

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ННІ/факультет	<u>Навчально-науковий технологічний інститут</u>
Кафедра	<u>хімічних технологій та інженерії</u>
Спеціальність	<u>161 Хімічні технології та інженерія</u>
Форма навчання	<u>Денна</u>

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Кулик Ірини Вячеславівни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему	<u>Дослідження можливості використання методу Гізелера</u> <u>як інструменту оптимізації вугільних шихт для</u> <u>коксування</u>
---------	---

(повна назва теми)

за матеріалами	<u>Техніко – економічні показники роботи КХВ ПАТ</u> <u>«АМКР»</u>
----------------	---

(повна назва бази дослідження)

Науковий керівник	к.т.н., доцент	Десна Н.А.
	<i>(наук. ступінь, вчене звання)</i>	<i>(підпис) (прізвище, ініціали)</i>

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 20__ р. № ____

Завідувач кафедри

(підпис)

Наук. ступінь, вчене звання Ініціали, прізвище

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

Рівень вищої освіти бакалавр
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)
« ____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Кулик Ірини Вячеславівни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Дослідження можливості використання методу Гізелера як інструменту оптимізації вугільних шихт для коксування

керівник кваліфікаційної роботи бакалавра Десна Наталя Анатоліївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу №228-ст від «б» квітня 2026 р.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2024

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи бакалавра Техніко-економічні показники роботи КХВ ПАТ «АМКР»

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Аналітична частина: Сучасні вимоги до якісних показників коксу та їх вплив на доменну плавку. Характеристика сировинної бази та аналіз впливу технологічних факторів на властивості коксу. Принципи формування вугільних шихт та їх вплив на якість коксу. Літературний огляд методів дослідження пластично-в'язких властивостей вугілля.

4.2 Основна частина: Детальна характеристика та теоретичні основи методу Гізелера як інструменту аналізу вугілля. Сутність та принцип методу Гізелера. Апаратурне забезпечення методу Гізелера. Методика підготовки зразка та проведення випробування. Дослідження плинності вугілля та інтерпретація результатів за методом Гізелера. Прогнозування пластичних характеристик вугільних сумішей за методом Гізелера

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 «6» квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	12.05.26	
2.	Основна частина	26.05.26	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.26	
4.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
5.	Захист роботи в ЕК	17.06.2026	

Здобувач

(підпис)

Кулик І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Десна Н.А.

(прізвище та ініціали)

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

[illegible]

					ННТІ 161. КРБ. ПЗ				
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Відомість кваліфікаційної роботи бакалавра	Лім.		Лист	Листів
Розробив	Кулик І.В.					КР	Т	1	1
Керівник	Десна Н.А.					ННТІ			
Консульт.	Десна Н.А.					Каф. ХТІ			
Н.контр.	Шмельцер К.О.					гр. ХТ-22			
Затв.	Шмельцер К.О.								

АНОТАЦІЯ

Кулик І.В. Дослідження можливості використання методу Гізелера як інструменту оптимізації вугільних шихт для коксування – Рукопис.

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

Бакалаврська робота присвячена дослідженню можливостей використання методу Гізелера для оптимізації складу вугільних шихт, призначених для коксування, з метою підвищення якості металургійного коксу та ефективності роботи коксохімічних підприємств. Актуальність роботи зумовлена необхідністю раціонального використання вугільної сировини, вдосконалення підходів до формування вугільних шихт і забезпечення стабільних технологічних показників процесу коксування в умовах змінної якості сировинної бази.

У роботі проаналізовано основні фізико-хімічні та технологічні властивості кам'яного вугілля, що впливають на процес коксування та формування структури коксу. Особливу увагу приділено пластичним властивостям вугілля, які визначають його поведінку під час термічної обробки та значною мірою впливають на якість кінцевого продукту.

Розглянуто теоретичні основи методу Гізелера та його практичне застосування для оцінки пластичних характеристик вугілля. Встановлено, що параметри пластичності, зокрема температура розм'якшення, максимальна пластичність та інтервал пластичного стану, є важливими показниками для прогнозування коксових властивостей вугілля та формування оптимального складу шихти.

Ключові слова: кам'яне вугілля, коксування, вугільна шихта, метод Гізелера, пластичність вугілля, металургійний кокс, оптимізація шихти, технологічні властивості, якість коксу, коксохімічне виробництво.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Сучасні вимоги до якісних показників коксу та їх вплив на доменну плавку	9
1.1.1 Загальна характеристика коксу та вимоги до його якості	9
1.1.2 Показники міцності, крупності та фізико-хімічні характеристики коксу	11
1.1.3 Структурні та фізико-механічні характеристики коксу і фактори, що впливають на їх формування	16
1.2 Характеристика сировинної бази та аналіз впливу технологічних факторів на властивості коксу	19
1.3 Принципи формування вугільних шихт та їх вплив на якість коксу	22
1.4 Літературний огляд методів дослідження пластично-в'язких властивостей вугілля	25
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	31
2.1 Детальна характеристика та теоретичні основи методу Гізелера як інструменту аналізу вугілля	31
2.1.1 Сутність та принцип методу Гізелера	31
2.1.2 Апаратурне забезпечення методу Гізелера	33
2.1.3 Методика підготовки зразка та проведення випробування	40
2.2 Дослідження плинності вугілля та інтерпретація результатів за методом Гізелера	43
2.2.1 Методика проведення досліджень	47
2.3 Прогнозування пластичних характеристик вугільних сумішей за методом Гізелера	56
2.3.1 Прогнозування пластичного інтервалу вугільних сумішей	56
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку коксохімічної промисловості особливого значення набуває раціональне використання вугільної сировини та підвищення ефективності процесів коксування. Якість металургійного коксу значною мірою визначається складом вугільної шихти, яка формується з вугілля різних марок із урахуванням їх фізико-хімічних і технологічних властивостей. Невідповідність цих властивостей може призводити до погіршення показників коксу, зниження продуктивності та підвищення витрат виробництва.

Одним із ключових параметрів, що характеризують придатність вугілля до коксування, є його пластичні властивості, які визначають поведінку вугілля при нагріванні та формування коксової структури. Для оцінки цих властивостей широко застосовується метод Гізелера, який дозволяє отримати детальну інформацію про зміну в'язкопластичного стану вугілля в процесі термічної обробки. Використання результатів досліджень за методом Гізелера відкриває можливості для більш обґрунтованого підходу до формування складу вугільних шихт.

Актуальність теми бакалаврської роботи зумовлена необхідністю вдосконалення підходів до підбору компонентів вугільних шихт з метою отримання коксу заданої якості, а також підвищення ефективності використання сировинної бази. Застосування методу Гізелера як інструменту оптимізації дозволяє підвищити точність прогнозування технологічних властивостей сумішей вугілля та знизити виробничі ризики.

Метою бакалаврської роботи є дослідження можливості використання методу Гізелера як інструменту оптимізації вугільних шихт для коксування, а також розробка стратегії формування їх складу на основі отриманих експериментальних даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:
— проаналізувати основні властивості кам'яного вугілля, що впливають на процес коксування;

- розглянути теоретичні основи методу Гізелера та принцип його застосування;
- дослідити зміну пластичних властивостей вугілля за результатами експериментальних вимірювань;
- оцінити вплив характеристик окремих компонентів на властивості вугільних шихт;
- розробити підхід до формування оптимального складу шихти;
- обґрунтувати можливість використання методу Гізелера для прогнозування якості коксу.

Об'єктом дослідження є процес формування вугільних шихт для коксування.

Предметом дослідження є залежність між пластичними властивостями вугілля, визначеними методом Гізелера, та якістю сформованих вугільних шихт.

Методи дослідження включають аналіз науково-технічної літератури, узагальнення експериментальних даних, порівняльний аналіз показників вугілля, а також елементи інженерного моделювання складу шихт.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування методу Гізелера для підвищення ефективності підбору компонентів вугільних шихт, оптимізації процесів коксування та покращення якості металургійного коксу.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Сучасні вимоги до якісних показників коксу та їх вплив на доменну плавку

1.1.1 Загальна характеристика коксу та вимоги до його якості

Основним паливом у доменному процесі є доменний (стабілізований) кокс, який виконує низку важливих функцій. З технічної точки зору він слугує паливом, з хімічної — виступає відновником, а також бере участь у процесі карбюризації чавуну, оскільки вуглець є його основним складником. Крім того, кокс виконує механічну функцію, утворюючи міцний каркас, стійкий до дії високих температур.

Водночас кокс є одним із ключових чинників, що визначають собівартість доменного процесу. У зв'язку з цим актуальним є завдання зниження його витрат. Однак зменшення використання коксу обумовлює підвищення вимог до його якості, що застосовується у виробництві [1].

Якість коксу визначається сукупністю його фізико-хімічних, хімічних та фізико-механічних властивостей.

До фізико-хімічних характеристик коксу належать реакційна здатність, пористість і горючість. Хімічні властивості визначаються елементарним складом, теплотою згоряння горючої маси, виходом летких речовин, характеристиками золи, а також вмістом вологи, сірки, фосфору та мінеральних домішок.

Фізико-механічні властивості формуються такими показниками, як крупність шматків, їх однорідність за розмірами, ступінь тріщинуватості, а також структурна та загальна міцність, яка оцінюється за показниками стирання, дробимості та термічної стійкості.

1.1.2 Показники міцності, крупності та фізико-хімічні характеристики коксу

Міцність коксу визначають за умовними показниками, отриманими після розсіву проби, що попередньо піддавалася механічному навантаженню. Для забезпечення достовірності результатів проба повинна бути представницькою та відображати реальний гранулометричний склад коксу. При цьому прикладені навантаження мають бути співмірними з руйнівними впливами, що діють у доменній печі. Оцінювання результатів випробувань повинно враховувати як початковий ситовий склад проби, так і його зміну після руйнування. Оскільки жоден із існуючих методів повною мірою не відповідає зазначеним вимогам, дослідження у цьому напрямі тривають.

Згідно з вимогами ГОСТ, для оперативного контролю застосовують метод визначення міцності коксу в малому барабані діаметром і довжиною 1 м, оснащеному чотирма полицями шириною 100 мм, розташованими під кутом 90°. Для випробування використовують пробу масою 50 кг, переважно з розміром шматків понад 60 мм. Барабан обертається протягом 4 хвилин зі швидкістю 25 об/хв при ступені заповнення близько 16%, що забезпечує переважання ударно-дробильних навантажень над стираючими. Після 100 обертів пробу розсіюють на ситах із отворами 10, 20, 40 і 60 мм. Міцність коксу оцінюють за виходом фракцій понад 40 мм (показник М40) та менше 10 мм (показник М10). Показник М40 характеризує дробимість, тоді як М10 — стираниість коксу.

На значення М10 істотно впливає вологість проби: зі збільшенням вологості цей показник зменшується через налипання дрібних частинок на більші шматки. Показник М40, у свою чергу, залежить від початкової крупності проби: зі збільшенням розміру шматків його значення зростає.

Для підвищення надійності результатів проводять два паралельні випробування. Якщо розбіжність перевищує 3% для М40 або 1% для М10, виконують додаткове випробування резервної проби. Остаточне значення визначають як середнє арифметичне двох або трьох вимірювань.

Крім малого барабана, для контролю міцності застосовують великий колосниковий барабан діаметром 2 м і шириною 0,8 м. Його конструкція передбачає наявність колосників діаметром 25 мм, розташованих із кроком 25 мм. Для випробування використовують пробу масою 410 кг з розміром шматків переважно понад 25 мм. Барабан обертається протягом 15 хвилин зі швидкістю 10 об/хв при ступені заповнення близько 37%, що зумовлює переважання стираючих навантажень. Після 150 обертів визначають масу залишку в барабані та проводять розсів дрібних фракцій на ситах 25×25 і 10×10 мм. Показником дробимості є маса залишку, а показником стираності — маса фракції 0–10 мм.

Перевагою великого барабана є висока точність визначення, однак він має і суттєві недоліки, зокрема втрати дрібних фракцій у процесі випробування та недостатню чутливість до оцінки дробимості, яка є важливою характеристикою сучасного коксу.

Термічна стійкість коксу визначається його здатністю протистояти руйнуванню під дією високих температур у доменній печі. Встановлено, що кокс із монолітною структурою має вищу термічну стійкість порівняно з конгломератним, а подрібнення неспікливих компонентів шихти сприяє її підвищенню.

Крупність коксу оцінюють шляхом розсіву проби масою не менше 300 кг на ситах із отворами 80×80, 60×60, 40×40 та 25×25 мм з подальшим визначенням виходу фракцій у відсотках. Для цього застосовують барабанні або двоярусні грохоти типу УХІН і ВУХІН.

За формулою обчислюють зміст кожного класу крупності коксу:

$$V_n = \frac{m_n * 100}{m}$$

де V_n = зміст кожного класу крупності, %;

m_n = маса коксу даного класу крупності, кг;

m = маса первинної проби коксу, витраченої для випробування, кг.

За даними ситового аналізу, визначення середньої величини шматків проводиться за формулою:

$$d_{ch} = \frac{\sum P_i}{\sum \frac{P_i}{d}}$$

де d_{ch} = середній діаметр шматків коксу, мм;

P_i = Вагові виходи окремих класів, кг;

d = середні діаметри окремих класів, мм.

Ступінь однорідності коксу за кускуватістю, визначають для повної оцінки його ситового складу.

Для більш точної характеристики однорідності коксу за кускуватістю застосовують метод, запропонований І. М. Лазовським, який розроблено з урахуванням статистичних закономірностей розподілу випадкових величин.

P_i – вагові виходи окремих класів, %;

f_i – значення питомих поверхонь окремих класів крупкості;

f_{cp} – середня питома поверхня всього об'єму коксу при даному ситовому складі.

Значення питомої поверхні легко знайти, знаючи середній діаметр шматків коксу.

Чим вище коефіцієнт K , тим рівномірнішою є кускуватість коксу і вищою його газопроникність.

Розрахунковим шляхом за методикою, запропонованою К. І. Сисковим, або експериментально за методом А. С. Брука може бути визначена газопроникність насипної маси коксу.

За даними ситового аналізу коксу, виконаного до і після руйнування в коксовипробувальному барабані, значення газопроникності визначають розрахунковим шляхом. В основу цього розрахунку, з використанням спеціально розроблених таблиць, покладено визначення обсягу міжкускових проміжків та сумарної поверхні шматків.

Втрату напору під час продування стовпа коксу діаметром 0,4 м і заввишки 1,2 м вимірюють за методом А. С. Брука. Для оцінки зміни газопроникності, що відбувається в процесі руйнування коксу, в координатах «втрата напору — число обертів барабана» будують відповідну криву. На графіку площа руйнування коксу обмежується побудованою кривою та зазначеними координатами. За характером зміни цієї кривої, а також за площею руйнування можна дати оцінку якості коксу.

Чим меншою є площа руйнування коксу і чим пологіша крива втрати напору, тим кокс міцніший.

Емпіричну формулу, яку запропонували С. А. Шварц, І. О. Шатуновський та В. П. Онопрієнко, можна застосовувати для оцінки здатності коксу протистояти руйнуванню в доменній печі:

$$\Pi = \frac{(> 60)\%}{(40 - 25)\% + (< 10)\%}$$

де

(>60)%, (40 – 25)%, (<10)% – процентний вміст класів крупності після випробування в малому барабані.

Оцінювати міцність металургійного коксу за зміною його ситового складу, що визначається до і після руйнування в коксовипробувальному барабані, запропонував Н. С. Грязнов.

Такий вигляд має запропонована формула:

$$\Pi = \frac{\sum \gamma d}{\sum \gamma_i d}$$

де d – середні діаметри окремих класів, мм;

γ та γ_i – відповідно вагові виходи окремих класів, до і після руйнування, %.

Стандартні показники, що застосовуються для поточного виробничого контролю, істотно доповнюють наведені методи оцінювання міцності коксу та в окремих випадках можуть використовуватися для аналізу змін у процесі його виробництва.

Ступінь руйнування коксу як у доменній печі, так і під час транспортування значною мірою залежить від тріщинуватості його шматків. Для її визначення використовують метод А. С. Брука та І. С. Мойсіка, який полягає в накладанні градуйованої сітки безпосередньо на поверхню шматка коксу. При цьому окремо оцінюють поздовжню та поперечну тріщинуватість, а їх сумарне значення характеризує загальну тріщинуватість.

