

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

Олійник Людмили Михайлівни

на тему Використання питомого електричного опору для оперативної оцінки структури коксу

за матеріалами КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

науковий керівник к.т.н.



Шмельцер К.О.

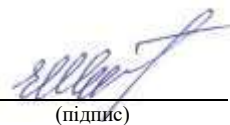
(підпис)

**Робота допущена до захисту в ЕК**

Протокол засідання кафедри

від 13.06.2025 р. № 16

Завідувач кафедри



(підпис)

к.т.н., доцент

К.О. Шмельцер

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

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

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

### ЗАВДАННЯ

#### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Олійник Людмили Михайлівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Використання питомого електричного опору для оперативної оцінки структури коксу

керівник кваліфікаційної роботи бакалавра Шмельцер Катерина Олегівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу №239-ст від «4» квітня 2025 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»

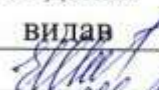



4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Аналітична частина: аспекти формування металургійних властивостей коксу, вимоги до якості коксу для доменної плавки, його функції в доменному процесі. Оптимізація компонентного складу шихт та прогнозування якості коксу, аналіз математичних моделей та досвіду їх використання

4.2 Основна частина: використання питомого електричного опору як комплексного показника структурних характеристик коксу. Вивчення взаємозв'язку показника питомого електричного опору (ПЕО) з упорядкованістю структури коксу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
 Завданням графічний матеріал не передбачений

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	Шмельцер К.О., доцент		
2 Основна частина	Шмельцер К.О., доцент		

7. Дата видачі завдання «21» квітня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	12.05.25	
2.	Основна частина	26.05.25	
3.	Оформлення пояснювальної записки	30.05.25	
4.	Подання роботи до кафедри	02.06.2025	
5.	Захист роботи в ЕК	19.06.2025	

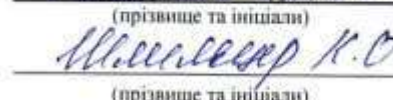
Здобувач

  
(підпис)

  
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

  
(підпис)

  
(прізвище та ініціали)

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



## АНОТАЦІЯ

Олійник Л.М. Використання питомого електричного опору для оперативної оцінки структури коксу – Рукопис.

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

Кваліфікаційна робота присвячена вивченню впливу компонентного складу вугільної шихти та кінцевої температури процесу коксування на питомий опір коксу.

У кваліфікаційній роботі бакалавра наведено літературний огляд, проаналізовано функції коксу в доменній плавці та сформульовано вимоги до його якісних характеристик.

Враховуючи, що на питомий електричний опір і реакційну здатність впливають деякі загальні фактори, такі як рівень температури і готовність коксу, що свідчить про впорядкованість його структури, було встановлено взаємозв'язок між цими показниками.

В роботі зазначено, що електроопір можна вважати сукупною характеристикою властивостей коксу, про що свідчать математичні залежності зміни електроопору від зольності, вмісту сірки, виходу летких і петрографічного складу.

В роботі використовувалися стандартизовані методи вивчення технологічних властивостей вугілля та вугільних шихт (визначення технічного аналізу, петрографічного аналізу, пластометричного аналізу). Вивчення якісних характеристик коксу проводили з використанням термохімічних методів дослідження стандартизованих показників: реакційної здатності (CRI), післяреакційної міцності (CSR). Для аналізу впливу параметрів процесу коксування на характеристики коксу використані методи математичної статистики.

Рекомендовано рівняння регресії, які можуть бути використовуватися для оптимізації компонентного складу та якості виробничих шихт, враховуючи їх суттєвий вплив на питомий опір коксу.

Це особливо актуально при використанні коксу в електротермічних процесах, оскільки від питомого опору коксу залежить продуктивність, електричний і тепловий ККД печі в електрохімічних процесах, в яких вуглецеві матеріали використовуються в якості анодів і футерувальних елементів, а також у виробництві конденсаторної техніки.

Оскільки випробування на питомий опір займає набагато менше часу, ніж випробування на реакційну здатність, запропоновано його використання як альтернативного експрес-методу, який дозволяє оперативно отримати результат без проведення повного дороговартісного лабораторного аналізу реакційної здатності коксу, яке зараз проводиться з метою контролю якості.

*Ключові слова:* питомий електричний опір, структура коксу, температура процесу, післяреакційна міцність, готовність коксу.

## ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Формування металургійних властивостей коксу	9
1.1.1 Вплив механічної міцності на властивості доменного коксу	11
1.1.2 Вплив зольності шихти на властивості коксу	14
1.1.3 Вплив сірчистості на властивості коксу	16
1.1.4 Реакційна здатність коксу	20
1.2 Оптимізація компонентного складу шихт та прогнозування якості коксу	23
1.3 Висновки до аналітичної частини	31
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	33
2.1 Використання питомого електричного опору як комплексного показника структурних характеристик коксу	33
2.2 Вивчення взаємозв'язку показника питомого електричного опору (ПЕО) з упорядкованістю структури коксу	36
2.3 Висновки до основної частини	52
ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55

## ВСТУП

У розвитку коксохімічної промисловості основними завданнями є підвищення якості коксу, використовуваного металургією, і поліпшення техніко-економічних показників його виробництва.

Основним способом виробництва чорного металу на сьогоднішній день і ще довгий час залишатиметься доменне виробництво. Звідси завдання вдосконалення та інтенсифікації наявного коксового виробництва залишаються актуальними. Особливе місце в комплексі завдань і проблем коксохімічної промисловості посідає енергозбереження, використання вторинних енергетичних ресурсів та екологічність виробництва.

