становить 1,54 %. Вміст фюзенізованих компонентів – 31 %.

Вміст вуглецю і кисню (табл. 2.18) корелюється зі ступенем метаморфізму дослідженого вугілля. При підвищенні ступеня метаморфізму відбувається зростання вмісту вуглецю з 82,43 до 89,08 % і, відповідно, зниження вмісту кисню з 8,96 до 3,24 % [26].

Крім того, досліджене вугілля було подрібнено в лабораторній молотковій дробарці при одному й тому ж навантаженні. Такий підхід до подрібнення вугілля дає можливість додатково оцінити його твердість, тобто в даному випадку дробарка використовується не тільки як агрегат для подрібнення вугілля, але і як

апарат для визначення їх твердості. Отримані результати представлені в табл. 2.20.

З даних таблиці 2.20 випливає, що якщо судити за вмістом класу <3 мм, то найбільш твердим є вугілля ЦЗФ «Березовская», марка «КП» - 92,7%. Однак, якщо про твердість вугілля судити й за змістом класу <0,5 мм, то це вугілля знаходиться на рівні вугілля марок «ГЖП» ТОВ «Ресурс», «Ж» «Rock Leack» і «КС» розрізу «Краснобродский», у яких вміст класу <0,5 мм складає 34,6-35,6%.

Найбільш «м'яким» є вугілля марки «Ж» ЗФ «Щедрухинская» і ЗФ «Березовская», а також вугілля марки «К + КП» ЗФ «Восточная». Воно відрізняється найбільш високим вмістом класу <3 мм (~ 98%) і класу <0,5 мм. Причому, якщо вугілля «Ж» ЗФ «Щедрухинская» містить 46,1% класу <0,5 мм, то вугілля марки «Ж» ЗФ «Березовская» та «К + КП» ЗФ «Восточная» відповідно на 8 і 4% більше. Таким чином, ці два вугілля найбільш схильні до утворення «тонких» класів крупності, необхідних для забезпечення міцності трамбованого вугільного пирога з вологої шихти.

Що стосується інших вугілля марок «К» компанії «Integrity», «ПС» ЗФ «Березовская» та «КС» ЗФ «Барзасское товарищество», то вони займають за цими показниками проміжне положення.

У таблиці 2.21 наведені значення показників міцності ($\sigma_{зр}$) і щільності ($\gamma_{вл}$, $\gamma_{сух}$) трамбованого пирога.

Отримані дані показують, що найменшою міцністю на зріз ($\sigma_{зр}$) мають трамбовані пироги з вугілля марки «ГЖП» ТОВ «Ресурс». Вони також характеризуються і найменшою щільністю. Кілька найкраща трамбованість вугілля марок «Ж» компанії «Rock Leack», «КС» розрізу «Краснобродский» і «КС» компанії «Барзасское товарищество». Решта вугілля характеризуються як добре трамбоване, особливо вугілля марок «Ж» (Leer, ЗФ «Щедрухинская», ЗФ «Березовская») і «К + КО» ЗФ «Восточная», вміст яких в шихті найбільш бажаний. Найбільш високою щільністю в перерахунку на суху масу характеризується вугілля марок «К + КП» ЗФ «Восточная», «КП» і «ПС» ЗФ «Березовская». Це вугілля відносяться до високометаморфізованого.

Таблиця 2.20

Гранулометричний склад вугілля після його подрібнення в лабораторній молотковій дробарці

Постачальник, країна	Марка	Вміст класів крупності (мм), %							
		>3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,2	<0,2	<0,5	<3
ТОВ «Ресурс», РФ	Г	6,6	14,0	20,4	24,2	19,0	15,8	34,8	93,4
Rock Leack, США	Ж	6,8	14,7	19,5	23,4	22,7	12,2	35,6	93,2
ЗФ «Щедрухинская», РФ	Ж	1,8	5,9	16,0	30,2	25,4	20,7	46,1	98,2
ЗФ «Березовская», РФ	Ж	2,4	5,3	13,0	25,3	28,0	26,0	54,0	97,6
Integrity, США	К	4,2	10,0	16,0	24,5	23,3	22,0	45,3	95,8
ЗФ «Восточная», Казахстан	К+КП	2,3	7,3	15,4	24,5	24,3	26,2	50,5	97,7
ЗФ «Березовская», РФ	КП	7,3	13,9	18,0	20,6	19,6	20,6	40,2	92,7
Р-з Краснобродский, РФ	КС	6,7	15,3	20,3	23,1	16,2	18,4	34,6	93,3
ТОВ «Барзасское товарищество», РФ	КС	4,9	11,6	17,7	22,6	27,5	15,7	43,2	95,1
ЗФ «Березовская», РФ	ПС	5,2	9,6	16,3	22,9	21,2	24,8	46,0	94,8

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Таблиця 2.21

Міцність і щільність трамбованого вугільного пирога

Постачальник, країна	Марка	W_r^r , %	Міцність трамбованого вугільного пирога на зріз, $\sigma_{сз}$, кПа	Щільність вугільного пирога, г/см ³	
				$\gamma_{вл}$	$\gamma_{сух}$
ТОВ «Ресурс», РФ	Г	11,1	8,8	1,094	0,972
Rock Leack, США	Ж	11,1	12,1	1,118	0,994
ЗФ «Щедрухинская», РФ	Ж	10,9	16,4	1,126	1,003
ЗФ «Березовская», РФ	Ж	11,0	16,3	1,136	1,011
Integrity, США	К	11,2	15,2	1,141	1,013
ЗФ «Восточная», Казахстан	К+КП	11,0	16,6	1,155	1,028
ЗФ «Березовская», РФ	КП	10,8	14,0	1,158	1,033
Р-з Краснобродский, РФ	КС	11,1	12,8	1,141	1,014
ТОВ «Барзасское товарищество», РФ	КС	11,2	13,1	1,136	1,005
ЗФ «Березовская», РФ	ПС	11,1	15,7	1,155	1,027