Структурна міцність коксу розглядається як міцність його тіла без урахування мікротріщин. Для її визначення кокс після барабанних випробувань подрібнюють до фракції 3–6 мм. Далі у циліндри діаметром 25 мм і висотою 310 мм завантажують дві проби об'ємом по 50 см³ кожна. У кожен циліндр додають по п'ять сталевих куль діаметром 15 мм, після чого здійснюють обертання зі швидкістю 25 об/хв. Після 1000 обертів матеріал розсіюють на ситі з отворами 1 мм. Вихід фракції більше 1 мм, виражений у відсотках, характеризує структурну міцність коксу (Пс).

Ступінь готовності коксу певною мірою визначається його елементарним складом. Готовий кокс містить понад 95,5% вуглецю у горючій масі, а його теплота згоряння становить близько 8000 ккал/кг.

Одним із показників ступеня готовності є вихід летких речовин, який не повинен перевищувати 1,2–1,5% (на горючу масу). Збільшення цього показника свідчить про наявність недопалу, що, у свою чергу, призводить до підвищеного стирання коксу та утворення значної кількості дрібних фракцій.

Вміст води в коксі також регламентується стандартами і, як правило, становить 2–5%. Через більшу питому поверхню дрібних класів коксу вони утримують більше води. Хоча сама по собі вода не чинить суттєвого негативного впливу на доменну плавку, коливання її вмісту можуть значно

впливати на тепловий режим доменної печі. Тому важливою умовою стабільної роботи є забезпечення рівномірного розподілу вологи в коксі.

Суттєвий вплив на результати доменної плавки має вміст сірки в коксі. Особливо негативно вона проявляється при використанні сірчистого коксу та багатих доменних шихт.

За вмісту сірки 2,2–2,5% навіть зміна її концентрації на 0,1% може спричинити збільшення витрати коксу на 25 кг на тонну чавуну, вапняку — на 120 кг, а також зниження продуктивності доменної печі до 5%.

Дослідження показують, що при наближенні коксу до фурм доменної печі з нього видаляється понад 40% сірки, яка виноситься разом із доменним газом. Для більш ефективного видалення сірки необхідно забезпечити оптимальну та рівномірну крупність коксу (а також агломерату), що сприяє покращенню газопроникності шихтового шару. У разі порушення цих умов значна частина сірки залишається у продуктах плавки.

Вміст сірки, як і зольність коксу, переважно визначається її концентрацією у вихідній шихті. У зв'язку з цим для коксу, отриманого з вугілля різних басейнів, встановлюються різні гранично допустимі значення сірки. Найбільш жорсткі вимоги висуваються до ливарного коксу, тоді як для коксу, що використовується у кольоровій металургії, вміст сірки, як правило, не нормується [2].

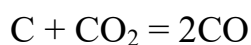
Сірка у вугільних концентратах може перебувати у вигляді мінеральних і органічних сірчистих з'єднань [3].

При термічній підготовці шихти відбувається видалення сірки, що також є важливим процесом, який впливає на якість коксу. Завдяки попередньому нагріву вугільних шихт, сірчистість коксу знижується на 20–30%. Цей ефект досягається через часткове розкладання піриту та органічних сірковмісних речовин при низьких температурах, причому найлегше сірку в летючі продукти віддає вугілля низьких стадій зрілості [4].

Якщо чавун використовується для виробництва спеціальних сталей, кількість фосфору строго обмежується, оскільки він повністю переходить у метал, надаючи йому крихкість (холодноламкість).

1.1.3 Структурні та фізико-механічні характеристики коксу і фактори, що впливають на їх формування

Реакційною здатністю коксу називається здатність його відновлювати діоксид вуглецю:



Від структури коксу та його сумарної поверхні (великості коксу) залежать його горючість та реакційна здатність.

Реакційна здатність коксу підвищується зі збільшенням його пористості. Із зростанням крупності шматків зменшуються їх горючість і сумарна поверхня. Водночас підвищення ступеня графітизації коксу призводить до зниження його реакційної здатності. Як правило, кокс із високою горючістю також є ефективним відновником діоксиду вуглецю, хоча в окремих випадках спостерігаються винятки з цієї залежності.

Існують дані, згідно з якими за температур понад 1000 °С відмінності в горючості та реакційній здатності різних видів коксу істотно згладжуються. У зв'язку з цим деякі фахівці вважають, що ці показники в зоні фурм і в більшій частині відновлювальної зони доменної печі не відіграють вирішальної ролі.

Насипна маса коксу зазвичай становить 400–500 кг/м³ і визначається його пористістю та щільністю окремих шматків. Зі збільшенням середньої крупності та підвищенням однорідності складу насипна маса, як правило, зменшується.

Розрізняють справжню та уявну щільність коксу. Справжня щільність характеризує щільну речовину коксу після подрібнення до стану розкриття найдрібніших пор і становить 1800–2000 кг/м³. Уявна щільність враховує пористу структуру матеріалу і, як правило, знаходиться в межах 800–1000 кг/м³.

Пористість коксу визначається як відношення сумарного об'єму пор до загального об'єму шматка. Зменшення пористості та підвищення щільності призводять до зростання насипної маси, а отже, і до збільшення кількості вуглецю, що надходить у доменну піч з кожною подачею коксу.

Величина пористості має важливе значення для міцності коксу: більш щільний і менш пористий кокс характеризується вищою міцністю. Пористість знижується зі збільшенням тривалості процесу коксування та підвищенням його кінцевої температури, зі зменшенням ступеня подрібнення шихти, а також зі збільшенням насипної маси завантаження і частки вугілля середньої та високої стадії метаморфізму.

Якість доменного, ливарного та інших видів коксу регламентується державними стандартами. Відповідно до цих вимог доменний кокс повинен мати крупність понад 25 або 40 мм. Крім того, нормується вміст дрібних фракцій розміром менше 25 мм, а для коксу з вугілля Печорського басейну та Кавказу також регламентується частка класу 25–40 мм.

Доменний кокс класифікують за вмістом сірки на три марки, за зольністю — на дві групи, а за показниками механічної міцності — на три групи. Бракувальними ознаками є перевищення встановлених норм за зольністю, вологістю, сірчистістю та показником механічної міцності М40. Для коксу з вугілля східних районів передбачено поділ на три марки за зольністю та на дві групи за міцністю. Кокс із вугілля Печорського басейну з добавкою кузнєцького, а також кокс із вугілля Кавказу з добавкою донецького класифікують за міцністю на дві групи.

Ливарний кокс залежно від вмісту сірки поділяють на три марки. Для кожної марки встановлюють такі класи крупності: понад 80 мм, понад 60 мм, понад 40 мм, 60–80 мм та 40–60 мм. До бракувальних показників належать перевищення норм за зольністю, сірчистістю, механічною міцністю та вмістом дрібних фракцій.

Для потреб хімічної та металургійної промисловості (за винятком доменного виробництва) використовують кокс із розмірами шматків 25–40 мм і

понад 25 мм. Залежно від вмісту сірки, зольності та крупності його поділяють на дві марки. Бракувальними є перевищення норм, установлених стандартами, за зольністю, сірчистістю, показником міцності M40 та вмістом дрібних частинок.

На показники міцності, крупності, однорідності гранулометричного складу та вологості коксу, окрім властивостей вугільної шихти, умов її підготовки та процесу коксування, істотно впливають спосіб і місце відбору проб, схема сортування, а також умови транспортування коксу до споживача. У процесі транспортування відбувається випаровування вологи, однак її вміст може зростати у разі тривалого впливу атмосферних опадів під час перевезення у відкритих вагонах.

Фізико-механічні властивості коксу значною мірою залежать від технічного стану обладнання, зокрема ступеня зносу валкових грохотів, величини навантаження на них, ефективності відокремлення дрібних фракцій, а також кількості та висоти перепадів при транспортуванні. У процесі перевантажень, як правило, спостерігається зменшення крупності коксу та підвищення його міцності.

На результати визначення ситового складу та фізико-механічних характеристик коксу також впливають конструкція пробовідбірника, умови транспортування проби та тривалість її перебування на відкритому повітрі, протягом якої відбувається зниження вологості. У зв'язку з цим зазначені фактори необхідно враховувати при порівнянні якісних показників коксу різних підприємств і виробничих підрозділів [2].

Таким чином, якість доменного коксу визначається комплексом фізико-хімічних, хімічних та фізико-механічних показників, які безпосередньо впливають на ефективність доменного процесу.

Забезпечення оптимальних характеристик коксу є необхідною умовою стабільної роботи доменної печі, зниження витрат палива та підвищення якості чавуну. Це обумовлює важливість правильного підбору вугільної сировини та раціонального формування складу вугільних шихт.

1.2 Характеристика сировинної бази та аналіз впливу технологічних факторів на властивості коксу

Кам'яне вугілля використовується як основна сировина для процесу коксування, на що спрямовується близько 25 – 30 % від загального обсягу його видобутку. У результаті коксування отримують кокс, який застосовується як твердий відновник у металургійному виробництві та як бездимне паливо в побуті, а також ряд хімічних продуктів.

Основними технологічними параметрами класифікації вугілля для коксування є:

1. вихід летких речовин на бензольну масу V^{daf} (%),
2. товщина пластичного шару Y (мм),
3. показник спіклівості Рога (RI),
4. питома теплота згоряння Q_s^{daf} (кДж/кг) і для бурого вугілля – волога загальна W_r^t (%).

Вугілля класифікують за марками та групами відповідно до встановлених класифікаційних показників. При цьому вугілля однойменних марок різних басейнів характеризується відмінними межами цих показників. У зв'язку з цим вугілля з різних родовищ, навіть за однакових значень параметрів, у процесі технологічного використання може формувати кокс з різними фізико-механічними властивостями.

Згідно з ДСТУ 3472-96 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит», поділ вугілля України на марки здійснюється з урахуванням комплексу показників. До них належать середній показник відбивання вітриніту (R_0), вихід летких речовин (V^{daf}), теплота згоряння на сухий беззольний (Q_s^{daf}) або вологий беззольний стан (Q_s^{af}), а також спіклівість. Оцінка спіклівості проводиться за товщиною пластичного шару (Y) та індексом Рога (RI). Відповідно до зазначених параметрів вугілля класифікується за марками.

Таблиця 1.1

Класифікація кам'яного вугілля за марками

Марка вугілля	Позначення	R_o , %	V^{daf} , %	``Y``, мм	RI	Q_s^{daf} , МДж/кг
Буре	Б	<0,40	50-70	-	-	<24,0*
Довгополуменеве	Д	0,40-0,60	35-50	<6	-	-
Довгополуменеве газове	ДГ	0,50-0,80	35-48	6-9	-	-
Газове	Г	0,50-1,00	33-46	10-16**	-	-
Жирне	Ж	0,85-1,20	28-36	17-38	-	-
Коксівне	К	1,21-1,60	18-28	13-28	-	-
Піснувато спікливе	ПС	1,30-1,90	14-22	6-12	13-50	-
Пісне	П	1,60-2,59	8-18***	<6	<13	35,2-36,5
Антрацит	А	2,60-5,60	<8	-	-	<35,2

* – Q_s^{af} – для зволоженого вугілля;

** – при значенні показника $R_o < 0,83$ % та $Y = 16$ мм вугілля належить до марки Г;

*** – при $V^{daf} < 8$ % та $Q_s^{daf} < 35,2$ МДж/кг вугілля належить до марки П.

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[5]

Якість вугілля та продуктів його збагачення оцінюється за такими показниками, як зольність, вологість, вміст сірки, вихід летких речовин і питома теплота згоряння. Основним критерієм якості при переробці є зольність, яка характеризує як рядове вугілля, так і концентрати, шихту та готову продукцію.

Для коксування вугілля зольність не повинна перевищувати 8–10 %, оскільки її підвищення призводить до збільшення витрат коксу та зниження продуктивності доменної печі. В енергетиці використовують менш якісне вугілля, при цьому допустима зольність становить до 45 % для пилоподібного спалення і до 37,5 % — для шарового. Для спеціальних процесів вимоги жорсткіші: при виробництві синтетичного палива зольність має бути не більше 5–6 %, а для електродів — 2–3 %.

Сірка є шкідливою домішкою, оскільки переходить у кокс і метал, погіршуючи їхні властивості, підвищуючи витрати сировини та знижуючи ефективність доменного процесу. Вологість негативно впливає на коксування, зменшує вихід коксу і продуктивність печей, тому її вміст не повинен перевищувати 8 %.

Вихід летких речовин є важливою класифікаційною характеристикою вугілля і визначає його технологічні властивості, зокрема реакційну здатність і придатність до коксування, при цьому він зменшується зі зростанням ступеня метаморфізму.

У процесі збагачення основні показники якості, такі як зольність, сірчистість і вологість, можуть бути знижені до рівня, що відповідає вимогам споживачів [5].

Що до впливу технологічних факторів на показники CRI/CSR, у результаті багаторічних досліджень встановлено, що на металургійні властивості коксу, зокрема його реакційну здатність і міцність, впливають такі основні чинники: комплекс властивостей вугільної шихти, а саме зольність, сірчистість, склад мінеральної частини, вихід летких речовин, товщина пластичного шару, показники петрографічного аналізу, а також технологія підготовки шихти і процесу коксування, зокрема період коксування, температурний режим у системі опалення, рівномірність прогрівання засипки по висоті та довжині камери, кінцевий рівень температури по осі коксового пирога, ступінь готовності коксу, тобто рівень впорядкованості його структури.

Якісний металургійний кокс повинен мати оптимальну реакційну здатність і високу термомеханічну міцність, при цьому підвищення зольності шихти зумовлює зростання реакційної здатності коксу та зниження його післяреакційної міцності [6].

Для визначення залежностей між продуктивністю доменної печі та витратою коксу значення реакційної здатності змінювалися в межах 28–45 % (рис. 1.1). Встановлено, що зі збільшенням реакційної здатності коксу на 17 % спостерігається зниження продуктивності печі на 234,1 т чавуну за добу, що

становить 9,44 %, водночас витрата коксу зростає на 55,02 кг/т чавуну, або на 11,48 %.

Таким чином, підвищення реакційної здатності на кожен 1 % призводить до зменшення продуктивності приблизно на 0,555 % і одночасного збільшення питомої витрати коксу на 0,675 %.

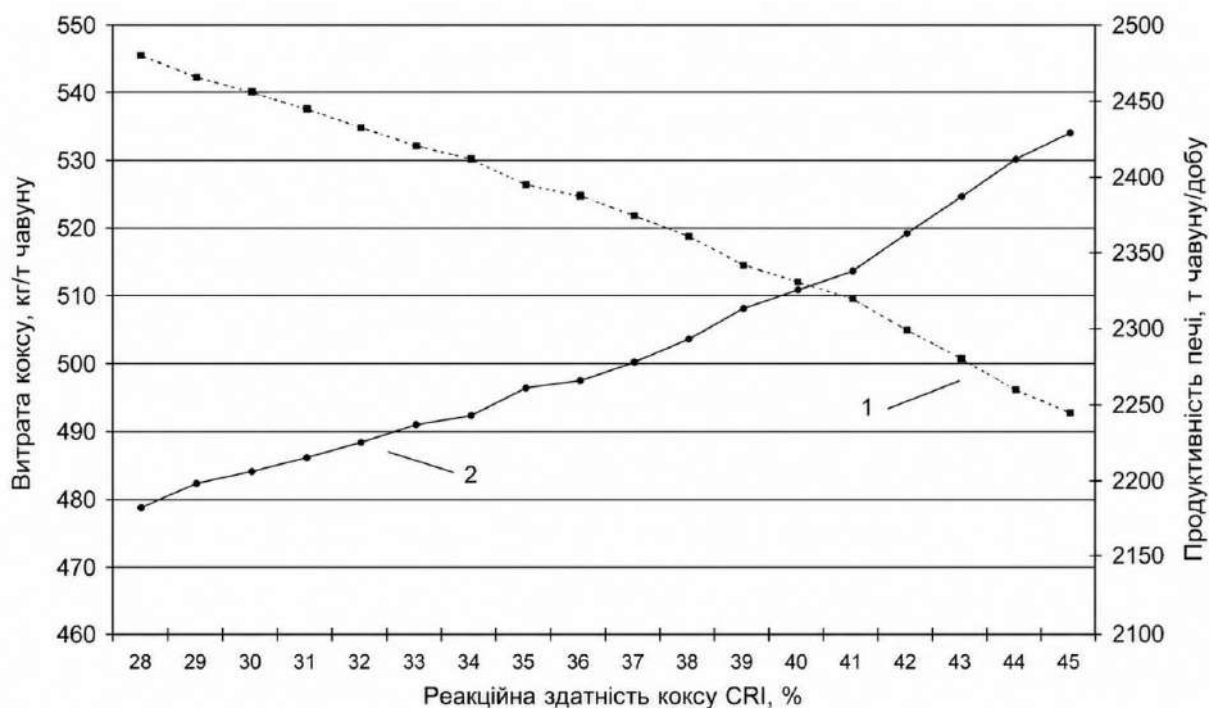


Рис. 1.1. Вплив реакційної здатності коксу на продуктивність (1) та витрату коксу (2) у доменній печі

Примітка. Джерело: розроблено із використанням [6]

Очевидно, що зниження реакційної здатності коксу є економічно доцільним, оскільки це сприяє підвищенню ефективності доменного процесу, у зв'язку з чим актуальним напрямом є вдосконалення технології виробництва коксу з пониженими значеннями даного показника.