Багаторічна практика намітила шляхи і напрямки, що забезпечують одержання коксу високої якості та інтенсифікацію окремих технологічних ланок і виробництва загалом: вдосконалення технології підготовки шихти і коксування, прогресивні методи збагачення вугілля й усереднення під час складування, методи складання вугільних шихт та їхньої підготовки з оптимальним і виборчим дробленням, ущільненням і трамбуванням, а також термопідготовкою і частковим брикетуванням.

Розроблено і продовжують удосконалюватися конструкції коксових печей, системи обігріву і температурні умови коксування. На багатьох коксохімічних підприємствах (КХП) впроваджено установки сухого гасіння, досліджено елементи впливу коксосортування на характеристики фізико-механічних властивостей.

Але, враховуючи, що на 70-80% якість коксу обумовлена властивостями та технологічними показниками якості вугільної сировини, актуальним залишається питання оптимізації компонентного складу вугільних шихт для отримання високоякісного металургійного коксу.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Формування металургійних властивостей коксу

Кокс у доменному процесі є джерелом тепла, відновником залізних руд і розпушувачем шихтових матеріалів [1]. При виплавці чавуну споживається більш 80 % усього коксу, що випускається, тому технологія його одержання в першу чергу орієнтована на вимоги доменників.

Технологія виплавки чавуну безупинно удосконалюється, що у свою чергу обумовлює зміни (у першу чергу – жорсткість) вимог до доменного палива – коксу. Сучасні доменні печі працюють із застосуванням пиловугільного палива, природного газу й кисню, підвищеним тиском газу під колошником, високими температурами дуття й іншими новими технологічними прийомами, спрямованими на інтенсифікацію виробництва. Це приводить до значного зниження витрати коксу (від 475-650 до 250-350 кг/т чавуну). Одночасно із цим значно підвищуються вимоги до властивостей коксу, що характеризується рядом показників, поєднаних у кілька груп.

Хімічний склад речовини коксу визначається його елементним складом (вмістом вуглецю, водню, сірки, кисню, азоту, фосфору), виходом летучих речовин, вмістом баласту (вологи й мінеральних компонентів, що характеризуються зольністю). Зольність і сірчистість коксу визначаються як кількістю й властивостями сірковмісних і мінеральних компонентів у вихідному вугіллі, так і термохімічними перетвореннями цих речовин при нагріванні без доступу повітря, тобто режимом коксування. Вміст у коксі основних хімічних елементів і вихід летучих речовин у першу чергу визначаються глибиною протікання термохімічних перетворень, що характеризується режимом коксування - його кінцевою температурою, швидкістю прогріву коксованого засипу, тривалістю процесу. Вологість коксу визначається в основному способом і технологічними параметрами режиму його гасіння.

Фізичні властивості коксу взаємозалежні зі структурою його речовини. Це - параметри надмолекулярної й макромолекулярної будови, щільність, пористість, питомий електроопір, структурна міцність, абразивна твердість, теплотворна здатність, теплоємність і теплопровідність. Як і в попередньому випадку, формування цієї групи властивостей відбувається під впливом як характеристик вихідної сировини, так і параметрів його переробки. Зокрема, для одержання коксу з необхідними фізичними властивостями сировина для його одержання повинне мати певну спікливість – здатність суміші вугільних зерен утворювати при нагріванні без доступу повітря спечений або сплавлений твердий залишок [2]. Кількісно спікливість у вітчизняній виробничій і науковій практиці найчастіше характеризують товщиною пластичного шару  $u$ , мм. Поглиблення термохімічних перетворень вугільної речовини також приводить до поліпшення структури одержуваного коксу.

Фізико-механічні властивості коксу характеризують у першу чергу його механічну міцність і гранулометричний склад. Тут також проявляється вже відзначена закономірність – на формування цієї групи властивостей впливають як властивості вихідної сировини, так і технологія її переробки.

До фізико-хімічних властивостей коксу відносяться такі його характеристики, які визначають здатність кускового матеріалу до гетерогенних (багатофазних) хімічних взаємодій [3]. Серед них найбільше значення має реакційна здатність, тобто здатність до взаємодії вуглецю коксу з компонентами дуття з утворенням відновних газів для непрямого відновлення заліза – основного процесу доменної плавки.

У сучасних умовах (наявність комбінованого дуття) кількість газифікованого коксу зростає. У шахті доменної печі при певних температурах починає розвиватися небажаний процес прямого відновлення оксидів заліза.

Чим менше реакційна здатність коксу, тем нижче його витрата на пряме відновлення й тим більша його кількість спалюється у фурмах із утворенням потім відновних газів.

Однак при загальній тенденції відносно вимог до доменного коксу по зниженню реакційної здатності вона не повинна опускатися нижче певної межі. Кокс все-таки повинен мати певну мінімально необхідну реакційну здатність при високих температурах, при якій вуглекислий газ і водяні пари в горні повністю регенеруються.

Таким чином, основними показниками, що визначають комплекс споживчих властивостей доменного коксу, є його механічна міцність, склад (насамперед зольність і сірчистість) і реакційна здатність.

### **1.1.1 Вплив механічної міцності на властивості доменного коксу**

Як ми вже відзначали, на якість доменного коксу впливають два комплекси факторів: перший з них зв'язаний із властивостями сировини, що переробляється (вугілля і шихт), а другий – з режимом коксування й післяпичною обробкою коксу (гасіння й сортування).

Більшість дослідників серед властивостей вугілля і шихт, найбільшою мірою, що впливають на якість одержуваного коксу, виділяють вихід летучих речовин, спіктивість шихти, петрографічну характеристику, зольність, сірчистість, а також технологічний режим вуглепідготовки [4, 5].

Показник виходу летучих речовин – одна з основних характеристик, застосовувана як при поставці вугілля для коксування, так і при розробці складу вугільних шихт. Численними дослідженнями показаний взаємозв'язок цього показника з виходом коксу й хімічних продуктів [6-10]. У той же час вихід летучих речовин може бути близьким або навіть однаковим у вугілля і його сумішей, що мають досить різні технологічні властивості.