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

При цьому вугілля марок «К + КЖ» ЗФ «Восточная», та «ПС» ЗФ «Березовская» можна віднести до вугілля, що характеризується найбільш дрібним помелом. Вугілля марки «КП» ЗФ «Березовская» в порівнянні з зазначеними видами вугілля характеризуються більшим помелом і помітно меншою міцністю на зріз ($\sigma_{зр}$).

Таким чином, міцність пирога змінюється практично синхронно зі зміною вмісту в концентратах класу крупності менше 3 мм, бо цей клас визначає компактне пакування зерен в процесі трамбування [30].

Найбільш високою міцністю трамбованих зразків на зріз ($\sigma_{зр}$) має вугілля марок «Ж», «К + КП», «КП», а меншою міцністю володіє вугілля марок «Г», «ГЖП» і «КС».

З огляду на вплив гранулометричного складу подроблених проб вугілля на величину їх міцності трамбованого вугільного пирога на зріз були побудовані графічні залежності (рис. 2.7, 2.8) впливу вмісту класу <3 і $<0,5$ мм на $\sigma_{зр}$.

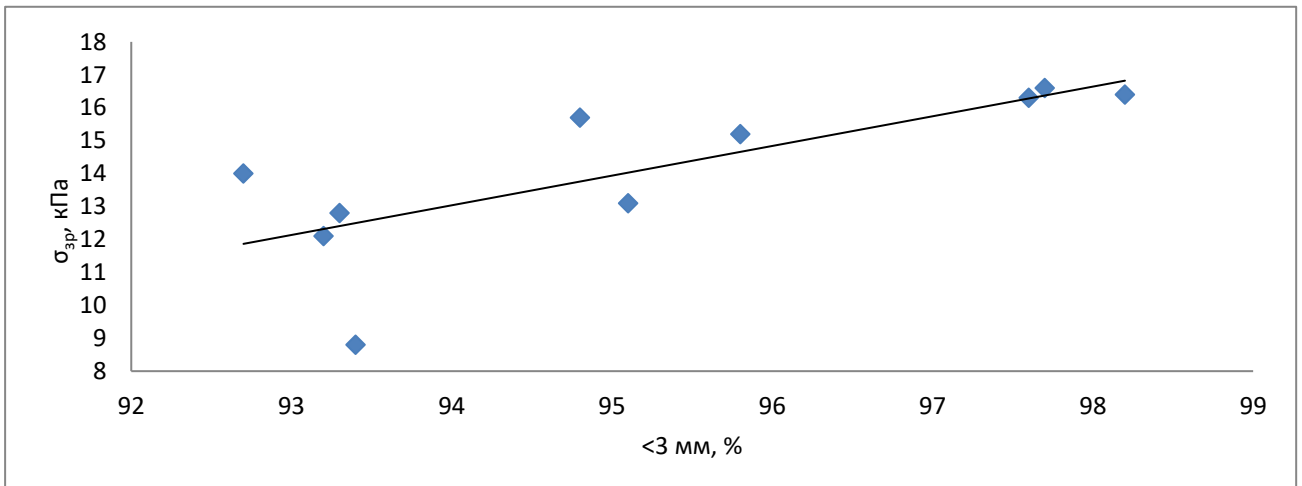


Рис. 2.7. Залежність впливу вмісту класу <3 мм у вугіллі на $\sigma_{зр}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

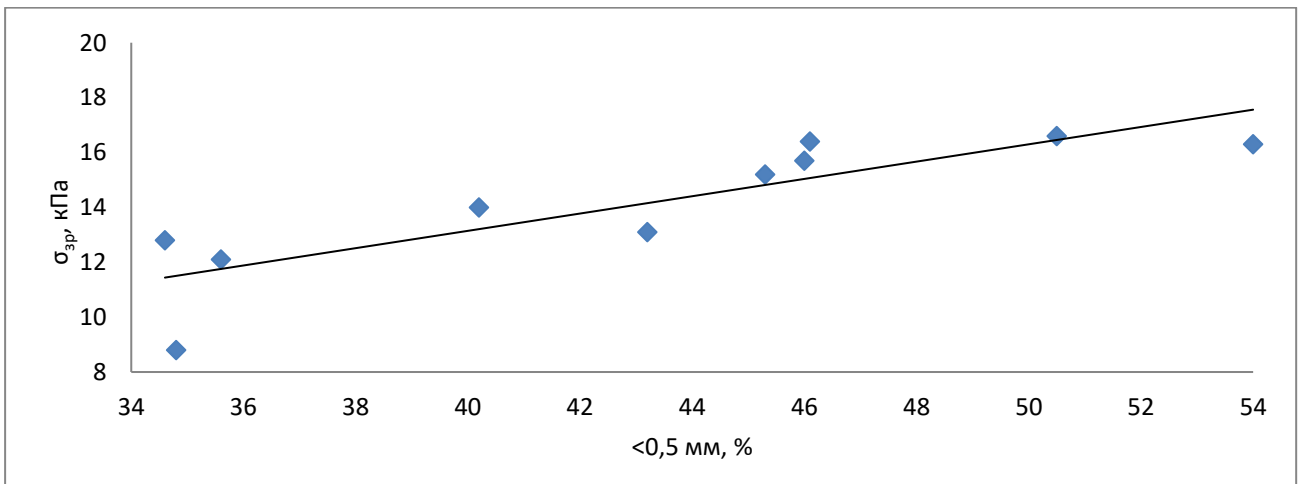


Рис. 2.8. Залежність впливу вмісту класу $<0,5$ мм в вугіллі на $\sigma_{зр}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Математична оцінка наведених на рис. 2.7 і 2.8 графічних залежностей представлена в табл. 2.22.