1.3 Принципи формування вугільних шихт та їх вплив на якість коксу

Вугільна шихта являє собою суміш вугілля різних марок, що беруться у встановлених співвідношеннях для отримання коксу заданої якості.

Газове вугілля відзначається відносно малою товщиною пластичного шару, високим виходом летких речовин та підвищеною усадкою. Кокс, отриманий із такого вугілля, характеризується високою реакційною здатністю. Наявність газового вугілля у шихті сприяє збільшенню усадки коксового «пирога», що полегшує його видачу з печі, а також підвищує вихід газу та хімічних продуктів коксування. Водночас збільшення його частки призводить до зниження виходу коксу.

Жирне вугілля є основним компонентом шихти, оскільки забезпечує належну спікливість і підвищує міцність коксу. За надмірного його вмісту кокс стає більш тріщинуватим і дрібнокусковим. Також цей тип вугілля сприяє збільшенню виходу смоли, бензолу та газу.

Коксове вугілля забезпечує формування необхідної механічної міцності коксу та сприяє отриманню однорідної кускуватості.

Вугілля марки ПС зменшує усадку, що дозволяє знизити тріщинуватість коксу та підвищити його крупність, однак при цьому зростає стиранність коксу, а вихід газу та хімічних продуктів зменшується.

Загалом оптимальний склад вугільної шихти для отримання високоякісного коксу становить: Г – 30 %, Ж + К – понад 50 %, ПС – решта.

Однією з важливих стадій підготовки вугільної шихти до коксування є її усереднення, яке полягає у вирівнюванні технологічних властивостей суміші по всьому об'єму.

Для оцінювання ступеня усереднення вугілля зазвичай використовують коефіцієнт усереднення, що визначається як відношення середньоквадратичного відхилення показника до та після процесу усереднення.

Рівень однорідності компонентів у вугільній шихті також можна оцінювати за показниками технічного аналізу, зокрема за вмістом золи (A^d) та

летких речовин (V^d), які підпорядковуються правилу адитивності. За високого ступеня усереднення розрахункові значення цих показників і дані експериментальних вимірювань мають бути близькими. Додатково для оцінки усереднення може застосовуватися аналіз гранулометричного складу вугілля [7].

Кокс у доменному виробництві є ключовим енерготехнологічним матеріалом, що виконує одночасно функції відновника та джерела тепла. У процесі плавки його менша частина витрачається на відновні реакції, тоді як основна маса згоряє з утворенням CO_2 , забезпечуючи необхідний тепловий баланс печі. Водночас утворений вуглекислий газ у зоні високих температур відновлюється до CO при контакті з розжареним коксом. Окрім енергетичної та хімічної ролі, кокс виконує важливу механічну функцію, формуючи газопроникний каркас шихти та забезпечуючи рівномірний розподіл газових потоків у доменній печі.

Якість доменного коксу характеризується комплексом фізико-механічних та хімічних показників, серед яких міцність (M25, M10), реакційна здатність (CRI), міцність після реакції (CSR), гранулометричний склад, а також вміст золи та сірки. Досягнення високих експлуатаційних властивостей коксу забезпечується через раціональне формування вугільної шихти, коригування властивостей її компонентів і застосування спеціальних методів підготовки сировини перед коксуванням.

Встановлено, що оптимальна структура вугільної шихти передбачає використання вугілля різного ступеня метаморфізму у визначених співвідношеннях: низькометаморфізоване вугілля (до 15%) забезпечує необхідну усадку та формування коксового кеку; середньометаморфізоване вугілля (50–60%) є основною спікаючою складовою шихти; високометаморфізоване вугілля (15–20%) сприяє підвищенню міцності коксу та зменшенню його розтріскування. Таким чином, саме баланс між цими групами визначає кінцеву якість отриманого коксу.

Формування шихти здійснюється з урахуванням показників спікання, петрографічного складу, ступеня метаморфізму та технологічних властивостей

окремих компонентів. При цьому враховуються вимоги доменного виробництва до кінцевих характеристик коксу, зокрема його міцності, реакційної здатності та вмісту шкідливих домішок.

Практичний досвід показує, що для отримання коксу з високими показниками міцності ($M_{25} \approx 87\text{--}89\%$), низьким стиранням ($M_{10} \approx 6,5\text{--}7\%$), зольністю до 11%, вмістом сірки до 1%, а також оптимальними значеннями CSR (65–70%) і CRI (25–30%) необхідно забезпечити відповідні параметри вугільної шихти: зольність до 8,4%, сірка до 1,1%, вихід летких речовин до 27–28%, відбиття вітриніту $R_o \geq 1\%$ та оптимальні показники клінкерування.

Водночас формування оптимального складу шихти ускладнюється обмеженістю ресурсів високоякісного коксівного вугілля з низьким вмістом сірки та золи, що призводить до його дефіциту та зростання вартості. У зв'язку з цим актуальним є розширення сировинної бази за рахунок використання альтернативних компонентів і вдосконалення технологій підготовки вугільних шихт [8].

1.4 Літературний огляд методів дослідження пластично-в'язких властивостей вугілля

Пластично-в'язкі властивості вугілля — це здатність певних видів кам'яного вугілля переходити в пластично-в'язкий (напіврідкий) стан при нагріванні без доступу повітря. Цей процес лежить в основі коксування та є ключовим для металургійної промисловості.

Пластично-в'язкі характеристики компонентів (таблиця 1.2) оцінювали на основі показників товщини пластичного шару (Y), індексу Рога (RI), індексу вільного спучування (FSI), величин контракції/дилатації за методом Одібера–Арну (a/b), а також плинності, визначеної методом Гізелера (F) [9].

Показник товщини пластичного шару — один із найчутливіших параметрів якості вугілля, на величину якого впливають стадії метаморфізму,

петрографічний склад, ступінь відновленості, а також зольність та окисленість вугілля [10].

Метод Рога належить до основних критеріїв оцінювання якості вугілля, призначеного для коксування. Визначений індекс Рога (RI) відображає здатність вугілля зв'язувати інертні складові та формувати міцну коксову структуру, що має вирішальне значення під час підбору компонентів вугільних шихт для коксохімічного виробництва [11].

Індекс вільного спучування (FSI) є показником спікливості вугілля, який визначають за формою нелеткого залишку, що утворюється під час швидкого нагрівання зразка в тиглі до заданої стандартом температури. Оцінювання здійснюють шляхом порівняння отриманого контуру із контурами еталонних зразків.

Даний показник належить до основних параметрів Міжнародної системи кодифікації вугілля середнього та високого рангів, а також використовується як додатковий класифікаційний критерій відповідно до ГОСТ 25543–88 [12].

Метод Одібера–Арну — це спосіб оцінювання спікливості та термопластичних властивостей кам'яного вугілля, який ґрунтується на вимірюванні зміни довжини вугільного зразка під час його нагрівання в стандартних умовах. Він дозволяє визначити показники контракції та дилатації, а також температурні інтервали пластичності вугілля.

Плинність, визначена методом Гізелера (F), характеризує здатність вугілля переходити у пластичний стан та текти при нагріванні і визначається за швидкістю обертання мішалки у пластичній масі в умовах сталого крутного моменту. Цей показник відображає опір пластичної маси деформації та є важливою характеристикою термопластичних властивостей вугілля [10].

Пластично-в'язкі властивості вугільних концентратів

Найменування	Марка	Товщина пластич.шару, мм	Індекс Рога, од.	Індекс вільного спучування, од.
		Y	RI	FSI
GZh1	ГЖ	19	71	6
GZh2	ГЖ	20	66	6
GZh3	ГЖ	21	64	6
GZh4	ГЖ+Ж	20	67	6 ½
Zh1	Ж	24	72	6
Zh2	Ж	25	61	6 ½
K1	КС	10	38	3 ½
K2	К	11	29	1
K3	КП	10	37	4
K4	К	12	31	1 ½
K5	К	13	45	4 ½
PS1	ПС	12	39	5
PS1	КС	6 (менше 6)	18	½
Флотоконцентрат	-	10	37	3 ½
Шлам	-	6	15	2 ½

Продовження таблиці 1.2

Найменування	Марка	Ділатометричні показники за методом Одібера-Арну					Пластичні властивості за методом Гізелера				
		t _I °C	t _{II} °C	t _{III} °C	a, %	b, %	F _{max} , ddpm	t ₁ , °C	t _{max} , °C	t ₃ , °C	Δt, °C
GZh1	ГЖ	367	414	472	34	147	5633	388	439	478	90
GZh2	ГЖ	370	415	469	34	137	8967	389	440	475	86
GZh3	ГЖ+Ж	365	413	470	25	158	9613	390	435	474	84
GZh4	Ж	377	416	482	29	185	1055 ₄	385	444	480	95
Zh1	Ж	370	417	473	31	208	1397 ₅	381	445	483	102
Zh2	КС	374	414	472	34	196	7651	392	445	482	90
K1	К	202	500	-	19	-	-	-	-	-	-
K2	КП	412	500	-	11	-	-	-	-	-	-
K3	К	426	500	-	7	-	-	-	-	-	-
K4	К	416	500	-	17	-	2	431	447	472	41
K5	ПС	415	500	-	20	-	9	414	457	483	69
PS1	КС	423	500	-	24	-	-	-	-	-	-
PS1	-	454	500	-	11	-	-	-	-	-	-
Флото концентрат	-	424	500	-	21	-	-	-	-	-	-
Шлам	-	453	500	-	6	-	-	-	-	-	-

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[9]

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найвищі пластично-в'язкі властивості характерні для вугілля марки Ж, тоді як найнижчі — для спіктивного вугілля. Це узгоджується з раніше встановленими закономірностями зміни плинності вугілля на різних стадіях метаморфізму.

Зокрема, вугільні концентрати марки Ж, які мають значну товщину пластичного шару (24–25 мм), відзначаються також високими значеннями індексу Рога ($RI \approx 61–72$ од.), індексу вільного спучування ($FSI \approx 6–6,5$), дилатації за методом Одібера–Арну ($b = 185–208$ %), а також високою плинністю ($F \approx 7651–13975$ ddpm). Інтервал пластичності при цьому становить $\Delta t = 90–102$ °C.

Для вугільних концентратів пісного вугілля характерні значно нижчі показники: індекс Рога (RI) становить 15–18 од., товщина пластичного шару (Y) — 6–12 мм, індекс вільного спучування (FSI) — близько 0,5–5 од. При цьому дилатація за методом Одібера–Арну та пластичність за методом Гізелера не визначаються.

Слід зазначити, що жоден зі зразків вугілля марок К і ПС не продемонстрував максимального розширення (дилатації b), тому оцінювання їх трамбувальної здатності за цим показником є недоцільним. Водночас її можна прогнозувати за величиною максимального стиснення (контракції a).

Зразки шламу та флотоконцентрату також характеризуються низькими пластично-в'язкими властивостями, подібними до вугілля марки ПС. У зв'язку з цим вони можуть використовуватися у складі шихти як опіснюючі добавки, що сприяють формуванню структури коксу та підвищенню його виходу.

Вугільні концентрати марки К мають невелику товщину пластичного шару (10–13 мм), що відповідає їх низьким пластично-в'язким характеристикам. Зокрема, індекс Рога становить приблизно 29–45 од., індекс вільного спучування — 1–4,5 од., дилатація за методом Одібера–Арну відсутня. Плинність ($F = 2–9$

поділок шкали) зафіксована лише для концентратів К4 та К5, причому інтервал пластичності для них становить $\Delta t = 41$ та 69 °С.

Водночас доцільно окремо підкреслити, що вугілля газової групи (марка ГЖ) характеризується високими пластично-в'язкими показниками за всіма досліджуваними параметрами: товщина пластичного шару становить $Y \approx 19-21$ мм, індекс Рога — $RI \approx 64-71$ од., індекс вільного спучування — $FSI \approx 6-6,5$, дилатація за методом Одібера–Арну — $b = 137-185$ %, а плинність — $F \approx 5633-10554$ поділок шкали. Інтервал пластичності при цьому знаходиться в межах $\Delta t = 84-95$ °С, що свідчить про їх близькість до показників вугілля марки Ж.

З огляду на наведені дані, вугілля марки ГЖ може бути рекомендоване як основний спікливий компонент при формуванні вугільних шихт. Натомість частка вугілля марки Ж у шихтах, призначених для трамбування, доцільно обмежувати на рівні близько 10 %. Такий підхід є обґрунтованим не лише з економічної точки зору, але й з технологічної, оскільки, як відомо, вугілля марки ГЖ характеризується нижчими показниками тиску розпирання порівняно з жирним вугіллям. Це має особливе значення при застосуванні технології трамбування шихти, де надлишковий тиск може негативно впливати на перебіг процесу коксування [9].

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Детальна характеристика та теоретичні основи методу Гізелера як інструменту аналізу вугілля

2.1.1 Сутність та принцип методу Гізелера

У практиці багатьох країн широко застосовується метод, запропонований К. Гізелером. Його сутність полягає у визначенні в'язкісних характеристик (рухливості) пластичної маси вугілля (Рис. 2.1) за величиною опору деформації при дії сталого навантаження.

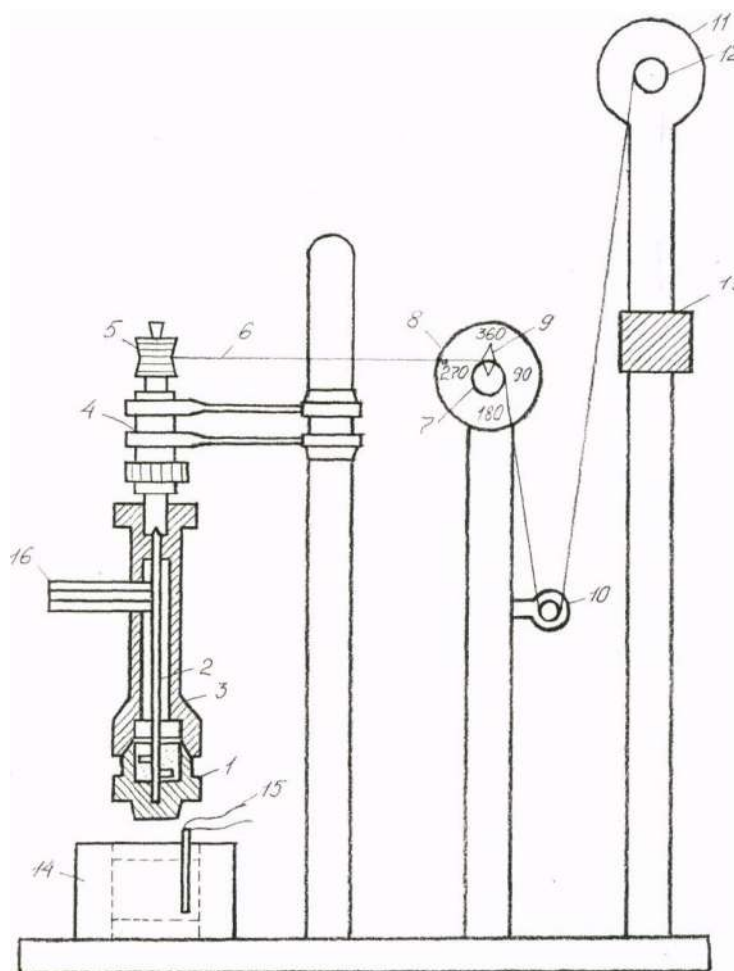


Рис. 2.1 Установка для визначення в'язкості вугілля за методом Гізелера

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[13]

На реторту зі штоком нагвинчується циліндричний корпус 3, який через головку з підшипниками 4 з'єднується зі штоком, а також із котушкою 5 і тросиком 6, що перекинутий через шків 7 з диском 8, на якому розміщена стрілка приладу. До тросика, який проходить через ролики 10, 11 і 12, підвішується вантаж 13. Маса вантажу може змінюватися залежно від мети дослідження та пластичних властивостей досліджуваного вугілля.