Важливим для характеристики властивостей вугілля і шихт є також показник середньої відбивної здатності вітриніту за даними петрографічного аналізу. Є певний взаємозв'язок цього показника з виходом летучих речовин. Однак відбивна здатність вугілля і шихт більш тісно пов'язана з міцністю одержуваного з них коксу, тому що петрографічні показники по своїй суті

характеризують природу вугілля з погляду як характеристик вихідного вуглетворюючого матеріалу, так і глибини протікання геологічних процесів. Зокрема, найбільш міцний кокс отримують, як правило, з вугілля Донбасу й шихт на його основі з величиною відбивної здатності близько 1-1,2 %.

Співкисливість вугілля в країнах СНД характеризують в основному по даним пластометричного аналізу, насамперед по товщині пластичного шару  $u$ , мм. Відомо [11], що індивідуальні вугілля марок Ж і К, що мають найбільшу товщину пластичного шару, дають найбільш міцний кокс. Аналогічно й шихти з більш високим показником товщини пластичного шару дають, як правило, також більш міцний кокс.

Таким чином, основними показниками, що характеризують властивості шихти, є товщина пластичного шару й середній показник відбиття вітриніту.

Відомо, що рівень подрібнення вугільної шихти помітно впливає на її технологічні властивості [12, 13]. Найціннішими із цього погляду у вугіллях Донбасу є класи крупності 3-0,5 мм. Більші зерна мають меншу величину питомої поверхні, що не дозволяє їм брати активну участь у поверхневій взаємодії з іншими елементами вугільного засипу на стадіях спікання й коксоутворення. Навпаки, переподрібнення вугільних зерен приводить до так званого явища «самоопіснення», у результаті чого утрудняється реалізація властивого вугіллю і шихтам потенціалу співкисливості. Вугілля інших басейнів має ще більш складну й неоднозначну залежність технологічних властивостей від ступеня подрібнення, який вимагає проведення спеціальних досліджень у кожному конкретному випадку.

Крім того, переподрібнення вугілля приводить до збільшення кількості твердих часточок, що виносяться газами завантаження з камери коксування в газозбірник, у результаті цього збільшується вихід фусів і погіршується якість смоли по показникам щільності й вмісту нерозчинних речовин. При недостатньому ступені подрібнення шихти також відбувається погіршення умов експлуатації коксових печей: утрудняється рівномірний прогрів вугільного засипу, відбувається зростання зусиль видачі коксового пирога, погіршується

якість коксу. Нарешті, надмірне переподрібнення вугілля приводить до непродуктивної витрати електроенергії.

Коксохімічні підприємства використовують вугілля різних марок, що надходять від досить великої кількості постачальників. Це вугілля має різну механічну міцність і, отже, дробимість, а також різну вихідну крупність, що не дозволяє досягнути його оптимального подрібнення при однаковому режимі вуглепідготовки різних компонентів шихти, що навіть належать до однієї марки.

Основними факторами технології коксування й позапічної обробки, що впливають на властивості коксу, є: період коксування, рівень температур у контрольних вертикалах, рівномірність прогріву коксованого засипу по всьому об'єму, насамперед по висоті, а також по довжині в зонах напроти головочних вертикалів, кінцева температура коксового пирога, режими гасіння й сортування коксу [14].

При правильній експлуатації зміна періоду коксування спричиняє відповідну зміну (зниження при подовженні й підвищення при зменшенні) рівня заданих температур у контрольних вертикалах. Раціональне розміщення регулювальних засобів в опалювальній системі коксових батарей і використання вікон рециркуляції продуктів горіння дозволяють забезпечити задовільну рівномірність прогріву коксованого засипу по висоті. Рівномірність прогріву по довжині в зоні напроти середнього завантажувального люка забезпечується деяким (на 5-15 °С) підвищенням температури у вертикалах цієї зони [15-17]. Рівномірність прогріву в зоні напроти головочних вертикалів досягається при використанні спеціального обладнання для підведення повітря й бідного опалювального газу в крайні й передкрайні опалювальні канали коксових печей (наприклад, [18]). Усі ці заходи дозволяють при будь-якому періоді коксування забезпечувати середню кінцеву температуру по всьому об'єму коксового пирога в рекомендованому ПТЕ інтервалі 1000-1100 °С.

Режими гасіння коксу на підприємствах, як правило, витримуються постійними (витрата води на гасіння, тривалість її подачі, час відстою коксу у

вагоні під вежею, тривалість витримування коксу на рампі). Також постійним є й технологічний режим сортування коксу. Для стабілізації властивостей коксу застосовується ряд технічних рішень - ударні плити для механічної обробки коксу в потоці, дробарки, обладнання для зниження засміченості доменного коксу [19-21]. Таким чином, основним показником, що характеризує умови коксування, є тривалість періоду коксування.

### **1.1.2 Вплив зольності шихти на властивості коксу**

На зольність одержуваного коксу впливають наступні основні фактори: зольність вихідного вугілля; термохімічні перетворення різних мінеральних речовин при коксуванні; вихід коксу із шихти; кінцева температура коксування (готовність коксу); умови видачі й позапічної обробки коксу; зовнішні джерела мінеральних речовин, внесених у шихту й кокс.

Рівень зольності вихідного вугілля є головним чинником, що визначає за інших рівних умов зольність коксу. Однак залежність між зольністю вугілля і коксу не є прямо пропорційною. Відхилення від пропорційності обумовлені впливом інших перерахованих вище факторів.