Таблиця 2.22

Математичні рівняння і статистична оцінка

№	Вид рівняння	R ² , %
2.11	$\sigma_{зр} = 0,901 \cdot (< 3,0 \text{ мм}) - 74,655$	57,09
2.12	$\sigma_{зр} = 0,3154 \cdot (< 0,5 \text{ мм}) + 0,5271$	72,73

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Аналізуючи наведені на рис. 2.3, 2.4 і в табл. 2.22 графічні і математичні залежності, можна зробити висновок, що збільшення вмісту класів <3 і <0,5 мм призводить до зростання показника $\sigma_{зр}$.

2.3.2 Оцінка показників трамбованості вугілля в бінарних сумішах

Практичний і науковий інтерес представляє взаємодія вугілля в сумішах, перш за все, в бінарних. В який бік може змінюватися $\sigma_{зр}$ в суміші, в якій одне вугілля з малою величиною цього показника, а інший - з високою. Для відповіді на це питання ми взяли суміш з двох вугілля в співвідношенні 50:50%. Як вугілля з низькою трамбованістю узяті вугілля марки «ГЖП» ТОВ «Ресурс», а з високою - «К + КЖ» ЗФ «Восточная», $\sigma_{зр}$ яких 8,8 і 16,6 кПа відповідно. У табл. 2.23 наведені розрахункові (за правилом адитивності) і фактичні значення міцності трамбованого вугільного пирога на зріз ($\sigma_{зр}$).

Таблиця 2.23

Фактичні та розрахункові значення $\sigma_{зр}$ бінарної суміші

Суміш	Прочність трамбованого угільного пирога, $\sigma_{сз}$, кПа		
	Розрахункове значення (по адитивності), $\sigma_{зр,р}$	Фактичне значення, $\sigma_{зр,ф}$	$\sigma_{зр,ф} - \sigma_{зр,р}$
50 % ТОВ «Ресурс» + 50 % ЗФ «Восточная»	12,7	14,3	1,6

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Аналізуючи дані, наведені в табл. 2.23, можна зробити висновок, що фактичні значення $\sigma_{зр}$ є вище розрахункових значень для бінарних сумішей.

2.3.3 Оцінка впливу гранулометричного складу вугільної шихти на міцність трамбованого пирога

Вплив гранулометричного складу (помелу) дробленої вугільної шихти на міцність трамбованого пирога вивчали на шихті марочного і компонентного складів, наведеного в табл. 2.24

Таблиця 2.24

Марочний і компонентний склад вугільної шихти

Постачальник, країна	Марка	Участь, %
ТОВ «Ресурс», РФ	ГЖП	46
Rock Leack, США	Ж	7
ЗФ «Березовская», РФ	Ж	9
ЗФ «Восточная», Казахстан	К+КП	13
ЗФ «Березовская», РФ	ПС	5
Р-з «Красный Брод», РФ	КС	10
ТОВ «Барзасское товарищество», РФ	КС	10
Разом		100

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Показники якості дослідної вугільної шихти наведені в табл. 2.25-2.28.

Таблиця 2.25

Технологічні властивості вугільної шихти

Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм	
A^d	S_t^d	V^{daf}	x	y
9,3	0,41	31,7	27	13

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Таблиця 2.26

Петрографічна характеристика вугільної шихти

Петрографічний склад (Без мінеральних домішок),%					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту,%					
						0,50- 0,79			0,50- 0,79		
					Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту						
Vt	Sv	I	L	ΣOK	R ₀	ДГ+Г	ГЖО+ГЖ	Ж	К	ПС	Т
71	0	28	1	29	0,93	41	8	38	13	0	0

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Таблиця 2.27

Елементний склад вугільної шихти

Елементний склад, %				
C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	S ^t	O ^d
85,75	5,26	2,15	0,41	6,42

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Таблиця 2.28

Гранулометричний склад вугільної шихти

Гранулометричний склад (мм), %									Середній діаметр частинок, мм
>50	50–25	13–25	6–13	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3	d _s
3,0	5,7	9,6	13,0	15,4	22,0	12,6	20,3	54,9	8,12

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Вологість складової шихти при різній міцності була практично постійною і становила ~ 11,0%. Гранулометричний склад шихти і міцності трамбованого пирога при різних помелах (90,1-92,2%) представлені в табл. 2.29, а на рис. 2.9 і 2.10 наведені графічні залежності впливу вмісту класу менше 3 і менше 0,5 мм на значення $\sigma_{зр}$ вугільної шихти.

Отримані результати показують, що зі збільшенням рівня подрібнення міцність трамбованого пирога закономірно підвищується. Щільність пирога спочатку дещо підвищується, а потім різко падає.