Коло диска є нерухомим і розділене на 360 поділок. Для нагрівання зразка використовується електрична піч 14, яка оснащена шихтовими спіралями, що підключаються через автотрансформатор. За потреби для контролю сили струму в електричне коло послідовно вмикається амперметр.

Внутрішній простір печі заповнений сплавом олова та свинцю у співвідношенні 1:1. Контроль температури здійснюється за допомогою термопари, з'єднаної з мілівольтметром. Продукти термічного розкладу вугілля відводяться через отвори 15.

Метод Гізелера відзначається простотою апаратурного оформлення та зручністю проведення експериментальних досліджень. За його допомогою визначають такі основні показники:

- а) температуру початку розм'якшення;
- б) температуру переходу у твердий стан;
- в) інтервал пластичного стану;
- г) температуру, що відповідає максимальній пластичності;
- д) величину максимальної пластичності [13].

Зазначений метод випробування має емпіричну природу та потребує ретельного калібрування обладнання для забезпечення достовірного визначення текучості вугілля. Саме цей показник найбільш повно відображає відносний пластичний стан матеріалу.

Метод Гізелера є стандартизованим способом визначення пластично-в'язких властивостей кам'яного вугілля при його нагріванні в контрольованих умовах. Його застосування базується на безперервному вимірюванні опору

пластичної маси вугілля обертання мішалки, що дозволяє кількісно оцінити текучість та характер змін фізичного стану вугілля в процесі термічної обробки.

2.1.2 Апаратурне забезпечення методу Гізелера

Реторта пластометра Гізелера являє собою конструкцію, що складається з кількох основних елементів (Рис. 2.2). Основним робочим вузлом є тигель, який має циліндричну форму з внутрішнім діаметром $(21,4 \pm 0,1)$ мм і глибиною $(35,0 \pm 0,3)$ мм. У верхній частині тигля виконано зовнішнє різьблення, призначене для з'єднання з кришкою. У центрі дна тигля передбачене конічне заглиблення з кутом при вершині 70° і діаметром по поверхні дна $(2,38 \pm 0,2)$ мм, яке виконує функцію опори для мішалки [14].

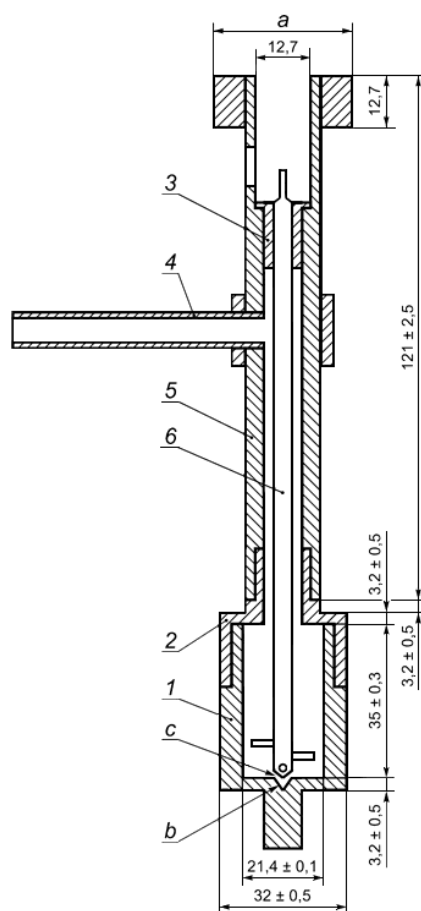


Рис. 2.2 Реторта

1 - тигель; 2 - кришка тигля; 3 - напрямна втулка; 4 - трубка відводу газу; 5 - циліндричний кожух; 6 - металева мішалка; а - діаметр муфти (підганяється

замісцем); b - кут при вершині 70° ; c - 16 мм зазор між нижньою лопаттю і дном тигля

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[14]

Кришка тигля має внутрішню різьбу для з'єднання з тиглем та зовнішню різьбу для кріплення кожуха. У центральній частині кришки розташовано отвір діаметром $(9,5 \pm 0,1)$ мм, через який проходить вал мішалки.

Напрямна втулка встановлюється (запресовується) у верхній частині кожуха і забезпечує центрування вала мішалки з невеликим зазором у межах 0,05–0,10 мм. У стінці кожуха передбачено отвір, розташований приблизно посередині його довжини, який використовується для відведення летких речовин; за потреби в нього може бути встановлена додаткова трубка.

Кожух має циліндричну форму довжиною $(121,0 \pm 2,5)$ мм і внутрішнім діаметром $(9,5 \pm 0,1)$ мм. Верхня його частина розширена до внутрішнього діаметра 12,7 мм і має заглиблення для встановлення прямої втулки, через яку проходить мішалка у зібраному стані приладу.

Мішалка виготовлена зі сталі та складається з прямого вала діаметром $(3,95 \pm 0,05)$ мм, на якому закріплено чотири лопаті.

Нижній кінець мішалки виконується у вигляді конуса з кутом 60° . Лопаті мають діаметр $(1,60 \pm 0,05)$ мм і довжину $(6,4 \pm 0,05)$ мм та встановлюються перпендикулярно до осі вала. Найнижча лопать розміщується із зазором $(1,60 \pm 0,05)$ мм від дна тигля у нерухомому положенні мішалки.

Кожна наступна лопать повернута відносно попередньої на кут 90° і розташована вище неї на відстані $(3,2 \pm 0,05)$ мм по висоті. Лопаті повинні бути чистими, без видимих пошкоджень і перевірятися перед кожним випробуванням. Їхні розміри мають відповідати вимогам стандарту (Рис. 2.3) та контролюватися після кожних 50 вимірювань. У разі виявлення відхилень від встановлених розмірів лопаті підлягають заміні або мішалка вибраковується.

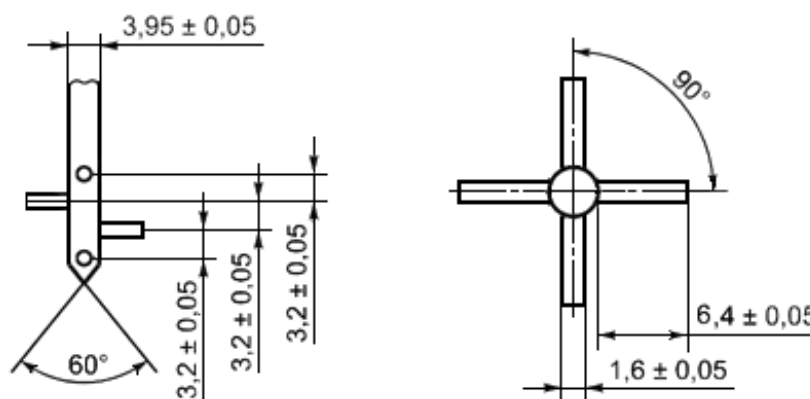


Рис. 2.3 - Лопаті металевої мішалки

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[14]

Головка пластометра, наведена схематично на рис. 2.4, включає двигун із постійною частотою обертання (приблизно 300–500 об/хв), який безпосередньо з'єднаний з електромагнітною муфтою або гістерезисним гальмом. Гальмо має забезпечувати регулювання крутного моменту до 101,6 г·см (9,66 Н·м). На вихідному валу гальма встановлено барабан із поділками, при цьому один повний оберт (360°) поділений на 100 рівних частин.

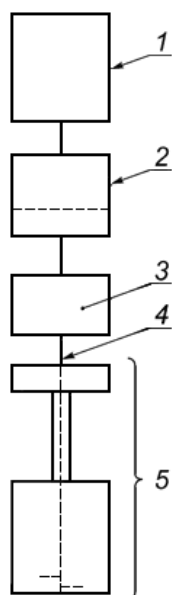


Рис. 2.4 Головка пластометра

1 - мотор; 2 - муфта зчеплення або гальма; 3 - барабан з поділками або електронний сенсор; 4 - вал; 5 - реторта в зборі

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[14]

Кожен повний оберт барабана або 100 поділок ходу фіксується лічильником, який приводиться в дію електронним індикатором або іншим відповідним способом. Як альтернативу може застосовуватися електронний прилад для вимірювання швидкості обертання в діапазоні 0,01–300 об/хв, що підключається до вихідного валу гальма або муфти. У такому випадку значення швидкості може безпосередньо перетворюватися у величини кд/хв і відображатися на дисплеї або реєструватися за допомогою принтера.

Примітка: під час експлуатації та змащування всіх підшипників необхідно дотримуватися обережності, особливо після випробувань вугілля з високим вмістом летких речовин. Використання закритих підшипників є небажаним через підвищене тертя та знос порівняно з відкритими. При застосуванні відкритих підшипників необхідне їх регулярне очищення та своєчасна заміна.

Електрична піч (Рис. 2.5) застосовується з системою електричного нагрівання та відповідними регуляторами, що забезпечують підтримання швидкості нагрівання $(3,0 \pm 0,1) ^\circ\text{C}/\text{хв}$ у діапазоні температур 300–550 $^\circ\text{C}$.

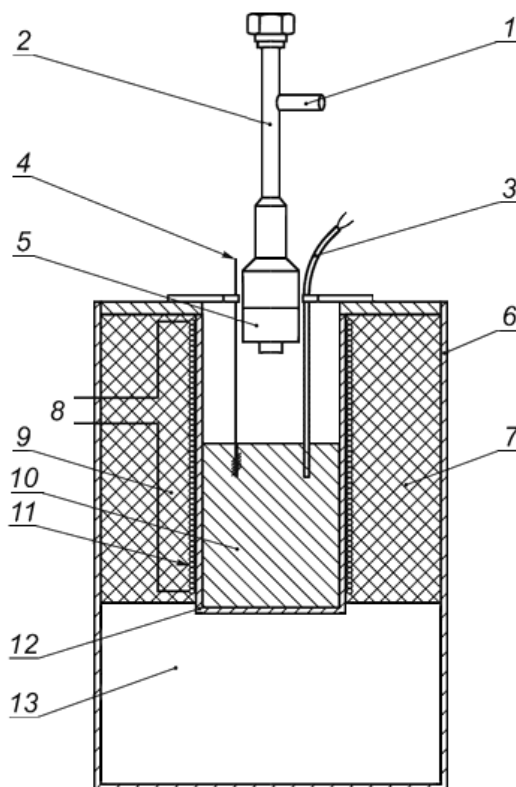


Рис. 2.5 Піч і реторта

1 - трубка для виходу газу; 2 - циліндричний кожух; 3 - чохол термопар; 4 - мішалка ванни; 5 - тигель реторти; 6 - кожух печі; 7 - теплоізоляція; 8 - вихід на контроль нагріву; 9 - обмотка нагрівача; 10 - ванна з припоєм; 11 - шар ізолятора (слюда); 12 - корпус ванни з низьковуглецевої сталі; 13 - блок з вогнетрива

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[14]

Піч містить ванну з розплавленим припоєм, що складається приблизно з 50 % свинцю та 50 % олова. Температуру в цій ванні вимірюють за допомогою термопар, розміщеної в захисній трубці із зовнішнім діаметром близько 6 мм. Трубка занурюється у ванну таким чином, щоб вона контактувала із зовнішньою стінкою тигля, а гарячий спай термопар знаходився на рівні центру вугільного заряду.

Для забезпечення рівномірності температури припій перемішують за допомогою окремої мішалки.

Завантажувальний пристрій призначений для рівномірного засипання вугілля в тигель. У процесі підготовки проби вугілля ущільнюється вантажем масою 10 кг. Конструкція пристрою повинна забезпечувати можливість легкого вилучення тигля після завантаження без порушення структури вугільного шару.

Пристрій, наведений на рис. 2.6, включає статичне навантаження масою 9 кг та вантаж падіння масою 1 кг, який здійснює 12 ударів з висоти 115 мм.

Примітка: статичне навантаження 9 кг відповідає сумарній масі всіх нерухомих елементів пристрою, що передають тиск на вугільну пробу.

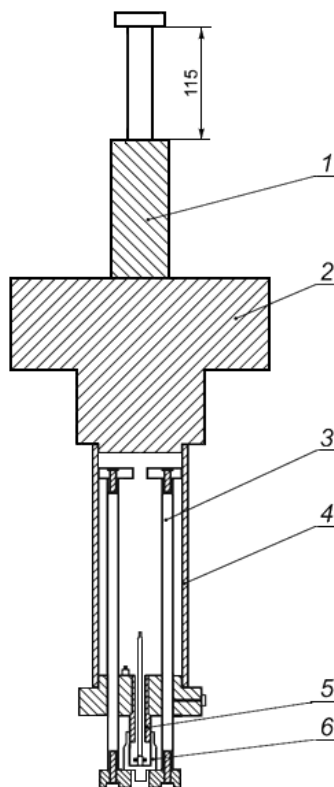


Рис. 2.6 Типовий завантажувальний пристрій

1 – вантаж, що падає (1 кг); 2 – статичний вантаж (9 кг); 3 – ковзний шток; 4 – обойма; 5 – ущільнювальна головка (підігнана до діаметра тигля із зазором 0,5 мм); 6 – тигель із завантаженим вугіллям та мішалкою

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[14]

Калібрування крутного моменту виконується методом шківів з ниткою (Рис. 2.7). У цьому способі горизонтально встановлений шків закріплюється на спеціальному шпинделі, який з'єднаний із джерелом крутного моменту (двигуном пластометра, гальмом або індикатором моменту). Шків має діаметр по канавці 50,8 мм (радіус 25,4 мм). Нитка, що охоплює шків, перекидається на вертикально розташований шків і з нього звисає вниз. На кінець нитки підвішується вантаж масою 40 г.

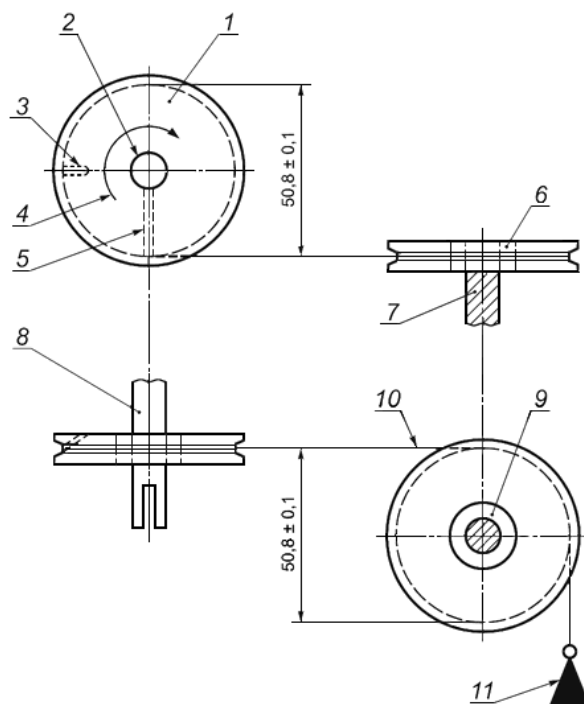


Рис. 2.7 Метод Шківа

1 – привідний шків; 2 – центральний отвір для встановлення та центрування шківа на осі; 3 – місце кріплення нитки до шківа; 4 – напрямок обертання; 5 – фіксувальний гвинт; 6 – передавальний шків (алюмінієвий); 7 – опорний вал передавального шківа; 8 – вал із прорізом; 9 – закритий кульковий підшипник; 10 – нитка шківа, розрахована на навантаження до 3 кг; 11 – підвішений вантаж ($40 \pm 0,1$) г

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[14]

Під час роботи двигуна пластометра показник крутного моменту повинен становити $(101,6 \pm 5)$ г·см (або (40 ± 2) г·дюйм). Таку перевірку необхідно виконувати періодично для всіх приладів із метою контролю стабільності та правильності крутного моменту.

Також допускається перевірка крутного моменту за допомогою манометра або перетворювача, за умови його попереднього калібрування методом шківа з ниткою. При застосуванні цього способу вимірювання проводять щонайменше у двох положеннях, зміщених на 90° одне відносно одного, щоб перевірити співвісність привідного валу та роботу підшипників. Різниця в показаннях

свідчить про можливі порушення, які необхідно усунути, оскільки вони можуть призвести до зниження значень текучості.

Примітка: метод шків з ниткою є єдиним надійним способом оцінювання крутного моменту при повному оберті на 360° .

2.1.3 Методика підготовки зразка та проведення випробування

Підготовка зразка.

Пробу вугілля відбирають згідно з ISO 18283 та ISO 13909. Близько 4 кг матеріалу подрібнюють до проходження через сито 4,75 мм, отримуючи лабораторну пробу, репрезентативну для партії. Зразок розподіляють тонким шаром і висушують до рівноваги з атмосферою лабораторії при температурі не вище 40°C , щоб уникнути окислення та зміни пластичних властивостей.