З погляду впливу на зольність термохімічних перетворень мінеральних речовин вугілля при коксуванні насамперед становлять інтерес реакції, що протікають в інтервалі температур від 825 до 1130 °С, тобто при температурах вище температури озолення вугілля при їхньому технічному аналізі, але нижче максимально можливої температури в пристіночних шарах камери наприкінці періоду коксування. Також на коефіцієнт озолення можуть впливати реакції, що протікають і при більш низьких температурах, але з невисокою швидкістю, тобто ті, які не реалізуються повністю при озоленні вугілля через недолік часу, але встигають відбутися протягом періоду коксування в камері.

Такі реакції можуть приводити як до збільшення маси мінеральних речовин і, отже, росту зольності коксу, так і до зменшення маси мінеральних речовин і, отже, зниженню зольності. До збільшення маси мінеральних речовин

приводить, наприклад, реакція повільного окиснення оксиду заліза (II) в оксид заліза (III) при взаємодії з активним (атомарним) киснем, що виділяються при термічній деструкції вугілля.

Зменшення маси мінеральних речовин відбувається, зокрема, при термічному розкладанні сульфатів деяких металів - алюмінію, заліза й магнію при температурах вище 770, 800 і 1127 °C відповідно [22].

Сірчаний ангідрид  $SO_3$ , що виділяється, поступово відновлюється до газоподібного складу сірки або до елементної сірки, здатної до утворення хімічних зв'язків з органічною масою коксу.

Таким чином, кінцевий рівень зольності коксу залежить від складу мінеральних речовин вихідного вугілля. Вугілля проявляє помітні відмінності в хімічному складі золи.

Помітний вплив на зольність коксу виявляє вихід коксу із шихти. Зольність визначають як відсоткове відношення маси мінеральних речовин, отриманих при озоленні, до маси наважки шихти або коксу. Відношення зольності коксу  $A_k^d$  до зольності шихти, з якої він отриманий  $A_{ш}^d$ , являє собою коефіцієнт озолення. По своїй суті він пов'язаний з виходом валового коксу від шихти й зміною маси мінеральних речовин вугілля в результаті термохімічних перетворень при коксуванні.

Вплив на зольність отриманого коксу кінцевої температури коксування обумовлений тим, що ріст кінцевої температури на 100 °C призводить до зниження виходу коксу на 0,2-0,7 % [23]. Це, у свою чергу, приводить до збільшення коефіцієнта озолення й зольності коксу. Результати експериментальних досліджень свідчать, що при підвищенні кінцевої температури коксування на 200 °C (від 900 до 1100 °C) зольність коксу збільшується на 0,4 %.

При видачі й післяпичній обробці протягом певного часу відбувається контакт розпеченого коксу з киснем повітря (зняття дверей з печі перед видачею, прийом коксу в гасильний вагон і транспортування його до вежі гасіння). Це приводить до вигорання частини коксу, зменшенню його маси й підвищенню зольності. При дотриманні вимог ПТЕ (час простою печей зі знятими

перед видачею дверима не більш 5 хв, час прийому коксу з однієї камери в гасильний вагон не більш 40 с, рівномірне укладання коксу у вагон, час руху вагона з розпеченим коксом до гасильної вежі не більш 45 с) додатковий ріст зольності не перевищує 0,1-0,2 %.

Зовнішнім джерелом мінеральних речовин, внесених у шихту й кокс, є відпрацьовані розчини цехів сіркоочищення, особливо миш'яково-содового. Цей розчин, що містить солі натрію (роданід  $\text{NaCNS}$ , тіосульфат  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , сульфат  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), знешкоджується шляхом подачі у відстійник веж гасіння й у шихту.

При знешкодженні розчину його компоненти перетерплюють термохімічні перетворення, кінцевими продуктами яких є карбонат і сульфат натрію. Крім того, сульфат натрію втримується й у вихідному розчині. Це призводить до росту зольності коксу за рахунок додаткової кількості внесених у нього склад натрію.

Знешкодження всього утвореного розчину миш'яково-содового сіркоочищення шляхом подачі у відстійник вежі гасіння або в шихту приводить до росту зольності коксу на 0,4-1,1 %. Різна величина росту зольності обумовлена не тільки неоднаковим механізмом термохімічних перетворень компонентів розчину в шихті й на розпеченому коксі, але й різними об'ємами переробки шихти й випуску коксу на різних батареях. При вакуум-карбонатному способі очищення газу від сірководню кількість утворених баластних солей значно менша, і їх можна знешкоджувати в складі шихти для коксування без істотного підвищення зольності коксу [24].

### **1.1.3 Вплив сірчистості на властивості коксу**

На сірчистість одержуваного коксу впливають наступні основні фактори: сірчистість вихідних вугілля; термохімічні перетворення сірковмісних речовин вугілля при коксуванні; вихід коксу із шихти; кінцева температура

коксування (готовність коксу); умови видачі й позапічної обробки коксу; зовнішні джерела сірковмісних речовин, внесених у шихту й кокс.

У цей час коксохімічні підприємства працюють на вугіллі різних басейнів, що має неоднаковий рівень сірчистості. Найбільш високу сірчистість мають концентрати типового вугілля Донецького басейну - 1,73-3,50 %.

Як ми вже відзначали, різні види сірчистих сполук у вугіллі і їх термохімічні перетворення є одним з найважливіших факторів, що впливають на рівень сірчистості коксу й коефіцієнт знесірчення. Як відомо, сірка у вугіллях може перебувати в трьох основних видах - піритна, сульфатна й органічна [25].

Піритна сірка при коксуванні переходить у кокс і парогазові продукти приблизно в рівному співвідношенні. Пірит у відновному середовищі реагує з воднем, у результаті чого один атом сірки утворює сульфід, а інший - сірководень.

Сульфатна сірка обумовлена в основному наявністю в мінеральній частині вугілля сульфатів різних металів із загальною формулою  $Me_x(SO_4)_y$ . Ці сульфати, як правило, термічно стійкі, і тому при коксуванні сульфатна сірка практично не перетерплює термохімічних перетворень, і повністю переходить у кокс.