Таблиця 2.29

Гранулометричний склад, трамбованість і щільність шихти

Шихта	Гранулометричний склад, (мм), %					$\sigma_{зр}$ кПа	$\gamma_{вл}$ г/см ³	$\gamma_{сух}$ г/см ³
	>3	1–3	0,5–1	<0,5	<3			
1	9,9	28,3	25,7	36,1	90,1	12,5	1,146	1,020
2	8,8	29,9	21,9	39,4	91,2	13,7	1,143	1,017
3	7,8	32,0	19,4	40,8	92,2	15,0	1,140	1,015

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

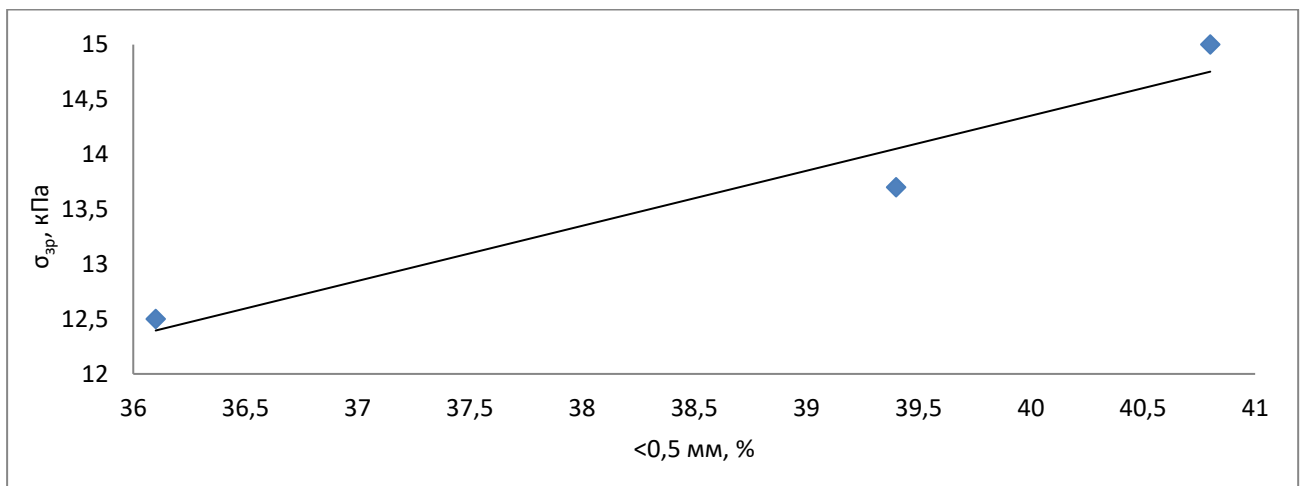


Рис. 2.9. Залежність впливу вмісту класу <0,5 мм в шихті на $\sigma_{сз}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Такий хід зміни щільності пирога можна пояснити тим, що з підвищенням рівня подрібнення підвищується показник $\sigma_{зр}$, тобто підвищується зчеплення між вугільними зернами, в результаті чого щільність пирога підвищується. При подальшому збільшенні рівня подрібнення кількість дрібних частинок настільки збільшується, що вони вже повинні зашкоджувати більш компактному

розташуванню більших зерен, що і призводить до меншої щільності трамбованого пирога, хоча міцність пирога і збільшується.

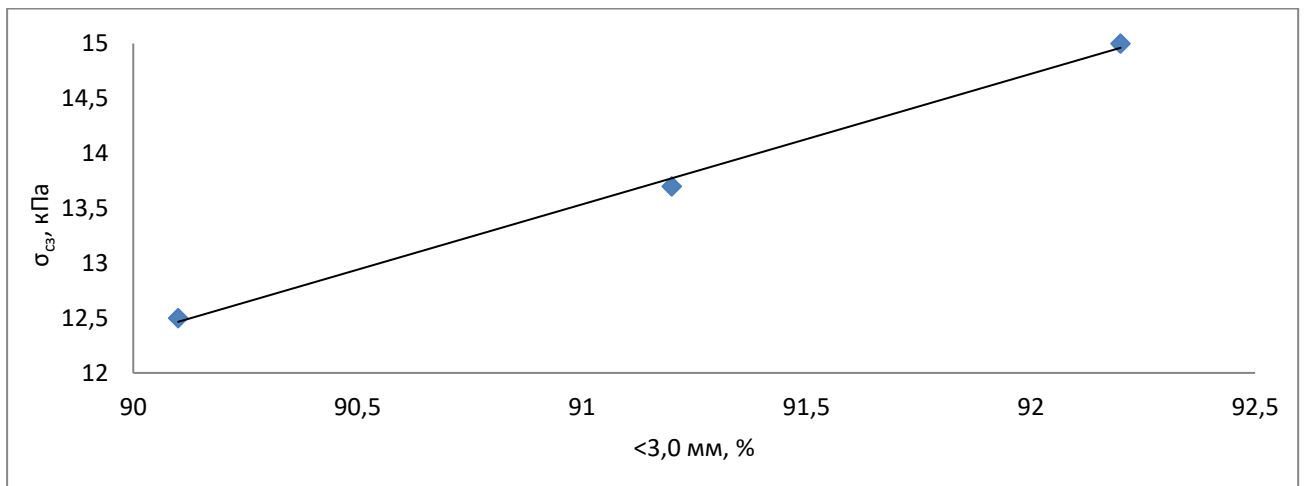


Рис. 2.10. Залежність впливу вмісту класу <3,0 мм в шихті на $\sigma_{сз}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

У табл. 2.30 наведені математичні рівняння і статистична оцінка впливу вмісту класу менше 0,5 і менше 3 мм у вугільній шихті на значення $\sigma_{зр}$.