Після висушування пробу ділять на частини приблизно по 500 г, одну з яких додатково подрібнюють і просіюють до крупності менше 425 мкм. Подрібнення проводять поетапно з чергуванням помолу та просіювання до отримання потрібної фракції, контролюючи, щоб надмірне подрібнення не перевищувало встановлені межі. Отриманий матеріал ретельно перемішують і відбирають невеликі навіски не менше 5 г. Випробування виконують у двох паралельних зразках не пізніше ніж через 8 годин після підготовки, щоб мінімізувати вплив окислення; за потреби застосовують інертне середовище або охолодження.

Процедура випробування.

Встановлюють заданий крутний момент $(101,6 \pm 5,0)$ г·см. У завантажувальний пристрій поміщають тигель із мішалкою та засипають 5 г підготовленого вугілля. Після встановлення мішалки та ущільнюючих елементів пробу ущільнюють спочатку статичним навантаженням, а потім серією ударів падаючого вантажу.

Далі тигель герметично збирають, приєднують до реторти та встановлюють у піч так, щоб він був занурений у розплавлений припій. Після

стабілізації температури ванни нагрівання проводять із заданою швидкістю ($3 \pm 0,1$) °C/хв. Під час нагріву реєструють зміну швидкості обертання мішалки залежно від температури до повної зупинки обертання, фіксуючи відповідні значення для подальшого аналізу пластичних властивостей вугілля.

Очищення апарата.

Після кожного випробування мішалку та реторту необхідно очищати від залишків вуглецю.

Якщо під час роботи відбувається зменшення внутрішнього діаметра газовідвідної трубки, її слід відновити до необхідних розмірів.

Шарикопідшипники після кожних 100 випробувань потрібно очищати, злегка змащувати мастилом або, за необхідності, замінювати.

Кожух термопари слід періодично перевіряти (після кожних 100 випробувань), щоб переконатися у відсутності корозійних пошкоджень.

Обчислення та подання результатів.

Спостереження швидкості обертання мішалки перераховують у кд/хв. Оскільки текучість вугілля змінюється в широкому діапазоні, її значення зручно відкладати на логарифмічній шкалі по осі ординат, тоді як температуру — на лінійній шкалі по осі абсцис.

Кожне визначення виконують двічі, після чого результати усереднюють як середньоарифметичні значення. У звіт включають характерні температури (з точністю до 1 °C): початок розм'якшення, максимум і кінець текучості, температуру затвердіння та інтервал пластичного стану.

Максимальну текучість (кд/хв) подають як середнє значення з округленням залежно від діапазону вимірювань. За потреби її можуть представляти у вигляді десяткового логарифма з двома знаками після коми (для значень понад 1,0 кд/хв). Також у звіті зазначають дату відбору проби та проведення випробування, а у випадках, коли максимальну текучість визначити неможливо, обов'язково вказують причини.

Повторюваність та відтворюваність.

Результати повторних випробувань, виконаних в одній лабораторії одним оператором на одній пробі, повинні збігатися в межах 7 °С для характерних температур. Логарифми значень максимальної текучості також повинні відповідати встановленим межам повторюваності (Табл. 1).

Таблиця 2.1

Точність методу

Характеристики, що визначаються	Максимально допустимі відхилення результатів при повторних визначеннях	
	Повторюваності (в межах однієї лабораторії) $\log_{10}$ кд/хв	Відтворюваність (між різними лабораторіями) $\log_{10}$ кд/хв
Максимальна текучість < 20 кд/хв	0,3	0,7
Від 20 кд/хв до 10000 кд/хв	0,1	0,3
> 10000 кд/хв	0,2	0,4
Температурні точки	7 °С	12 °С

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[14]

Якщо розбіжності перевищують допустимі значення, виконують додаткову серію визначень; у разі подальших відхилень результат усереднюють за всіма отриманими даними. При явищах заклинювання або руйнування проби додаткові вимірювання не проводять.

Відтворюваність результатів є орієнтовною через особливості обладнання та умов випробувань, і її точні межі встановити складно [14].

Таким чином, метод Гізелера є комплексним інструментом для оцінювання пластично-в'язких властивостей вугілля в умовах контрольованого нагрівання та механічного навантаження. Він дозволяє отримати важливі температурні та реологічні характеристики, що відображають поведінку вугілля в пластичному стані та є необхідними для оптимізації складу вугільних шихт і прогнозування якості коксу. Застосування стандартизованого обладнання та чітко регламентованої методики забезпечує відтворюваність результатів і достовірність отриманих даних.

2.2 Дослідження плинності вугілля та інтерпретація результатів за методом Гізелера

Кокс, призначений для використання у доменних печах, повинен характеризуватися високою механічною міцністю. Як сировину для його виробництва доцільно застосовувати вугілля з високою здатністю до спікання. Спекальність є однією з ключових властивостей вугілля, оскільки саме вона визначає процеси його розм'якшення, плавлення та подальшого затвердіння під час карбонізації.

Оцінювання спекальності здійснюється на основі характеристик поведінки вугілля в процесі нагрівання та плавлення. Використання показників термопластичних властивостей дає змогу достатньо точно визначити придатність певної марки вугілля як сировини для отримання металургійного коксу [15].

Коксівне вугілля при нагріванні без доступу повітря переходить у пластичний стан: воно розм'якшується, збільшується в об'ємі, а згодом знову твердне, формуючи зв'язану, пористу й міцну структуру коксу.

Для оцінювання його реологічних і пластичних властивостей, а також властивостей вугільних шихт, широко застосовують випробування за допомогою пластометра Гізелера та дилатометра Арну [16].

Метод застосовується для визначення показників, що характеризують пластичні властивості (плинність) вугілля, які проявляються під час його нагрівання в заданих умовах. Пластичність за методом Гізелера розглядають як опір пластичної маси вугілля обертанню твердого тіла, зануреного в неї. Разом із цим визначають також температурні параметри, що описують поведінку пластичної маси.

Сутність стандартного методу Гізелера полягає у нагріванні зразка вугілля в тиглі з встановленою мішалкою та безперервному вимірюванні швидкості її обертання в утвореній пластичній масі, яка змінюється залежно від температури. Обертання мішалки забезпечується двигуном із постійним крутним моментом.

Під час випробування наважку підготовленого вугілля масою близько 5 г і крупністю менше 40 меш поміщають у тигель, оснащений мішалкою, що входить до складу ретортного вузла. Мішалка виконана у вигляді металевого стрижня з чотирма лопатями, розташованими під прямим кутом до нього.

Нагрівання тигля здійснюють в електричній печі, яка містить ванну з розплавом свинцю та олова. Тигель занурюють у попередньо нагрітий до температури 300 °С розплав, витримують до вирівнювання температури протягом (10 ± 2) хв, після чого підвищують температуру зі швидкістю 3 °С/хв.

У момент розм'якшення вугілля мішалка починає обертатися. Протягом усього експерименту безперервно фіксують температуру та швидкість обертання мішалки за допомогою спеціального лічильника. Швидкість обертання визначають у кругових поділах за хвилину (кд/хв або DDPM), при цьому один поділ відповідає одній сотій повного оберту мішалки [10,16].

У результаті проведення випробування визначають п'ять основних показників, що характеризують пластичні властивості вугілля.

1. Температура початку розм'якшення — це температура, за якої швидкість обертання мішалки поступово зростає і досягає значення 1 кд/хв.

2. Температура максимальної плинності відповідає моменту, коли швидкість обертання мішалки набуває свого найбільшого значення.

3. Температура затвердіння — це температура, при якій обертання мішалки повністю припиняється.

4. Температурний інтервал пластичності визначають як різницю між температурою початку розм'якшення та температурою затвердіння.

5. Максимальна плинність або пластичність (maximum fluidity) — це найбільша швидкість обертання мішалки, що виражається в кд/хв або DDPM.

Серед наведених показників найважливішим є максимальна плинність, оскільки вона відображає в'язкість пластичної маси вугілля. Поряд із товщиною пластичного шару цей параметр має суттєве значення при оцінюванні вугілля як сировини для коксування. У численних дослідженнях встановлено наявність

тісного взаємозв'язку між показниками пластичності за Гізелером і окремими характеристиками якості отриманого коксу.

Слід зазначити, що пластичність вугілля за методом Гізелера може змінюватися у широких межах — від нульових значень до 50 000 кд/хв [10].

Зазвичай для окремих марок вугілля найбільш сприятливими вважаються високі значення DDPM. Залежно від вмісту летких речовин ці показники поділяють на такі рівні:

1. Для вугілля з високим виходом летких речовин — від 5 000 до 30 000 DDPM;
2. Для вугілля із середнім виходом летких речовин — від менш ніж 200 до 20 000 DDPM;
3. Для вугілля з низьким виходом летких речовин — від 20 до 1 000 DDPM [16].

Характер зміни максимальної пластичності та товщини пластичного шару має екстремальний вигляд і безпосередньо визначається ступенем метаморфізму вугілля. Її максимум приблизно відповідає інтервалу R_o , характерному для вугілля марок Ж і КЖ за вмісту інертиніту 15–46%. Встановлено кореляційне рівняння між максимальною пластичністю та товщиною пластичного шару, що дозволяє розглядати ці показники як взаємозамінні. Така еквівалентність становить науковий інтерес і потребує подальшого дослідження, оскільки визначення товщини пластичного шару є складною процедурою та практично не піддається автоматизації.

Метод Гізелера широко використовується в наукових дослідженнях і лабораторній практиці коксохімічних підприємств Японії, США та інших країн. Його застосування закріплене національними стандартами США (ASTM D2639-04) та Японії (JIS M 8801.7). Крім того, цей метод входить до переліку процедур для визначення додаткових параметрів Міжнародної системи кодифікації вугілля середнього та високого ступенів вуглефікації (ГОСТ 30313–95). Нині також діють міжнародний стандарт ISO 10329:2017 і державний стандарт ГОСТ 32561–2013.

Для оцінювання пластичних властивостей вугілля розроблено автоматизовані пластометри, зокрема модель PL 2000, яка являє собою повністю автоматизовану аналітичну систему. У ній усі етапи вимірювання виконуються без участі оператора. Прилад оснащений програмним забезпеченням, що дозволяє задавати температурний режим, визначати плинність до 100 000 DDPM, а також здійснювати цифрову й графічну візуалізацію процесу з подальшою обробкою та збереженням отриманих даних. Реєстрація руху барабанної шкали здійснюється оптичним кодуючим пристроєм із роздільною здатністю 0,2 поділу за хвилину. Після завершення аналізу система автоматично формує звіт, у якому відображаються максимальна плинність і відповідні температурні характеристики процесу [10].

Дилатометричне випробування Арну (Arnu Dilatometer Test).

У цьому методі зразок вугілля у вигляді так званого «олівця» довжиною близько 60 мм, підготовлений із матеріалу крупністю менше 60 меш, розміщують у ретортній трубці. Зверху встановлюється поршень, після чого систему поміщають у піч. Нагрівання здійснюється з контрольованою швидкістю приблизно 3 °C за хвилину.

Під час випробування фіксується переміщення поршня, що відображає процеси стискання та розширення вугільного зразка. Основним показником є максимальна дилатація, яка характеризує здатність вугілля до розширення в пластичному стані.

Для окремих марок вугілля бажаним вважається отримання високих значень дилатації, які орієнтовно становлять:

1. для вугілля з високим виходом летких речовин — від +50 до 300%;
 2. для вугілля із середнім виходом летких речовин — від +100 до 250%;
 3. для вугілля з низьким виходом летких речовин — від менше 0 до 200%
- [16].

Як правило, із підвищенням здатності вугілля до спікання зростає і його вартість, тоді як менш спікливе вугілля є дешевшим. Тому залучення до шихти значних обсягів слабоспікаючого або неспікаючого вугілля дозволяє знизити

витрати на сировину. Водночас оцінка його придатності для коксування є складною задачею, оскільки стандартні методи — зокрема визначення за допомогою пластометра Гізелера (JIS M 8801) або дилатометричні випробування — не завжди забезпечують можливість коректного вимірювання термопластичних властивостей такого вугілля [15].

2.2.1 Методика проведення досліджень

Для оцінювання ефективності хімічного модифікування як дослідні зразки низькоякісної сировини було обрано чотири типи вугілля (A–D). Для кожного з них визначено середній показник максимального відбиття вітриніту R_o згідно зі стандартом JIS M 8816, вміст летких речовин VM на суху основу відповідно до JIS M 8812, а також максимальну плинність MF, встановлену за допомогою пластометра Гізелера (JIS M 8801). Початкові фізико-хімічні та реологічні властивості досліджуваних зразків наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Основні показники досліджуваних зразків вугілля

Показник	R_o	VM	MF
Одиниця	%	% у розрахунку на суху основу	ddpm
Вугілля A (напівантрацит)	1,61	18,0	0
Вугілля B (суббітумінозне вугілля)	0,53	32,5	0
Вугілля C (суббітумінозне вугілля)	0,52	32,0	5
Вугілля D (антрацит)	2,06	13,5	0

Примітка. Джерело: розроблено із використанням [15]

Вплив зазначених марок вугілля на міцність коксу оцінювали з використанням лабораторної печі для карбонізаційних випробувань. Досліджувані вугілля додавали до балансного вугілля у кількості 20% за масою. Для підсилення відмінностей між зразками насипну щільність шихти

встановлювали на рівні 930 кг/м^3 . Процес карбонізації здійснювали в електричній печі при температурі 1050°C протягом 6 годин.

Оцінку придатності проводили за показником ΔADI (ADI), який визначали як різницю між міцністю коксу, отриманого із суміші, та міцністю коксу з балансного вугілля. Від'ємне значення ΔADI свідчить про зниження міцності коксу внаслідок додавання досліджуваного вугілля.

Як видно з рис. 2.8, незважаючи на те, що вугілля А, В і D мають однакове значення максимальної плинності ($\text{MF} = 0$), ступінь зниження міцності коксу (показник ADI) для них суттєво різниться. Це свідчить про те, що оцінити вплив низькоякісного вугілля на міцність коксу лише за результатами стандартного визначення максимальної плинності за методом Гізелера є недостатньо і не дозволяє отримати повну картину.

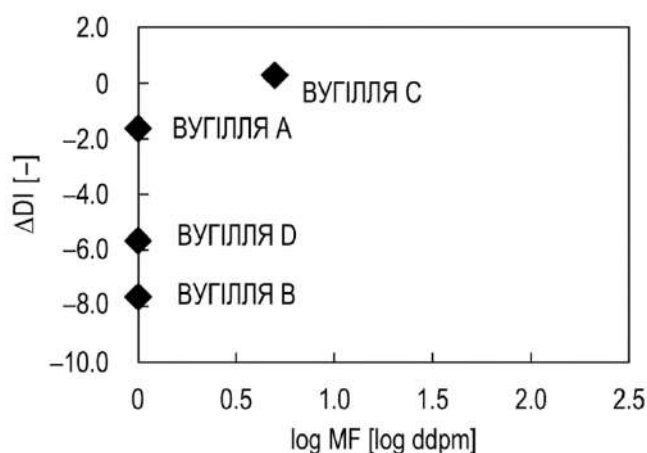


Рис. 2.8 Залежність ΔADI від $\log \text{MF}$

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

У попередніх дослідженнях було запропоновано кілька методів оцінювання термопластичних властивостей слабоспікаючого вугілля.

1. Підвищення швидкості нагрівання.

В одному з методів вугілля нагрівали в реторті, зануреній у ванну з температурою 550°C , що забезпечувало швидкість нагрівання близько 75°C/хв . Встановлено, що плинність зростає зі збільшенням швидкості нагрівання, а результати вимірювань наведено в таблиці 2.3.

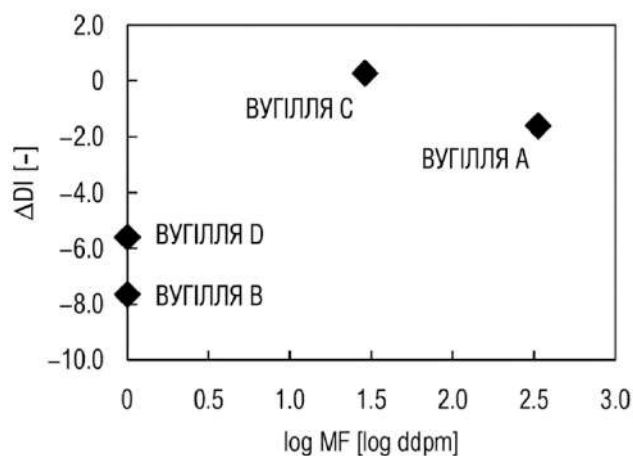
Таблиця 2.3

Вплив швидкості нагрівання на плинність вугілля

Показники	MF	MF при високій швидкості підвищення температури
Одиниці	Ddpm	
Вугілля А (напівантрацит)	0	336
Вугілля В (суббітумізоване)	0	0
Вугілля С (суббітумізоване)	5	29
Вугілля D (антрацит)	0	1

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Водночас виявлена позитивна кореляція між значеннями $\log MF$ та міцністю коксу (ΔDI) не була підтверджена (рис. 2.9).