Термохімічні перетворення органічної сірки залежать від розташування атомів сірки в макромолекулі вугільної речовини. Якщо атом сірки розташований у бічному ланцюзі, то, як правило, при руйнуванні цього ланцюга в процесі термохімічної деструкції вугілля сірка переходить у низькомолекулярні парогазові продукти. Якщо ж атом сірки розташований усередині гетероароматичної структури, то, як правило, разом із цією структурою він утворює високомолекулярний твердофазний продукт деструкції. Більша частина атомів сірки входить до складу гетероароматичних структур, тому органічна сірка в основній своїй масі переходить саме в кокс.

Усередині кожного вугільного басейну більшість вугілля, за деяким виключенням, має приблизно однакове співвідношення сірки різних видів. Тому для кожного вугільного басейну можливо визначити коефіцієнт переходу

сірковмісних речовин з вугілля в кокс, застосовний у більшості випадків. Але між басейнами співвідношення між різними типами сірки у вугіллі, як і загальний рівень сірчистості, суттєво відрізняється.

Вихід коксу із шихти впливає не тільки на зольність, але й на сірчистість коксу. Сірчистість визначають як відсоткове відношення маси сірки в складі сірковмісних речовин, отриманих при аналізі аналітичної проби, до маси наважки шихти або коксу. У більшості випадків сірчистість коксу нижче, ніж сірчистість шихти (коефіцієнт переходу сірковмісних речовин із шихти в кокс, як правило, нижче, чим вихід коксу). Однак при більшому виході коксу із шихти сірчистість коксу стосовно сірчистості шихти знижується більшою мірою, ніж при меншому виході коксу, коли сірчистість коксу стосовно сірчистості шихти знижується меншою мірою. Відношення сірчистості коксу до сірчистості шихти, з якої він отриманий, являє собою коефіцієнт знесірчення.

По своїй суті коефіцієнт знесірчення пов'язаний з виходом валового коксу від шихти й коефіцієнтом переходу сірковмісних речовин вугілля в кокс у результаті їх термохімічних перетворень при коксуванні.

Вплив на сірчистість отриманого коксу кінцевої температури коксування незначний, тому що при рості кінцевої температури зниження виходу коксу практично компенсується додатковим переходом сірки в парогазові продукти в результаті реакцій поліконденсації. При видачі й післяпичній обробці протягом певного часу відбувається вигорання частини коксу й зменшення його маси. Однак це, як і в попередньому випадку, не приводить до помітної зміни сірчистості, тому що при цьому одночасно згоряють і сполуки сульфідної й піритної сірки, що становлять більшу частину сірковмісних сполук коксу.

Додатковими зовнішніми джерелами сірки, внесеної у вугілля й кокс, є виробничі відходи, що додаються в шихту для коксування (серед найбільш сірчистих відходів слід зазначити автоклавний бруд і некондиційну сірку газу, які утворюються в цеху миш'яково-содового сіркоочищення), а також відпрацьовані розчини із цеху сіркоочищення.

Збільшення сірчистості коксу за умови рівномірного розподілу додаткової сірки, внесеної виробничими відходами, не перевищує помилки визначення даного показника.

Як ми вже відзначали, кінцевим продуктом термохімічних перетворень компонентів відпрацьованого розчину цехів сіркоочищення є сульфат натрію, який також міститься й у вихідному розчині. Це приводить до росту сірчистості коксу за рахунок додаткової кількості внесеного в нього сульфату натрію.

Знешкодження відпрацьованого розчину миш'яково-содового сіркоочищення шляхом подачі у відстійник вежі гасіння приводить до росту сірчистості коксу на 0,27-0,50 %. При знешкодженні розчину в шихті сірчистість коксу зростає на 0,15-0,28 %. Як ми вже відзначали, при вакуум-карбонатному способі очищення газу від сірководню кількість утворених баластових солей значно менше, і їх можна знешкоджувати в складі шихти для коксування без істотного підвищення сірчистості коксу [24].

Як і при росту зольності, різна величина приросту сірчистості на різних батареях обумовлена не тільки неоднаковим механізмом термохімічних перетворень компонентів розчину в шихті й на розпеченому коксі, але й різними об'ємами переробки шихти й випуску коксу на різних батареях заводу.

Слід зазначити, що кардинально розв'язати проблему зовнішніх джерел мінеральних і сірковмісних речовин, внесених у шихту й кокс, можливо лише шляхом технічного переозброєння цехів сіркоочищення із застосуванням сучасних технологій.

Таким чином, основними факторами, що впливають на формування зольності й сірчистості коксу, є: сірковмісні й мінеральні речовини вихідного вугілля, його термохімічні перетворення, технологія коксування вугілля й післяпічної обробки коксу, а також зовнішні джерела мінеральних і сірковмісних речовин.

#### **1.1.4 Реакційна здатність коксу**

У результаті виконаних протягом багатьох років дослідницьких робіт [26-28] встановлено, що на металургійні властивості, що характеризуються реакційною здатністю й термомеханічною міцністю коксу, впливають наступні основні фактори: комплекс властивостей вугільної шихти (зольність і склад мінеральної частини, вихід летучих речовин, товщина пластичного шару, середній показник відбиття й розподілу вітриніту по відбивній здатності, коефіцієнт технологічної цінності шихти, технологія вуглепідготовки) і технологічного режиму коксування (період коксування, температури в контрольних вертикалах, рівномірність прогріву засипу по висоті й довжині, кінцева температура по осі коксового пирога, готовність коксу). Гарний металургійний кокс повинен мати оптимальну величину реакційної здатності (не дуже високу й не дуже низьку) і високу термомеханічну міцність.