Таблиця 2.30

Математичні рівняння і статистична оцінка

№	Вид рівняння	R ² , %
2.13	$\sigma_{сз} = 0,5017 \cdot (< 0,5 \text{ мм}) - 5,7166$	93,76
2.14	$\sigma_{сз} = 1,1888 \cdot (< 3,0 \text{ мм}) - 94,6480$	99,74

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Отримані математичні залежності мають високі показники детермінації, що показує пряму залежність.

2.3.4 Оцінка впливу вологості шихти на міцність трамбованого пирога

Вплив вологості шихти на міцність трамбованого пирога проводили на дробленій виробничій шихті для трамбування КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ». Гранулометричний склад шихти представлений в табл. 2.31.

Таблиця 2.31

Гранулометричний склад виробничої шихти

Вміст класів крупності (мм), %								
>6	6–3,15	3,15–1	1–0,5	0,5–0,2	0,2–0,075	<0,075	<3,15	<0,5
1,1	6,9	24,3	23,0	24,6	14,4	5,7	92,0	44,7

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

При проведенні досліджень вологість змінювали від 10,0 до 13,0% з кроком через кожні 0,5%. Отримані результати представлені в табл. 2.32.

Таблиця 2.32

Трамбованість виробничої вугільної шихти

$W_{r,t}, \%$	Міцність трамбованого пирога на зріз, $\sigma_{зр}, \text{кПа}$	Щільність вугільного пирога, г/см^3	
		$\gamma_{вл}$	$\gamma_{сух}$
10,0	14,8	1,142	1,017
10,5	16,5	1,144	1,018
11,0	17,1	1,147	1,021
11,5	17,5	1,149	1,023
12,0	17,0	1,148	1,022
12,5	16,4	1,141	1,016
13,0	15,2	1,139	1,014

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

На рис. 2.11 і 2.12 наведено графічні, а в табл. 2.33 математичні залежності впливу вологості вугільної шихти на її міцність і щільність.