**Рис. 2.9 Залежність ΔDI від $\log MF$ при підвищеній швидкості нагріву**

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

2. Визначення оціночної плинності через суміші вугілля.

Інший підхід передбачав додавання до досліджуваних зразків добре спікаючого вугілля марок Е і F (табл. 2.4) у кількості 25% та 50% мас. з подальшим вимірюванням плинності отриманих сумішей.

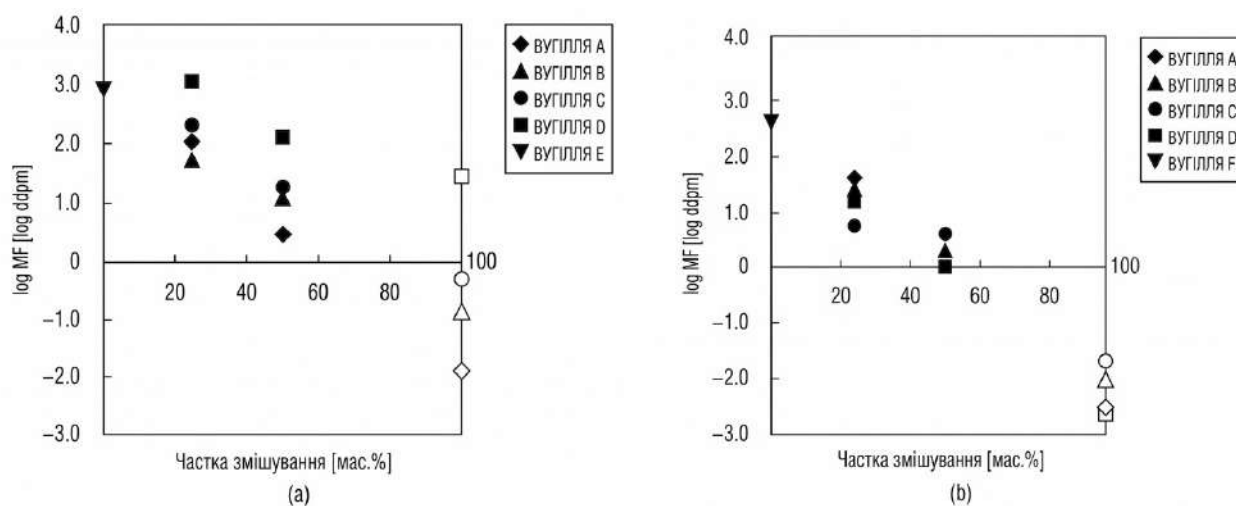
Таблиця 2.4

Характеристика добре спікаючого вугілля марок Е і F

Показник	Ro	VM	MF
Одиниця	%	% у розрахунку на суху основу	ddpm
Вугілля Е	0,70	39,6	970
Вугілля F	0,98	27,0	415

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Оціночне значення плинності чистого компонента визначали графічно шляхом екстраполяції прямих до 100% вмісту компонента (рис. 2.10).

**Рис. 2.10 Вплив частки змішування вугілля на log MF вугільної суміші**

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Однак залежність, показана на рис. 2.11, не підтвердила кореляції між розрахованими значеннями log MF і міцністю коксу, оскільки на плинність суміші істотно впливає міжкомпонентна взаємодія різних марок вугілля.

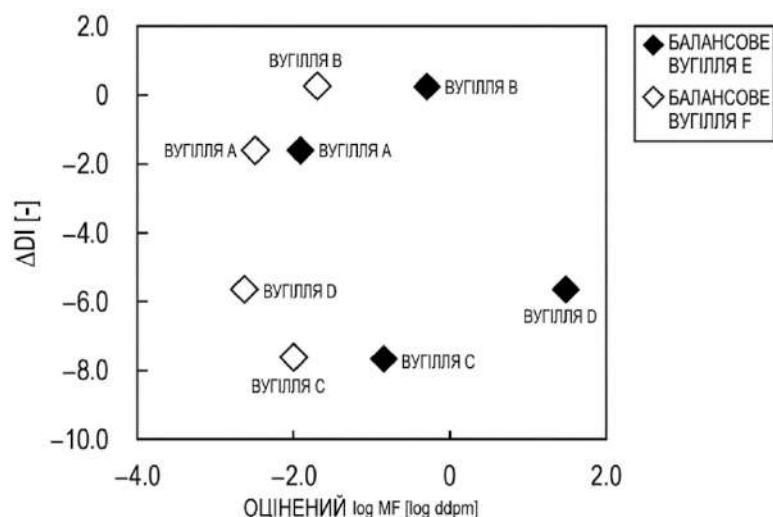


Рис. 2.11 Залежність ΔDI від оцінного значення $\log MF$ вугілля

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

3. Додавання спікаючих добавок:

До вугілля А–D додавали 10 мас.% асфальтового або кам'яновугільного пеку. Отримана залежність між новим $\log MF$ та ADI (рис. 2.12) також не показала надійної кореляції, що підтверджує неефективність використання стандартних пекових добавок для точного оцінювання плинності.

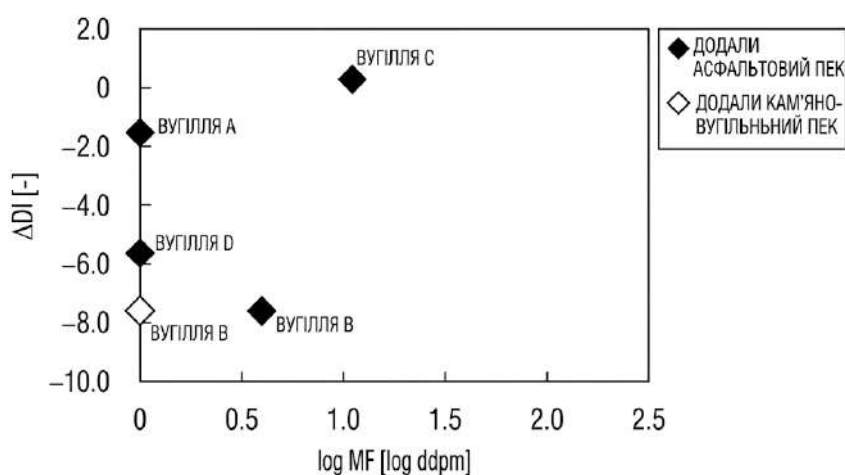


Рис. 2.12 Залежність DI від $\log MF$ вугілля з додаванням пеку

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Сучасний підхід до модифікування із застосуванням ароматичних амінів.

Важливим технологічним досягненням стало встановлення, що термопластичні властивості неспікаючого та слабоспікаючого вугілля, визначені після введення первинних або вторинних амінів з ароматичною структурою, демонструють виражену позитивну залежність від міцності утвореного коксу.

Найефективнішим реагентом вважається N,N'-ди-2-нафтил-р-фенілендіамін. Завдяки високій температурі кипіння ця сполука у значній мірі зберігається в інтервалі температур 350–550 °C, тобто в області прояву термопластичності вугілля, що сприяє більш достовірному відображенню його властивостей. Як альтернативні добавки можуть застосовуватись фенотіазин, карбазол та N-феніл-1-нафтиламін.

Встановлено, що введення аміну в кількості 10 % мас. суттєво підвищує термопластичність вугілля та забезпечує можливість точного визначення показника максимальної плинності (MF), що підтверджується експериментальними даними (табл. 2.5). Водночас додавання лише 5 % мас. аміну є недостатнім, оскільки не забезпечує помітного зростання плинності залежно від типу вугілля, і в багатьох випадках значення MF не вдається коректно зафіксувати.

Таблиця 2.5

Плинність вугілля А–D за різного вмісту аміну

Показник	MF при додаванні 5 мас. % аміну	MF при додаванні 10 мас. % аміну
одиниця	ddpm	
Вугілля А (напівантрацит)	1	17
Вугілля В (суббітумізоване)	0	0
Вугілля С (суббітумізоване)	8	86
Вугілля D (антрацит)	0	4

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Графічна залежність, наведена на рис. 2.13, наочно підтверджує наявність позитивної кореляції: зі збільшенням значення $\log MF$ вугілля, визначеного після

введення 10 % мас. аміну, спостерігається менше зниження показника ADI, особливо для вугілля низької якості.

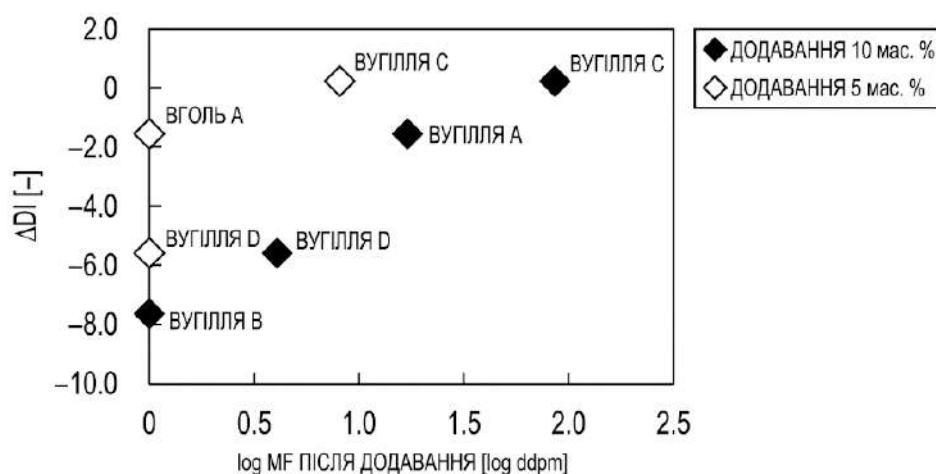


Рис. 2.13 Залежність ΔDI від $\log MF$ вугілля з додаванням аміну

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

З метою перевірки достовірності запропонованого підходу було проведено додаткові експериментальні дослідження із використанням бітумінозного слабоспівного вугілля марок G, H та I, характеристики якого наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Характеристика бітумінозного вугілля G–I

Показник	Ro	VM	MF
Одиниця	%	% у розрахунку на суху основу	ddpm
Вугілля G (бітумізовне)	1,000	26,6	20
Вугілля H (бітумізовне)	1,017	23,9	1
Вугілля I (бітумізовне)	0,794	33,6	3

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

У додаткових експериментах частка введення компонентів у шихту становила 15 % мас., а насипна щільність — 725 кг/м³. Результати стандартних

вимірювань, проведених без використання аміну, знову продемонстрували низьку інформативність і недостатню точність оцінки (рис. 2.14).

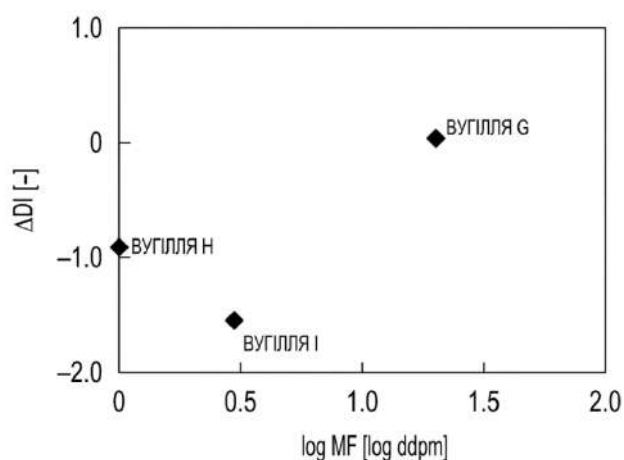


Рис. 2.14 Залежність ΔDI від $\log MF$ у складі вугільних сумішей

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Натомість після введення до вугілля марок G–I ароматичного аміну в кількості 10 % мас. спостерігалось суттєве підвищення показників плинності, що підтверджується експериментальними даними, наведеними в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Плинність вугілля G–I з додаванням 10% мас. аміну

Показник	MF при додаванні 10 мас. % аміну
Одиниця	ddpm
Вугілля G (бітумізовне)	31396
Вугілля Н (бітумізовне)	6167
Вугілля І (бітумізовне)	588

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Побудована залежність (рис. 2.15) повністю підтвердила наявність стійкої позитивної кореляції між значенням $\log MF$, визначеним після введення аміну, та міцністю коксу (ΔDI), навіть за умов варіювання типу вугілля та його насипної щільності.

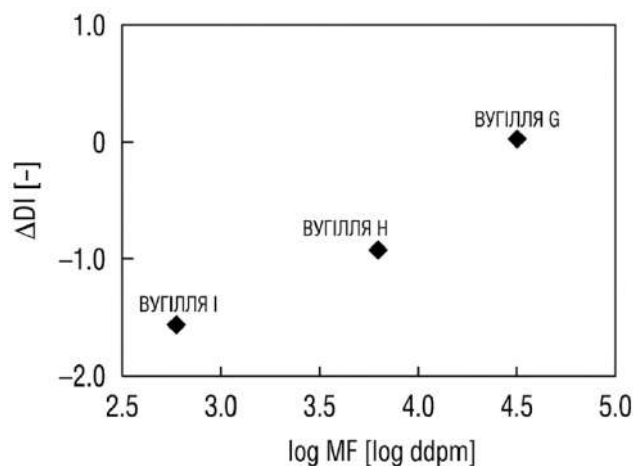


Рис. 2.15 Залежність ΔDI від $\log MF$ вугілля з додаванням аміну

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[15]

Отже, використання даного підходу є особливо ефективним для вугілля з низьким рівнем початкової плинності ($MF \leq 20$ ddpm), для якого традиційні методи оцінювання виявляються недостатньо інформативними.

Алгоритм практичної інтерпретації результатів та оцінювання якості сировини.

Встановлені закономірності дозволили розробити підхід до оперативного визначення придатності вугілля без необхідності проведення тривалих коксувальних випробувань.

1. Формування розрахункової залежності.

На основі експериментальних даних будують калібрувальну залежність або визначають математичний вираз, що описує зв'язок між плинністю вугілля (з урахуванням додавання аміну) та міцністю отриманого коксу.

2. Визначення граничного показника.

З урахуванням технологічних вимог доменного виробництва задають необхідний рівень міцності коксу. Далі, використовуючи встановлену залежність, обчислюють відповідне граничне значення показника плинності вугілля, яке забезпечує досягнення цієї міцності.

3. Оцінювання придатності вугілля.

Для нової марки вугілля визначають максимальну плинність за методом Гізелера в аналогічних умовах із додаванням 10 % мас. ароматичного аміну. Якщо отримане значення дорівнює або перевищує розраховане граничне, таке вугілля вважається придатним для використання як сировина, оскільки кокс із нього забезпечить необхідний рівень міцності [15].

2.3 Прогнозування пластичних характеристик вугільних сумішей за методом Гізелера

2.3.1 Прогнозування пластичного інтервалу вугільних сумішей

Температура максимальної плинності може бути достатньо точно змодельована на основі адитивних параметрів, таких як вміст летких речовин, ступінь вуглефікації (ранг) і мацеральний склад, що пояснюється її майже лінійною залежністю від рангу. Водночас, подібно до LMF, пластичний інтервал суміші не може бути визначений інакше, ніж через відповідні значення пластичного інтервалу окремих компонентів вугілля.

Правило суміші формально не застосовується до гізелерівських температур. Однак із калориметричної точки зору, за умови припущення однакової питомої теплоємності компонентного вугілля в межах досліджуваного температурного інтервалу, гізелерівські температурні характеристики, а відповідно й пластичний інтервал, можуть розглядатися як адитивні властивості системи.

У цьому випадку застосування правила суміші має вигляд:

$$P_b = \sum_{i=1}^n P_i x_i \quad (2.1)$$

де P_b – показник властивості вугільної суміші (шихти);

P_i – показник властивості i -го компонентного вугілля, що входить до складу суміші;

x_i – масова частка i -го компонентного вугілля в суміші;

n – кількість компонентів у вугільній суміші.

Застосування цього співвідношення до температур розм'якшення T^S , максимальної плинності T^{MF} , повторного затвердіння T^R та пластичного інтервалу PR забезпечує задовільну відповідність розрахункових і експериментальних значень.

Результати порівняння розрахункових і експериментальних значень наведено на рис. 2.16.