Кокс із більш зольної шихти має більш високу реакційну здатність і меншу термомеханічну міцність. Обумовлене це каталітичним впливом на процеси газифікації оксидів ряду металів (натрію, калію, кальцію, магнію, заліза й ін.) і сульфатів, що містяться в золі. Але мінеральна частина вугілля й коксу може містити й оксиди елементів, що інгібують реакції газифікації (наприклад, алюміній, кремній, титан). При підвищеному їхньому вмісті в мінеральній частині за інших рівних умов реакційна здатність коксу може знижуватися, а термомеханічна міцність - зростати. Таким чином, на ці показники істотний вплив виявляє не тільки зольність коксу, але й хімічний склад його золи [29]. У зв'язку із цим додатковий негативний вплив також виявляють зовнішні джерела сполук натрію, внесених в кокс, зокрема при утилізації відпрацьованих розчинів цехів сіркоочищення.

Залежність металургійних властивостей коксу від виходу летучих речовин і середнього показника відбиття вітриніту має вигляд кривої з екстремумом, відповідним до найкращої комбінації технологічних властивостей коксу як доменного палива в області показників, що відповідають добре спікливим вугіллям марок Ж и К. Підвищення товщини пластичного шару, коефіцієнта технологічної цінності шихти, оптимізація розподілу вітриніту по стадіях

відбиття, технологія вугледготовки, що сприяє підвищенню ступеня усереднення вугілля і шихт і досягненню оптимального ступеня подрібнення шихти в цілому й окремих її компонентів, приводять до зниження до оптимальних значень реакційної здатності й підвищенню термомеханічної міцності.

При правильно встановленому режимі період коксування визначає значення всіх інших перерахованих вище технологічних показників коксування. Зі збільшенням періоду, підвищенням рівня температур і готовності коксу росте його термомеханічна міцність і знижується реакційна здатність. Слід зазначити, що при збільшенні періоду коксування понад оптимальний (25 год і більш) структурованість коксу надмірно збільшується, що приводить до зниження реакційної здатності коксу нижче оптимальних значень.

Реакційна здатність визначається головним чином станом вуглецевої структури – ступенем упорядкованості вуглецевого скелета речовини коксу і величиною його доступної питомої поверхні, яка пов'язана з мікро- та макропористістю.

Для оцінки стійкості коксу до термомеханічних і окиснюваних впливів використовують ряд методик, що характеризують реакційну здатність і термомеханічну міцність коксу.

Реакційну здатність коксу за ДСТУ 10089 визначають по швидкості взаємодії реакція  $C+O_2 \rightarrow CO_2$ . Метод передбачає тестування коксу крупністю 1-3 мм в кількості 1 г, що при всій своїй експресності не дозволяє оцінити термомеханічна міцність, тому що розмір коксу, який досліджують, не відповідає своєму реальному розміру в доменному процесі, що значно впливає на швидкість гетерогенної взаємодії.

Найбільшого поширення у світовій практиці оцінювання якості коксу отримала методика Nippon Steel Corporation. Методика Nippon Steel (Японія) передбачає газифікацію коксу крупністю 19-22,4 мм (приготовлену з вихідного коксу крупністю більш 25 мм) у спеціальній установці протягом 2 год і визначення реакційної здатності CRI (по ступеню втрати маси) і міцності коксу CSR після реакції із  $CO_2$  (по виходу класу більш 9,5 мм після обробки

протягом 30 хв зі швидкістю обертання 20 об/хв у спеціальному барабані довжиною 700 і діаметром 130 мм) Перевага методу: широке використання у світовій практиці для контролю якості коксу при його виробництві, продажах і застосуванні. Однак, незважаючи на широке застосування, він має ряд істотних недоліків: складність підготовки проб вузької фракції, тривалість визначення, оцінка міцності коксу відбувається після реакції з діоксидом вуглецю без термічного та хімічного впливу. Недоліком також можна вважати і те, що крупність досліджуваної проби істотно відрізняється від фактичної крупності коксу, який використовується в доменній печі. До недоліків також слід віднести досить високу погрішність визначення. В Україні в якості ДСТУ 4703-2006 для визначення показників за цією методикою застосовується модифікований міжнародний стандарт ISO 18894-2006. В Україні працює вісім установок для визначення показників CRI та CSR у провідних виробників і споживачів коксу, а також у дослідницьких організаціях.

Відповідно до даних закордонних дослідників, кокс гарної якості повинен мати показники: CRI <30 %, CSR >70 %. У той же час дослідження коксу українських підприємств показали, що більшість коксу, що випускається, має, як правило, значення CRI на рівні 30-35 % та CSR - 45-50 %. При цьому показники реакційної здатності CRI і післяреакційної міцності CSR відповідно на 97,3 і 91,8 % детермінуються показником виходу летучих речовин із шихти (, що характеризують, у цьому випадку, у першу чергу співвідношення в шихті вугілля різного ступеня метаморфізму) і індексом основності золи шихти — відношенням вмісту в ній основних (FeOx, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) і кислотних (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) оксидів.

Одержання коксу з показниками CRI <30 % і CSR >50 % можливо із шихт із величиною індексу основності золи  $I_o < 0,15$  і виходом летучих речовин (на горючу масу) не більш 29 %, що відповідає середньому показнику відбиття вітриніту шихти не менш 1,05 % [31-34]. Аналіз ресурсів українського коксівного вугілля показує, що максимальний об'єм випуску коксу, що відповідає наведеним вище вимогам, обмежено 5-6 млн т у рік. Це відповідає потребі у

високоякісному коксі для створюваних зараз провідними виробниками чавуну України установок для вдування в доменні печі пиловугільного палива. У перспективі, при розширенні об'ємів використання пиловугільного палива, необхідний імпорт вугілля із необхідними характеристиками, у першу чергу по хімічному складу золи.