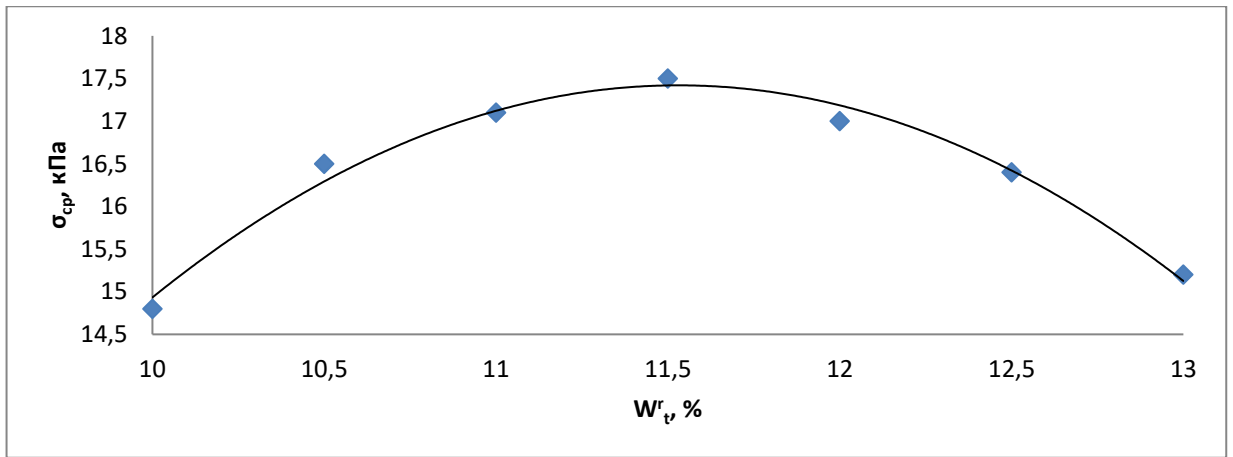


Рис. 2.11. Залежність міцності трамбованого пирога від вологості шихти

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

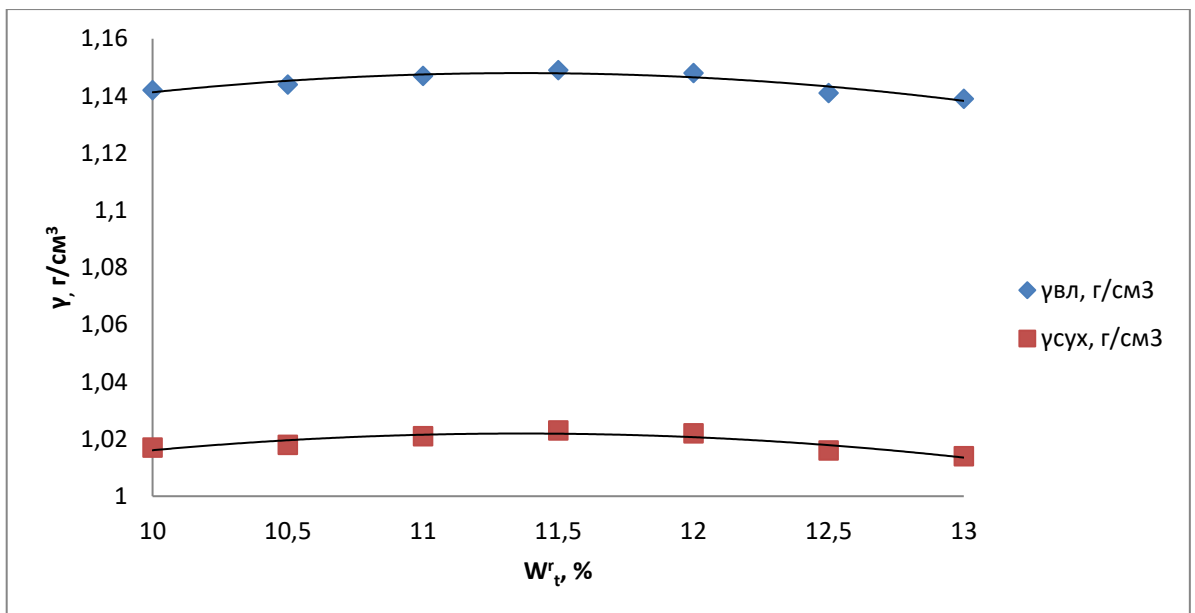


Рис. 2.12. Залежність щільності трамбованого пирога від вологості шихти

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [26]

Дані таблиці 2.33 і рис. 2.11, 2.12 показують, що при збільшенні вологості шихти з 10,0 до $\sim 11,5\%$ міцність трамбованого пирога зростає. Зростає також і його щільність, як вологого, так і в перерахунку на суху масу. В області $W_{t, \tau} = 11,5\%$ спостерігаються найбільш високі характеристики пирога. Після вологості 11,4-11,5% відзначається спад, як міцності, так і щільності трамбованого пирога.

Математичні рівняння і статистична оцінка

№	Вид рівняння	Статистична оцінка	
		R ²	Оптимум
2.15	$\sigma_{\text{ср}} = -1,0619(W_t^r)^2 + 24,488 \cdot W_t^r - 123,76$	98,22	11,5
2.16	$\gamma_{\text{вл}} = -0,0036(W_t^r)^2 + 0,0822 \cdot W_t^r + 0,6808$	86,66	11,4
2.17	$\gamma_{\text{сух}} = -0,0031(W_t^r)^2 + 0,0714 \cdot W_t^r + 0,6161$	84,53	11,5

Примітка. Джерело: розроблено автором

Отже, вологість шихти для трамбування доцільно витримувати в діапазоні ~ 11,5%. Збільшення вмісту вологи вище 11,5% також небажано через збільшення витрат тепла на коксування, яке йде на випаровування вологи.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз функцій коксу у доменній печі, вимог до якості коксу та обґрунтування змін цих вимог з часом та розробкою технологій заміни коксу.

2. Проаналізовані можливості розширення сировинної бази коксування за рахунок впровадження нових технологій підготовки вугільної шихти до коксування, з яких найпоширенішою в світі є технологія трамбування вугільних шихт.

3. Встановлені основні критерії вибору вугілля для сировинної бази коксування на виробництві, що застосовує технологію трамбування вугільних шихт. Сформульовані вимоги до складу і якості вугільних шихт щодо зниженої спікливості та з огляду на гранулометричний склад шихти.

4. Проведені дослідження можливості використання пилу УБВК і УСТК як опіснюючої присадки у вугільні шихти для коксування трамбованих шихт. Виявлені обмеження щодо вмісту цих компонентів в шихті враховуючи їх не високу трамбуємість.

5. Встановлено, що щільність трамбованого пирога ($\sigma_{зр}$) з подрібненого індивідуального вугілля, що входить в сировинну базу КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» тісно пов'язана з вмістом класів <3 і $<0,5$ мм. Збільшення вмісту класів <3 і $<0,5$ мм призводить до зростання показника $\sigma_{зр}$.

6. Показано, що фактичні значення $\sigma_{зр}$ для бінарних вугільних сумішей є вище розрахованих за адитивністю.

7. Встановлено, що зі збільшенням рівня помелу вугільних шихт з 90,1 до 92,2% відбувається зростання величини показника $\sigma_{зр}$ з 12,5 до 15,0 г / дм³, тобто на 10%.

8. При збільшенні вологості шихти з 10,0 до 11,5% міцність трамбованого пирога зростає. Збільшення вмісту води вище 11,5% небажано через зниження міцності трамбованого вугільного пирога, а також збільшення витрат тепла на коксування, яке йде на випаровування води.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке Київ: Техніка. 1993. 200 с.
2. ДСТУ 4703:2022 Кокс. Метод визначення індексу реакційної здатності коксу (CRI) і міцності залишку коксу після реакції (CSR) (ISO 18894:2018, MOD) [На заміну ДСТУ 4703:2006; чинний від 2023-08-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 15 с. (Інформація та документація).
3. ТУ У 322-00190443-114-96 Кокс доменний. Вид. офіц. Київ, 1996. 16 с. (Інформація та документація).
4. ТУ У 19.1-0019044-065:2015 Кокс доменний ТОВ «МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ». Технічні умови. Харків: ДП «УХІН», 2015. 16 с. (Інформація та документація).
5. Ковалев Е.Т., Шмалько В.М., Шульга И.В., Рыщенко А.И. Формирование свойств кокса. Реакционная способность. *Углекимический журнал*. 2006. № 5 – 6. С. 13 – 20.
6. Старовойт А.Г. Современная сырьевая база для коксования, ее структура и требования к качеству кокса. *Новини науки Придніпров'я*. 2010. Май. С. 22-25.
7. Рыженков А.Н., Гордиенко А.И., Ковалев Е.Т., Шульга И.В. Требования к качеству кокса для доменной плавки с использованием пылеугольного топлива и промышленный опыт производства такого кокса в Украине. Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна. *Труды междунаучн.-техн. конф.* Донецк: Унитех. 2006. С. 65-76.
8. Мукіна Н.В., Мірошніченко Д.В. Оптимізація виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування. Харків: НТУ «ХП», Видавництво «Крок», 2023. 148 с.
9. Аронов С.Г., Нестеренко Л.Л. Химия твердых горючих ископаемых. Харьков: Издательство ХГУ, 1960. 371 с.
10. Ван-Кревелен Д.В., Шуер Ж. Наука об угле : Пер. с англ. / Под ред. Касаточкина В.И. М.: Гостехиздат, 1960. 303 с.