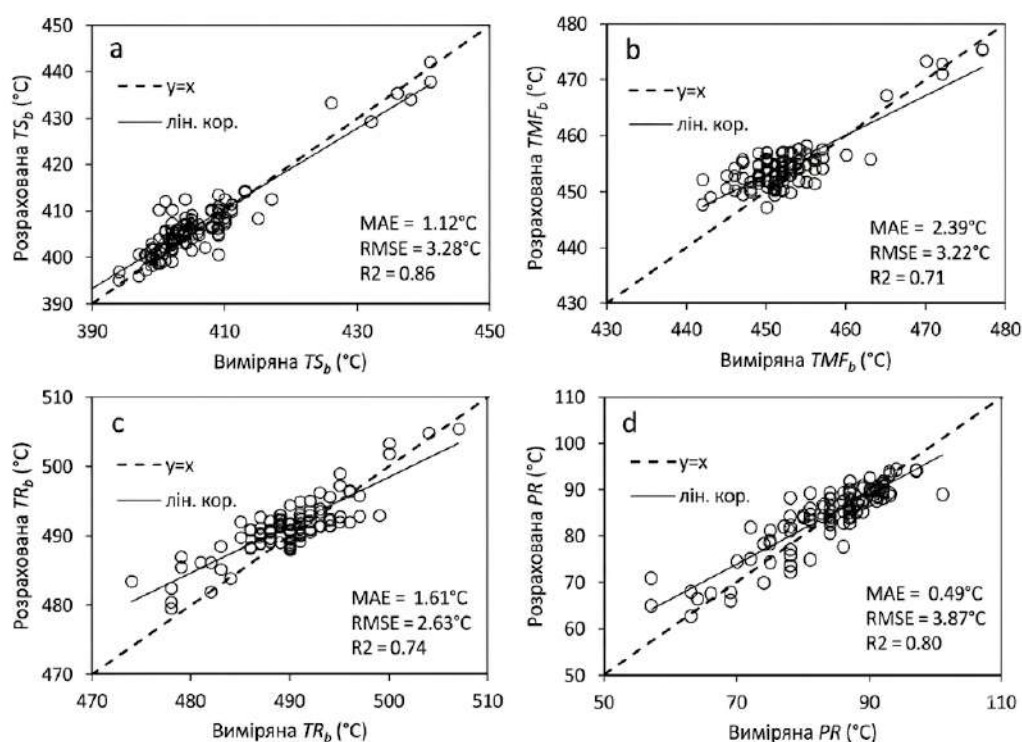


Рис. 2.16 Графік прогнозування гізелерівських температур і пластичного інтервалу за адитивністю у порівнянні з вимірюванням
а – температура розм'якшення; б – температура максимальної плинності;
с – температура повторного затвердіння; д – пластичний інтервал

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[17]

У даному розділі розглянуто підхід до кількісної оцінки взаємодій між компонентами вугільної суміші. Такі взаємодії можуть бути описані за допомогою параметрів взаємодії α^S , α^{MF} та α^R , які характеризують відхилення відповідно від температури розм'якшення T^S , температури максимальної плинності T^{MF} та температури повторного затвердіння T^R .

Як приклад розглянемо процес розм'якшення. Нехай T_1^S і T_2^S — температури розм'якшення вугілля 1 і 2 у бінарній суміші, причому $T_1^S < T_2^S$. У цьому випадку компонент вугілля, що розм'якшується раніше, впливає на інший компонент, змінюючи його температуру розм'якшення з T_2^S до $T_2'^S$:

$$T_2'^S = T_2^S - \alpha^S \frac{x_1}{x_1 + x_2} (T_2^S - T_1^S) \quad (2.2)$$

За відсутності взаємодії між компонентами параметр α^S дорівнює нулю. У разі $\alpha^S > 0$ спостерігається прискорення розм'якшення другого компонента (притягувальна взаємодія), тоді як при $\alpha^S < 0$ відбувається його уповільнення (відштовхувальна взаємодія).

Нехай T_{i-1}^S та T_i^S — температури розм'якшення $(i-1)$ -го та i -го компонентів у n – компонентній вугільній суміші, при цьому компоненти впорядковані за зростанням температури розм'якшення, тобто $T_{i-1}^S < T_i^S$. У такому випадку температура розм'якшення $T_i'^S$ i -го компонента, який перебуває на межі початку плавлення, змінюється під впливом підмножини попередніх $(i-1)$ компонентів, що вже перейшли у пластичний стан:

$$T_i'^S = T_i^S - \alpha^S \frac{\sum_{k=1}^{i-1} x_k}{\sum_{k=1}^i x_k} (T_i^S - T_{i-1}''^S) \quad (2.3)$$

де $T_{i-1}''^S$ – скоригована температура розм'якшення підмножини перших $(i-1)$ вугілля:

$$T_{i-1}''^S = \frac{\sum_{k=1}^{i-1} x_k T_k'^S}{\sum_{k=1}^{i-1} x_k} \quad (2.4)$$

T'_{i-1}^S розглядається як адитивна величина, оскільки значення T_k^S вже враховують міжкомпонентні взаємодії. У підсумку принцип адитивності застосовується до скоригованого середнього значення температури розм'якшення:

$$T_b^S = \sum_{i=1}^n x_i T_i'^S \quad (2.5)$$

де $T_1'^S = T_1^S$.

Рівняння (2.5) також може бути використане для розрахунку температури максимальної плинності та температури повторного затвердіння суміші. Очевидно, що це є спрощенням механізму взаємодій, оскільки рівняння (2.3) враховує лише взаємодії між найближчими компонентами вугілля.

Відхилення від адитивності кількісно оцінюється похибкою прогнозування температури T за зваженим середнім, яка позначається як E_{WA}^T і визначається як різниця між значенням, розрахованим за рівнянням (2.1), та експериментально вимірним значенням:

$$E_{WA}^T = T_b^{WA} - T_b^{\text{вимірювання}} \quad (2.6)$$

Для кожної суміші з бази даних існує певне значення параметра взаємодії α_0 , яке компенсує різницю між прогнозом за рівнянням (2.5) і експериментальними даними. Іншими словами, α_0 визначається умовою:

$$E_{WA}^T = \sum_{i=1}^n x_i (T_i - T_i') \quad (2.7)$$

Графічні залежності E_{WA}^{TS} та E_{WA}^{TR} від параметрів взаємодії α_0^S та α_0^R відповідно наведені на рис. 2.17.

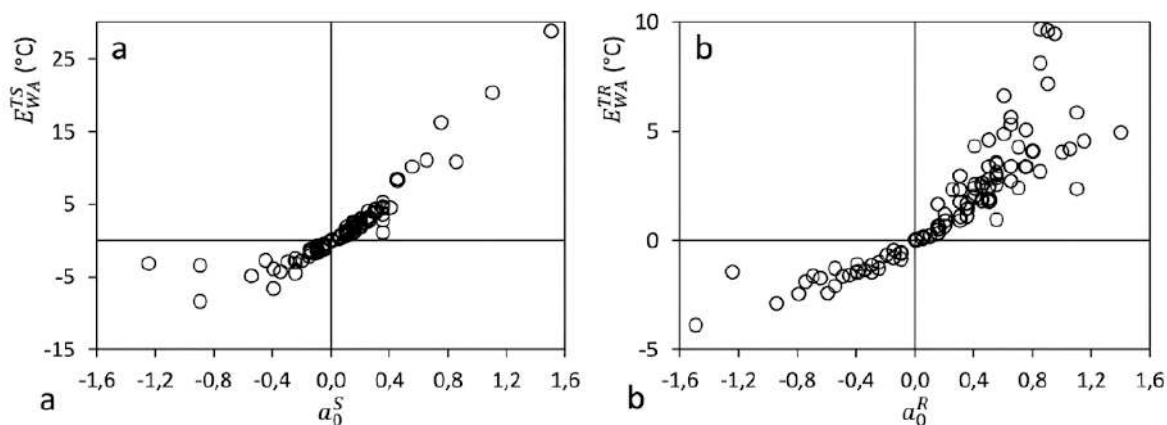


Рис. 2.17 Графік похибки прогнозування за адитивністю залежно від параметра взаємодії

а – при розм'якшенні; б – повторному затвердінні

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[17]

Сильна позитивна кореляція свідчить про те, що окремі вугілля у суміші можуть виконувати роль як сповільнювачів розм'якшення або повторного затвердіння ($\alpha_0 < 0$), так і прискорювачів ($\alpha_0 > 0$). Таким чином, параметри a_0^S та a_0^R є надійними показниками взаємодій як за знаком, так і за величиною.

Леткі речовини виступають пластифікуючим агентом, який зумовлює термопластичну поведінку вугілля. Водночас вугілля може бути пластифіковане не лише власними леткими речовинами, а й леткими речовинами інших компонентів, що логічно вказує на те, що взаємодії виникають унаслідок перенесення летких речовин між складовими суміші.

Додатне значення a_0^S спостерігається тоді, коли леткі речовини, що виділяються вугіллям нижчого рангу, спричиняють передчасне розм'якшення вугілля вищого рангу. Натомість від'ємне значення a_0^S має місце у випадку, коли пластифікуючі леткі речовини, що виділяються вугіллям нижчого рангу, поглинаються вугіллям вищого рангу.

Від'ємне значення a_0^S у рівнянні (2.2) у випадку поглинання летких речовин вугілля нижчого рангу вугіллям вищого рангу не є очевидним. Фактично, якщо вугілля вищого рангу в бінарній суміші впливає на вугілля нижчого рангу, рівняння (2.2) слід змінити таким чином:

$$T_1^{'S} = T_1^S + \beta^S \frac{x_2}{x_1 + x_2} (T_2^S - T_1^S) \quad (2.8)$$

β_S є додатним, коли вугілля 2 уповільнює розм'якшення вугілля 1 шляхом поглинання його летких речовин.

Враховуючи, що:

$$T_b^S = \frac{x_1 T_1^{'S} + x_2 T_2^S}{x_1 + x_2} = \frac{x_1 T_1^S + x_2 T_2^{'S}}{x_1 + x_2} \quad (2.9)$$

Підстановка рівнянь (2.2) і (2.8) у рівняння (2.9) дає $\alpha_S = -\beta_S$.

Аналогічно, a_0^R є додатним для вугілля вищого рангу, плавлення якого каталізується раніше поглиненими леткими речовинами з вугілля нижчого рангу. Від'ємне значення a_0^R спостерігається, коли вже затверділе вугілля нижчого рангу поглинає пластифікуючі речовини, що виділяються вугіллям вищого рангу.

На рис. 2.18а наведено залежність параметра взаємодії α_0 , розрахованого для трьох гізелерівських температур, від кількості компонентного вугілля n . Встановлено, що величина взаємодій зменшується, коли кількість компонентів у суміші досягає або перевищує 5.

Як показано на рис. 2.18b, чіткої кореляції між a_0^S та a_0^R не спостерігається, що свідчить про можливу зміну не лише величини, але й знака взаємодій між стадіями розм'якшення та повторного затвердіння.

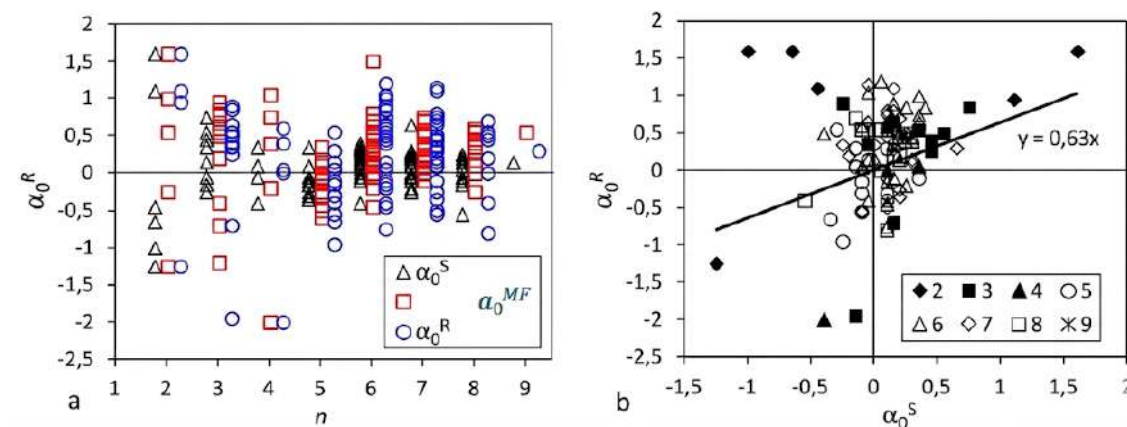


Рис. 2.18 Залежність параметра взаємодії α_0

а – зміна параметрів взаємодії залежно від кількості компонентів;

б – залежність α_0^R від α_0^S залежно від складу сумішей

Примітка. Джерело: розроблено із використанням [17]

Найменш неоднозначна зміна знака взаємодії характерна для бінарних сумішей вугілля з суттєво різним рангом (три заповнені ромби у другому (верхньому лівому) квадранті рис. 2.18b), що вже було відзначено в PMRTA. За низьких температур вугілля вищого рангу адсорбує пластифікуючі леткі речовини, що виділяються вугіллям нижчого рангу, внаслідок чого його плавлення зменшується ($\alpha_0^S < 0$). За вищих температур, коли вугілля вищого рангу само починає розм'якшуватися, раніше поглинуті леткі речовини, навпаки, сприяють його плавленню ($\alpha_0^R > 0$).

Цей механізм підтверджується як відсутністю бінарних сумішей у четвертому (нижньому правому) квадранті рис. 2.18b, так і тим, що суміші в першому та третьому квадрантах складаються з вугілля подібного рангу.

Відповідно до стандарту, похибка вимірювання становить $\pm 3.5^\circ\text{C}$. Похибка розрахунку, якщо пластичний інтервал PR визначається за правилом адитивності, також становить $\pm 3.5^\circ\text{C}$. Тому прогноз PR є надійним, якщо похибка прогнозу E_{WA}^{PR} , тобто різниця між розрахованими та експериментальними значеннями, знаходиться в межах від -7 до $+7^\circ\text{C}$. Це виконується для всіх випадків, окрім 5 із 108 сумішей, як показано на рис. 2.19.

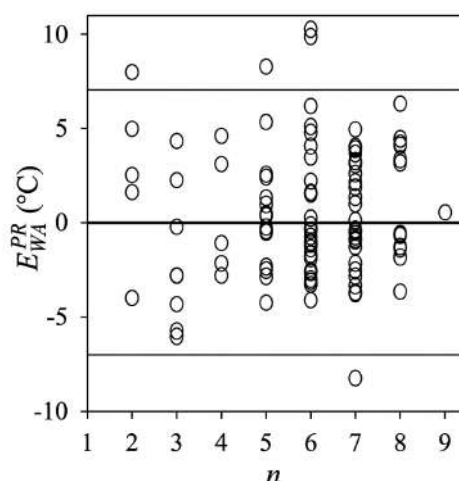


Рис. 2.19 Графік похибки прогнозування пластичного інтервалу PR за адитивністю залежно від кількості компонентів у суміші

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[17]

Прогнозування PR, на відміну від LMF, не покращується зі збільшенням кількості компонентного вугілля. Навпаки, значення R^2 зменшується зі зростанням n (рис. 2.20), хоча пластичний інтервал усе ще може бути задовільно змодельований за допомогою адитивного підходу.

Кількість вугілля в шихті	Кількість шихт	T_b^S			T_b^R			PR_b		
		MAE	RMSE	R2	MAE	RMSE	R2	MAE	RMSE	R2
2	6	-0.48	4.14	0.37	2.14	1.93	0.88	2.62	3.99	0.87
3	10	2.79	4.80	0.87	2.64	3.81	0.87	-0.15	5.98	0.78
4	5	0.41	2.36	0.87	0.73	4.08	0.83	0.33	2.97	0.96
5	15	-0.84	1.93	0.78	-0.28	2.09	0.37	0.56	3.13	0.51
6	29	1.70	3.62	0.42	2.06	2.58	0.61	0.36	4.47	0.56
7	28	1.74	2.53	0.61	1.85	1.98	0.61	0.11	3.01	0.71
8	14	0.49	2.40	0.48	1.67	1.93	0.40	1.19	3.02	0.62
9	1	1.84			2.36			0.52		
Загалом	108	1.12	3.28	0.86	1.61	2.63	0.74	0.49	3.87	0.80

Рис. 2.20 Ефективність прогнозування температур і пластичного інтервалу залежно від кількості компонентів у суміші

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[17]

Причина цього наведена на рис. 2.18b: нахил лінії регресії становить 0,63, що означає, що в середньому між стадіями розм'якшення та повторного затвердіння значення параметра взаємодії зменшується приблизно на одну третину без зміни знака. При взятті різниці між температурами повторного затвердіння та розм'якшення внески параметрів взаємодії для обох стадій майже взаємно компенсуються.