При цьому актуальною є диференціація наявних вугільних сировинних ресурсів з метою виробництва на різних коксових батареях з урахуванням їх конструкцій, строку експлуатації й технічного стану коксу з різними властивостями (підвищеною механічною міцністю, низкою реакційною здатністю, зниженою сірчистістю і т.д.) для використання при виплавці чавуну різного призначення в доменних печах різного об'єму. Такий підхід дозволить підвищити техніко-економічну ефективність виробництва як при випуску коксу, так і при його використанні.

Слід зазначити, що жодна з існуючих методик визначення реакційної здатності не дозволяє дати всебічну оцінку якості коксу як доменного палива. Тому характеризувати реакційну здатність коксу в сучасних умовах необхідно, на нашу думку, одночасно за допомогою декількох методик. Це не виключає, а навпаки, робить актуальним удосконалювання наявних і розробку нових методик оцінки реакційної здатності коксу в напрямку розробки способу, що дозволяє найбільше об'єктивно, із прийнятними витратами матеріальних і трудових ресурсів, а також часу оцінити властивості доменного палива.

## **1.2 Оптимізація компонентного складу шихт та прогнозування якості коксу**

Для оптимізації складу шихт та прогнозування якості коксу розроблені різні моделі. Група моделей першого покоління фокусується на прогнозуванні показників холодної механічної міцності (тобто стабільності ASTM та індексів, отриманих при обробці коксу в барабані MICUM). Пізніші моделі другого покоління використовують як параметри якості коксу CRI і CSR. Не

розроблено універсальних моделей прогнозування якості коксу, що пов'язано зі специфічними особливостями вугілля з різних вугільних басейнів, країн, континентів, які можуть різко розрізнятися за складом, будовою та властивостями.

Аналіз математичних моделей прогнозування якості коксу з урахуванням властивостей вугілля, розроблених сталеливарними компаніями та дослідницькими інститутами, представлений у роботах [10, 21]. Основні змінні, які враховуються у деяких математичних моделях, представлені у таблиці 1.1.

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

Можна відзначити, що моделі змінювалися з часом, оскільки зазнавали змін і ринок вугілля, і методи видобутку, а також удосконалювалися технології підготовки ТГК та виробництва коксу відповідно до вимог доменної плавки. Складність також полягає в тому, що поширення набули різні методи оцінки властивостей коксу, в основі яких лежить моделювання механічного впливу, що діє на кокс у доменній печі (випробування MICUM в Україні та країнах СНД, IRSID у Європі, DI 150/30 в Японії).

При складанні багатокомпонентних шихт необхідно поєднувати добреспік-ливе вугілля, що забезпечують утворення рідинно-рухливої пластичної маси, з опіснюючими компонентами, що підвищують в'язкість пластичної маси і сприяють отриманню крупного і міцного коксу. Збільшувати кількість компонентів у вугільних сумішах необхідно за рахунок вугілля з проміжними властивостями [14, 15].

Таблиця 1.1

**Моделі прогнозування CSR та змінні, які вони враховують**

Компанія/дослідний інститут/дослідники	Змінні характеристики вугілля			
	Петрографічні характеристики	Реологічні характеристики пластичного стану вугілля	Характеристики неорганічної частини	Інші
1	2	3	4	5
British Steel	Показник відбиття вітриніту		Зольність коксу	
Nippon Steel	Вміст інертиніту, %, відбивна здатність вітриніту	Максимальна плинність	Індекс основності золи	
BCRA	Вміст інертиніту, %	Максимальна плинність	Вміст основних оксидів у вугіллі	Вміст вуглецю та кисню у вугіллі, пористість коксу
Kobe Steel	Відбивна здатність вітриніту	Максимальна плинність	Основність золи	
BHP	Вміст інертних компонентів	Максимальна плинність	Основність вугільної золи	Вихід летких речовин
Inland Steel		Температура переходу вугілля у пластичний стан	Індекс основності золи	Вміст сірки у вугіллі
ISCOR	Показник відбиття вітриніту, вміст фюзенізованих компонентів	Максимальна плинність	Вміст основних оксидів у золі вугілля	