11. Аронов С.Г., Скляр М.Г., Тютюнников Ю.Б. Комплексная химико-технологическая переработка углей. Киев: Техніка, 1968. 262 с.
12. Грязнов Н.С. Основы теории коксования. М.: Metallургия, 1976. 311 с.
13. Выпирахина С.С., Аронов С.Г. Активный водород и спекаемость донецких углей. *Химия твердого топлива*. 1976. № 2. С. 20-23.
14. Скляр М.Г., Шустиков В.И. Влияние давления при термическом разложении углей. *Химия и технология топлив и масел*. 1962. № 8. С. 39-42.
15. Скляр М.Г. Физико-химические основы спекания углей. М.: Metallургия, 1984. 201 с.
16. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов М.: Metallургия, 1978. – 287 с.
17. Зубилин И.Г. Влияние уплотнения углей и шихты на их теплопроводность и температуропроводность *Сб. научн. трудов УХИН*. Харьков: Metallургиздат. 1961. Вып. 12. С. 139-147.
18. Кузниченко В.М., Карпов А.В., Торяник Э.И. Влияние внутрипластического газового давления на пластическое состояние углей при уплотнении. Нетермические методы подготовки углей и шихт к коксованию. *Тематич. сб. научн. трудов УХИН*. М.: «Metallургия». – 1984. С. 18-21.
19. Джапаридзе П.Н., Дракин Л.А., Джиджейшвили Н.Ш. Коксование слабоспекающихся углей под давлением собственных летучих веществ *Химия твердого топлива*. 1967. № 2. С. 77-84.
20. Кузниченко В.М. Особенности термохимических превращений при коксовании трамбованной угольной загрузки. *Углекимический журнал*. 2010. № 3-4 С. 66-72.
21. Волошин А.И., Вирозуб И.В., Казмина В.В. Определение теплоты коксования в лабораторных условиях. *Кокс и химия*. 1962. № 5. С. 19-23.
22. Кузниченко В.М., Зубилин И.Г., Солодкая Л.Т. Влияние насыпной плотности угольной загрузки на продолжительность коксования. *Кокс и химия*. 1981. № 8. С. 12-14.

23. Ковалев Е.Т., Дроздник И.Д., Десна Н.А., Мирошниченко Д.В. Основные направления исследований института в области разработки угольной сырьевой базы коксования для коксохимических предприятий Украины *Вуглехімічний журнал*. 2020. № 3. С. 8–17.

24. Дроздник И.Д., Десна Н.А., Бидоленко Н.Б. Межбассейновая сырьевая база коксохимического производства Украины: отечественная и импортная составляющие. *Вуглехімічний журнал*. 2019. № 6. С. 4–8.

25. Ковальов Є.Т., Борисенко О.Б., Шульга І.В., Десна Н.А. Оцінка придатності кам'яновугільної шихти для отримання доменного коксу заданої якості з використанням технології трамбування. *ВуглеХімічний журнал*. 2021. № 4. С. 9–15.

26. Мукіна Н. В., Черноусова О. П., Мірошниченко Д. В., Десна Н. А., Ситник О. В., Коваль В. В. Підготовка вугільної шихти до коксування в умовах комплексу коксових батарей № 5, 6 КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» *ВуглеХімічний журнал*. 2021. №3. С. 8 – 20.

27. Чуб В.Е., Кривонос В.В., Кузниченко В.Н., Кафтан Ю.С., Сытник А.В. Влияние марочного состава шихты для трамбования на «горячую» прочность кокса *УглеХимический журнал*. 2007. № 3-4. С. 24-29

28. ДСТУ 8724:2017 Вугілля кам'яне та шихти на його основі. Метод визначення тиску розпирання, який виникає під час коксування. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 12 с. (Інформація та документація).

29. Кузниченко В.М., Шульга И.В., Сытник А.В. Лабораторный способ определения давления распирания коксуемой угольной загрузки различной насыпной плотности *УглеХимический журнал* 2007. № 3-4. с. 29-33

30. Кузніченко В.М., Шульга І.В., Ситник О.В. Тиск розпирання вугілля та шихт в процесі коксування Харків: Планета-Прінт, 2021. 210 с.

31. Коваль В.В., Мірошниченко Д.В., Богоявленська О.В. Оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування: монографія Харків: НТУ «ХП», Видавництво «Крок», 2023. 136 с.