Також варто зазначити, що $MAE^{PR} = MAE^{TR} - MAE^{TS}$, що означає, що якість прогнозування T_b^S і T_b^R не впливатиме на PR_b за умови, що точність прогнозу T_b^S є такою ж (або такою ж низькою), як і для T_b^R . У такому випадку задовільна ефективність адитивної моделі PR була б, по суті, випадковою.

MAE^{TS} і MAE^{TR} для бінарних сумішей мають протилежні знаки через зміну знака взаємодії в межах пластичного інтервалу.

У всій базі даних коефіцієнт кореляції прогнозування LMF (0,93) є вищим, ніж для PR (0,80). Введення статистичного коригувального коефіцієнта для покращення прогнозу PR могло б мати більше недоліків, ніж переваг, залежно, наприклад, від стандартного відхилення рангу компонентів суміші.

Зрештою, індекси якості коксу доцільніше виражати як функцію LMF, отриманого шляхом підсумовування параболічних апроксимацій пластограм компонентів суміші (рівняння 2.10 і 2.11), ніж як функцію PR, який визначається як зважене середнє (рівняння 2.1).

$$\log_{10} F_b(T) = \sum_{i=1}^n x_i \log_{10} F_i(T), T \in [\min(T_i^S); \max(T_i^R)] \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} T \in [T_i^S; T_i^{MF}] \log_{10} F_i(T) = -\frac{\log_{10} MF_i}{(T_i^{MF} - T_i^S)^2} (T - T_i^{MF})^2 + \log_{10} MF_i \\ T \in [T_i^{MF}; T_i^R] \log_{10} F_i(T) = -\frac{\log_{10} MF_i}{(T_i^{MF} - T_i^R)^2} (T - T_i^{MF})^2 + \log_{10} MF_i \end{cases} \quad (2.11)$$

На рис. 2.21 подано розподіл сумішей як функцію знака параметрів взаємодії a_0^S і a_0^R . Для $a_0^S < 0$ суміші з $a_0^R \geq 0$ трапляються щонайменше вдвічі частіше, ніж ті, де $a_0^R < 0$. Це співвідношення ще більше зростає для випадку $a_0^S \geq 0$.

	$\alpha_0^S < 0$	$\alpha_0^S \geq 0$	Загалом
$\alpha_0^R < 0$	12	19	31
$\alpha_0^R \geq 0$	26	51	77
Загалом	38	70	108

Рис. 2.21 Основні типи взаємодій

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[17]

На рис. 2.22 узагальнено вплив взаємодій на термопластичну поведінку вугілля у двох найпоширеніших випадках.

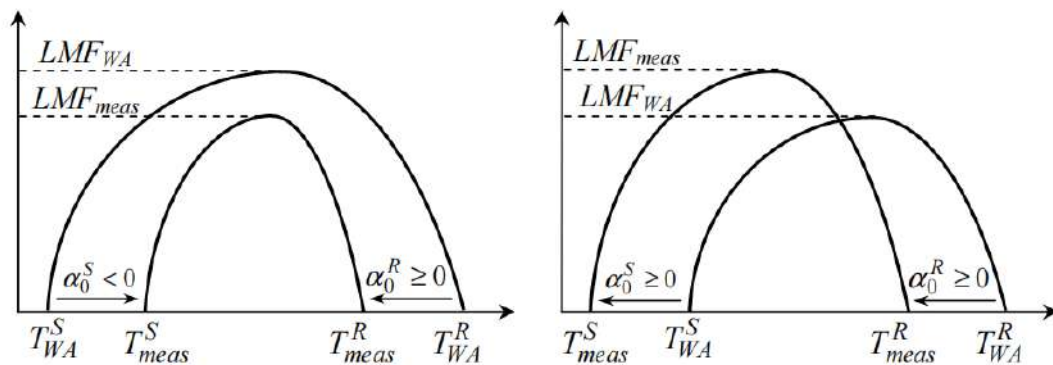


Рис. 2.22 Схематичне зображення двох основних випадків взаємодії, виявлених у базі даних між компонентами вугілля

Примітка. Джерело: розроблено із використанням[17]

Розм'якшення суміші затримується ($a_0^S < 0$), коли леткі речовини, що виділяються вугіллям нижчої стадії метаморфізму, поглинаються ще твердим вугіллям вищої стадії. Таке «поглинання» летких речовин зменшує LMF і прискорює повторне затвердіння (рис. 2.22а).

Розм'якшення суміші відбувається раніше ($a_0^S \geq 0$), коли леткі речовини з низькорангового вугілля здатні пластифікувати високорангове вугілля (рис. 2.22b). Раннє залучення високорангового вугілля, яке зазвичай плавиться пізніше, призводить до більшої, ніж розрахована, плинності суміші.

У загальному випадку змішування не збільшує плинність і не розширює суттєво пластичний інтервал, що узгоджується зі спостереженням Сакурова про те, що пластометрична крива суміші подібна до кривої окремого вугілля однакового рангу [17].

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи було досліджено можливість використання методу Гізелера як інструменту оптимізації вугільних шихт для коксування та розроблено підхід до формування їх складу на основі експериментальних даних.

У ході роботи проаналізовано основні фізико-хімічні та технологічні властивості кам'яного вугілля, що впливають на процес коксування та якість отриманого коксу. Встановлено, що ключову роль у формуванні структури коксу відіграють пластичні властивості вугілля, які визначають його поведінку при термічній обробці.

Розглянуто теоретичні основи методу Гізелера та особливості його застосування для оцінки пластичних характеристик вугілля. Показано, що даний метод дозволяє отримати інформативні параметри, такі як температура розм'якшення, максимальна пластичність та інтервал пластичного стану, які можуть бути використані для оцінки придатності вугілля до коксування.

На основі аналізу результатів досліджень встановлено залежність між показниками, отриманими методом Гізелера, та технологічними властивостями вугільних шихт. Доведено, що врахування цих показників при формуванні складу шихти дозволяє більш обґрунтовано підбирати компоненти та прогнозувати якість кінцевого продукту.

У роботі розроблено підхід до формування складу вугільних шихт, який базується на використанні характеристик пластичності вугілля. Запропонована стратегія дозволяє оптимізувати співвідношення компонентів шихти, забезпечити стабільність технологічного процесу та підвищити якість коксу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання методу Гізелера для підвищення ефективності підбору вугільної сировини, зниження витрат виробництва та покращення техніко-економічних показників коксохімічних підприємств.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а результати дослідження підтверджують доцільність застосування методу Гізелера як ефективного інструменту оптимізації складу вугільних шихт для коксування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кардас, Е.; Пустейовська П. Якість коксу, що використовується в доменному процесі - аналіз вибраних параметрів. QPI 2019, 1, 602-609. <https://doi.org/10.2478/cqpi-2019-0081>
2. Синицин. Лекція 3. Якість коксу : лекція з курсу «ТОХФ» / Російський хіміко-технологічний університет ім. Д. І. Менделєєва. — URL: <https://studfile.net/preview/578101/> (дата звернення: 21.05.2026).
3. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія вуглецевих матеріалів» для здобувачів першого (бакалаврського рівня вищої освіти зі спеціальностей 161 Хімічні технології та інженерія та 104 Фізика та астрономія усіх форм навчання / Укладач: О.Р.Белянська.. – Кам'янське: ДДТУ, 2019. – 28 с.
4. Халаймова І. В. Дослідження показника гарячої міцності коксу. Металургія ХХІ століття очима молодих, 2011 : тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. (м. Донецьк, 2011 р.). URL: <https://uas.su/conferences/2011/metxxi2011/ecology/10/10.php> (дата звернення: 20.05.2026).
5. Смирнов В.О., Сергєєв П.В., Білецький В.С. Технологія збагачення вугілля : [навчальний посібник]. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2011. – 476 с. – іл.; бібл. 25.
6. Горбуля А. П., Лысик Н. А., Зеленский О. И., Шульга И. В. Реакционная способность (CRI) и послереакционная прочность (CSR) кокса: межлабораторные исследования и факторы влияния. УглеХимический журнал. 2017. № 4. С. 11–17.
7. Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання довивчення дисципліни "Переробка відходів коксохімічного виробництва" для студентів, які навчаються за спеціальністю 7.05130105-хімічні технології палив та вуглецевих матеріалів / Укл.: Є.І. Малий. –Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. – 51 с.
8. Pyshyev S., Shmeltser K., Miroshnichenko D., Lebedev V., Kravchenko S., Vytrykush N., Krasiuk O., Shved M. Blast furnace coke requirements and methods of

improving its quality: a review // Chemistry & Chemical Technology (Chem. Chem. Technol.). – 2025. – Vol. 19, No. 1. – P. 174–182.

9. Кравченко С. О. Наукові основи виробництва доменного коксу з трамбованих вугільних шихт : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2025. 395 с.

10. Авгушевич И.В., Сидорук Е.И., Броневец Т. М. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей. - М.: «Реклама мастер», 2018. - 576 с.: ил.

11. Установка для определения спекающей способности каменного угля по Рогу. Ижица : каталог товаров. URL: https://www.izitsa.ru/goods/36939697-ustanovka_dlya_opredeleniya_spekayushchey_sposobnosti_kamennogo_uglya_po_rogu (дата звернення: 24.05.2026).

12. Порівняльний аналіз сировинної бази та якості коксу підприємств України та Росії / Є. С. Попов [та ін.] // ВуглеХімічний журнал. - 2018. - № 1. - С. 3-9.

13. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Технологія вуглецевих матеріалів» для здобувачів першого (бакалаврського рівня вищої освіти зі спеціальностей 161 Хімічні технології та інженерія та 104 Фізика та астрономія усіх форм навчання / Укладач: О.Р.Белянська.. – Кам'янське: ДДТУ, 2019. – 28 с.

14. ДСТУ ISO 10329:2018 Вугілля. Визначення пластичних властивостей. Метод з використанням пластометра Гізелера з постійним моментом, що крутить (ISO 10329:2017, IDT)2017.- 18 с.

15. Способ оценки угля и способ получения кокса : пат. 2675567 Российская Федерация : МПК C10B 57/06, G01N 25/04 / Дохи Юсукэ (JP), Фукада Киёси (JP), Мацуи Такаси (JP), Нагаяма Микия (JP), Нанри Наруми (JP), Ханада Кацутоси (JP) ; патентообладатель ДЖФЕ СТИЛ КОРПОРЕЙШН (JP). – № 2017129805 ; заявл. 17.02.2016 ; опубл. 19.12.2018, Бюл. № 35. – 22 с.

16. Gieseler Plastometer and Arnu Dilatometer: Evaluating Rheological Properties : technical bulletin / SGS Minerals Services. – Geneva : SGS Group Management SA, 2013. – 1 p. – (SGS-T3 SGS 509).

17. Guelton N. The prediction of the Gieseler characteristics of coal blends. Fuel. 2017. Vol. 209. P. 661–673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.017>

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА
про підготовку здобувача

Кулик Ірина Вячеславівна
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Хімічних технологій та інженерії
Спеціальність 161 Хімічних технологій та інженерії

Назва кваліфікаційної роботи Кваліфікаційна бакалаврська робота

Тема кваліфікаційної роботи Дослідження можливості використання методу Гізелера як інструменту оптимізації вугільних шихт для коксування

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

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консультанта	Примітка
1	Аналітична частина	Десна Н.А.	зараховано	12.05.26		
2	Основна частина	Десна Н.А.	зараховано	26.05.26		

Зав. кафедри _____

(підпис)

К.О. Шмельцер

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

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

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

бакалавра

Здобувача Кулик Ірини Вячеславівни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-22

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра

Дослідження можливості використання методу Гізелера як інструменту
оптимізації вугільних шихт для коксування

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	71;
таблиць	9;
схем і рисунків	23;
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	-.

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи бакалавра

Представлена бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена актуальній для коксохімічної промисловості проблемі вдосконалення підходів до формування складу вугільних шихт з метою отримання металургійного коксу стабільно високої якості. В умовах обмеженості якісної сировинної бази та необхідності підвищення ефективності коксохімічного виробництва питання оптимізації складу шихт набуває особливого значення.

Робота характеризується логічною структурою, послідовним викладом матеріалу та належним рівнем опрацювання науково-технічних джерел.

Поставлені завдання відповідають меті дослідження та повністю реалізовані в процесі виконання роботи. Висновки є обґрунтованими та відповідають отриманим результатам.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів дослідження для вдосконалення процесів підбору вугільної сировини, оптимізації складу шихт і підвищення техніко-економічних показників роботи коксохімічних підприємств.

У цілому бакалаврська кваліфікаційна робота виконана на належному теоретичному та методичному рівні, відповідає вимогам, що висуваються до робіт освітнього ступеня «бакалавр», а її автор заслуговує на присвоєння відповідної кваліфікації.

Недоліки кваліфікаційної роботи бакалавра

(бакалавра, магістра)

У роботі доцільно було б навести результати порівняння прогнозованих показників якості коксу з фактичними даними промислового коксування для додаткового підтвердження ефективності запропонованого підходу.

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 Кулик І.В. під час написання кваліфікаційної бакалаврської роботи показала відмінну загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працювала самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та економічно обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної роботи бакалавра

Розроблені рішення та рекомендації по застосуванню методу Гезілера для прогнозування вугільних шихт можуть бути впровадженні на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавраКерівник Десна Наталя Анатоліївна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Доцент, к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

« ____ » _____ 20__ р.

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

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

Я, *Кулик Ірина Вячеславівна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота («Розробка математичних залежностей прогнозування насипної густини з урахуванням характеристик вугільної сировини») виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

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

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

12.06.2026

Д О В І Д К А

про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):

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

Дослідження можливості використання методу Гізелера як інструменту оптимізації вугільних шихт для коксування

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

КУЛИК Ірина Вячеславівна

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії,

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

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

Рівень оригінальності становить 2,36 %.

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадіння із:

- ☐ власними публікаціями;
☒ термінологією;
☒ посиланнями на літературу, праці вчених;
☐ посиланнями на законодавство;
☒ загальновживаними фразами.

Матеріали було розглянуто та рекомендовано до захисту в ЕК

(подальшого розгляду, друку, опублікування)

на засіданні кафедри Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від «12» червня 2026 р. протокол №16.

Керівник підрозділу _____

(підпис)

К. Шмельцер

Дата «12» червня 2026 р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Хімічних технологій та інженерії

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

(бакалавра, магістра)

Здобувача Кулик Ірина Вячеславівна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи ХТ-22
Тема кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u>
(бакалавра, магістра)
Дослідження можливості використання методу Гізелера як інструменту оптимізації вугільних шихт для коксування
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u>
(бакалавра, магістра)
Використання методу Гізелера для оптимізації вугільних шихт при коксуванні
Переваги кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u>
(бакалавра, магістра)
У бакалаврській роботі розглянуто актуальне для сучасної коксохімічної промисловості питання оптимізації складу вугільних шихт на основі дослідження пластичних властивостей вугілля методом Гізелера. Актуальність теми обумовлена необхідністю раціонального використання вугільної сировини, підвищення якості металургійного коксу та забезпечення стабільності технологічних процесів коксування в умовах змінної сировинної бази.
Автором розглянуто теоретичні основи методу, проаналізовано основні параметри пластичності та їх вплив на формування якісного коксу.
Практичну цінність роботи становить запропонований підхід до формування складу вугільних шихт на основі результатів визначення пластичних властивостей вугілля.
Показано, що використання показників, отриманих методом Гізелера, дозволяє більш обґрунтовано здійснювати підбір компонентів шихти, прогнозувати властивості коксу та підвищувати ефективність виробництва.
Недоліки кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u>
(бакалавра, магістра)
Разом із тим робота містить окремі недоліки. Зокрема, До окремих зауважень можна віднести те, що роботу доцільно було б доповнити розширеним аналізом промислових прикладів використання методу Гізелера та кількісною оцінкою економічного ефекту від впровадження запропонованих підходів. Однак зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки виконаного дослідження.
Рекомендації: У цілому бакалаврська кваліфікаційна робота виконана на належному теоретичному та практичному рівні, відповідає вимогам, що висуваються до робіт освітнього ступеня «бакалавр», а її автор заслуговує на присвоєння відповідної кваліфікації. Робота може бути рекомендована до захисту.
Рецензент

(прізвище, ім'я та по-батькові)

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)