32. Кузниченко В.М. Влияние пыли УСТК и УБВК на трамбуемость шихты
УглеХимический журнал. 2011. № 5-6. с. 39-42

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА

про підготовку здобувача-випускника

Ковальчук Дарії Олександрівни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Спеціальність 161 Хімічних технологій та інженерії

Назва кваліфікаційної роботи Кваліфікаційна магістерська робота

Тема кваліфікаційної роботи Вивчення можливості збільшення вмісту слабоспікливого вугілля у складах вугільних шихт при використанні технології трамбування

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

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консульта	Примітка
1	Аналітична частина	Десна Н.А.	зарахов.	15.01	Десна	
2	Основна частина	Десна Н.А.	зарахов.	15.01	Десна	
3						
4						

Завідувач кафедри


(підпис)

К.О. Шмельцер

(ініціали, прізвище)

« 15 » січня 2015 р.

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

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

магістра

Здобувачки Ковальчук Дарії Олександрівни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ЗХТ-23м

Тема кваліфікаційної роботи магістра

Вивчення можливості збільшення вмісту слабоспікливого вугілля у складах
вугільних шихт при використанні технології трамбування

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	<u>76;</u>
таблиць	<u>39;</u>
схем і рисунків	<u>16;</u>
листів графічної частини (демонстраційного матеріалу)	<u>.</u>

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи магістра

Кваліфікаційна робота присвячена питанню вибору сировини для складу вугільної шихти при використанні технології трамбування для забезпечення високої якості коксу, що задовольняє вимоги сучасної доменної плавки.

В кваліфікаційній роботі на основі розглянутих літературних джерел проведений аналіз змін якісних характеристик коксу при застосуванні технології трамбування вугільної шихти та сформульовані основні принципи вибору компоненті для складу шихт. В роботі проаналізована сучасна сировина база коксохімічних підприємств та розглянута можливість застосування пилу УСГК та УБВК в якості опіснюючої присадки у шихти для трамбування.

В кваліфікаційній роботі досліджені показники якості вугільних компонентів які впливають на міцність вугільного трамбованого пирога, показані експерименти індивідуальних компонентів та залежності цих показників від основних технологічних показників.

Досліджені показники щільності трамбованого пирога, його міцність та вплив гранулометричного складу, вмісту пилоподібних класів і рівня вологи як Індивідуальних компонентів вугільної шихти так і варіантів вугільної шихти складеної з цих концентратів.

Недоліки кваліфікаційної роботи магістра
(бакалавра, магістра)

В роботі не зазначено за яким принципом обрані індивідуальні компоненти чи проведені дослідження відповідають вимогам підприємства та якими компонентами можна замінити запропоновані. Не наведені розрахунки техніко-економічних показників для порівняння вартості вугільної шихти для класичної технології завантаження і при використанні технології трамбування вугільних шихт. В деяких місцях пояснювальної записки допущені стилістичні та орфографічні помилки та огріхи, в тексті зустрічається невдалий переклад.

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

Здобувачка Ковальчук Д.О. під час написання кваліфікаційної магістерської роботи показала добру загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працювала самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної роботи магістра

Розроблені рішення та рекомендації по вибору сировинних компонентів вугільної шихти для трамбування дозволять досягти покращення показників механічної міцності коксу (за показниками M_{25} та M_{10}) та можуть бути використані в умовах вуглепідготовчого цеху КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Оцінка кваліфікаційної роботи магістра добре, 84, В

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

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


(підпис)

« 15 » 01 2025 р.

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

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

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

10.01.2025



Д. Ковальчук

Д О В І Д К А

про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):

- кваліфікаційної роботи;
- навчальної/наукової праці;
- наукових матеріалів

Вивчення можливості збільшення вмісту слабосікливого вугілля у складах вугільних шихт при використанні технології трамбування

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

Ковальчук Дарія Олександрівна

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 76 сторінок друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 31,60 %.

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадіння із:

- власними публікаціями;
- термінологією;
- посиланнями на літературу, праці вчених;
- посиланнями на законодавство;
- загальноживаними фразами.

Матеріали було розглянуто та рекомендовано до _____ захисту в
ЕК

(подальшого розгляду, друку, опублікування)

на засіданні кафедри Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від «14» січня 2025 р. протокол № 8.

Керівник підрозділу _____


(підпис)

К. Шмельцер

Дата «14» січня 2025 р.

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

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

(бакалавра, магістра)

Здобувачки Ковальчук Дарії Олександрівни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи
Тема кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
Вивчення можливості збільшення вмісту слабоспікливого вугілля у складах вугільних шихт при використанні технології трамбування
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
Вибір та обґрунтування характеристик вугільної шихти які необхідно досягнути при формуванні вугільної сировинної бази коксування при використанні технології трамбування
Переваги кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
Проаналізовано основні вимоги до якості коксу та відповідні вимоги до якості вугільної шихти, що дасть можливість отримати кокс високої якості. Проведений аналіз змін якісних характеристик коксу при застосуванні технології трамбування вугільної шихти та сформульовані вимоги до якості шихти і вугілля. Надано рекомендації щодо використання вугілля різних стадій метаморфізму у вугільних шихтах, гранулометричний склад та вологість вугільної шихти для трамбування.
Недоліки кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
В роботі не акцентовано, чи залежать міцність вугільного пирога від інших характеристик крім гранулометричного складу і вологості.
Рекомендації: робота може бути рекомендована до захисту.
Рецензент: <u>Шмелева Катерина Олександрівна</u> (прізвище, ім'я та по-батькові)

зав.кадр., к.т.н., доцент
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

[Підпис]
(підпис)