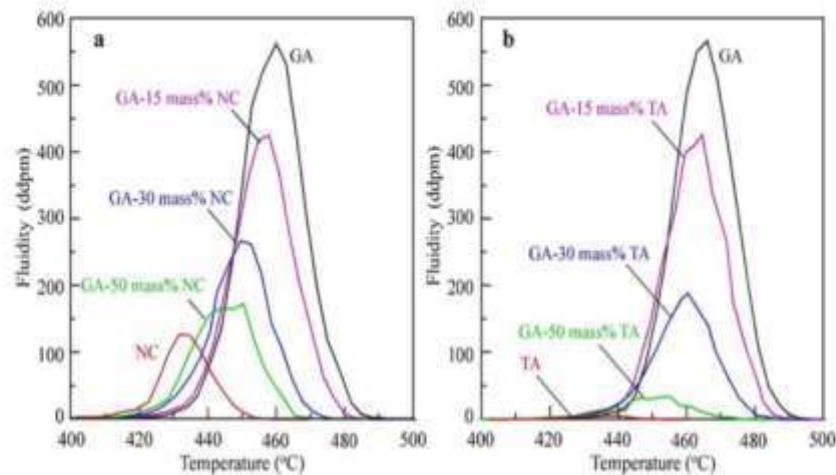
Продовження таблиці 1.1

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

Примітка. Джерело: Розроблено автором

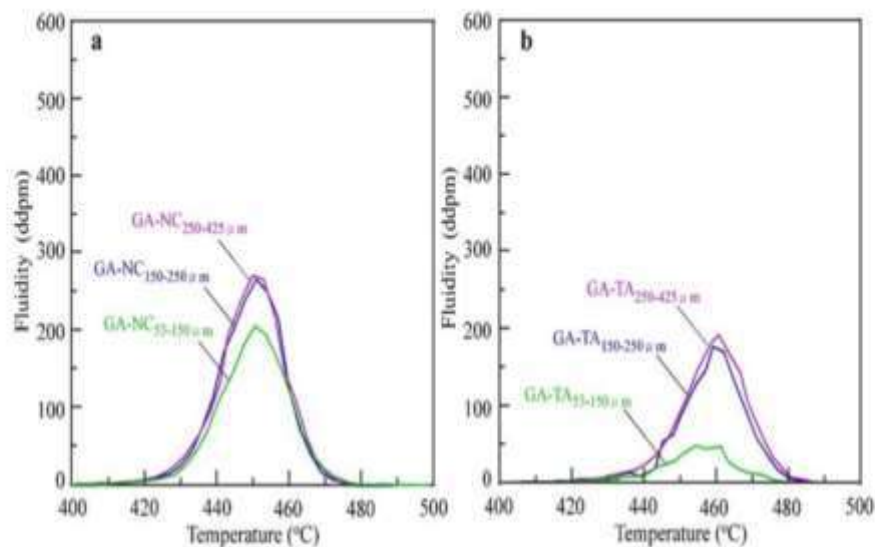
Залучення проміжних компонентів має особливе значення при введенні в шихту газового вугілля. Їх введення в шихту сприяє отриманню більш рівномірного за крупності коксу [35].

Тому ще одним напрямком прогнозування властивостей коксу є використання показників вугілля, які характеризують його здатність переходити у пластичний стан і потім спікатися. Були зроблені спроби за відомими властивостями пластичної маси індивідуального вугілля прогнозувати якість коксу, а також використовувати додаткові показники технологічних властивостей вугілля як критерії оптимальності при складанні шихт.



**Рис.1.2. Вплив вмісту неспікливого (а) або слабоспікливого (б) вугілля в суміші на плинність за Гізелером на прикладі шихт з австралійського вугілля (GA – спікливе вугілля, NC – неспікливе вугілля, TA – слабоспікливе вугілля)**

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [36].



**Рис.1.3. Залежність максимальної плинності за Гізелером шихти з австралійського вугілля від розміру вугільних зерен (250–425, 150–250 та 53–150 мкм):**

**(а) (70 % GA (спікливого вугілля) + 30 % NC (неспікливого вугілля), (б) 70 % GA (спікливого вугілля) + 30 % TA – слабоспікливе вугілля) .**

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [36].

На думку авторів [27, 37] прийняття рішення про можливість використання тієї чи іншої марки вугілля у складі шихти для коксування має ґрунтуватися на значенні показників відбивної здатності вітриніту та максимальної плинності за Гізелером.

Пластичність вугільних сумішей при піролізі визначається співвідношенням та взаємним розподілом компонентів. Так, плинність за Гізелером зменшується зі збільшенням вмісту в суміші неспікливого або слабоспікливого вугілля. Крім того, плинність має тенденцію до зменшення зі зменшенням розміру частинок неспікливого або слабоспікливого вугілля у вугільних сумішах [37].

В результаті вивчення впливу факторів та властивостей вугілля на формування властивостей коксу Джорданом запропоновано модель [21], яка враховує поведінку вугілля у пластичному стані, його дилатометричні характеристики. Фактор плинності (*Fluidity Factor*) базується на концепції Сімоніса (G-фактор), та розглядається як безрозмірний адитивний параметр для окремого вугілля у вугільних сумішах і являє собою взаємозв'язок між максимальною плинністю і температурою, які фіксуються в ході визначення дилатометричних характеристик.

$$\text{Fluidity Factor} = \frac{Tf_1 + Tf_3}{2} \times \frac{MF + (Tf_3 - Tf_1)}{MF \times Tf_2} \quad (1.20)$$

де  $Tf_1$  – початкова температура розм'якшення,  $Tf_2$  – температура, при якій спостерігається максимальна плинність,  $Tf_3$  – температура повторного затвердіння,  $MF$  – максимальна плинність.

Були зроблені спроби за відомими властивостями пластичної маси індивідуального вугілля прогнозувати якість коксу, а також використовувати додаткові показники технологічних властивостей вугілля як критерії оптимальності при складанні шихт.

Так, в результаті вивчення впливу факторів та властивостей вугілля на формування властивостей коксу Сімонісом запропоновано модель [10], яка

враховує поведінку вугілля у пластичному стані, їх дилатометричні характеристики. Запропонований вченим G-фактор розглядався як безрозмірний адитивний параметр для окремого вугілля у вугільних сумішах і являв собою взаємозв'язок між амплітудою і температурою, які фіксувалися в ході визначення дилатометричних характеристик.

$$G = \frac{T_s + T_r}{2} \cdot \frac{c + d}{T_s d + T_r c} \quad (1.3)$$

З рівняння (7) випливає, що G-фактор зростає зі збільшенням дилатації вугілля, розширення пластичного діапазону за рахунок зниження температури розм'якшення  $T_s$  [10].

Авторами [33] запропоновано нову методику для оцінки спікливої здатності вугілля та вугільних сумішей на основі коефіцієнта, який має назву композитний потенціал коксування (ССР). Значення ССР характеризує придатність вугілля/вугільної суміші для виробництва коксу бажаної якості, яка оцінюється міцністю коксу після реакції (CSR). Коефіцієнт композитного потенціалу коксування враховує хімічні, реологічні та петрографічні властивості вугільної сировини, такі як зольність, вихід летких речовин, показник спучення, тип коксового залишку за методом Грей-Кінга (за індійським стандартом IS1353:1993), максимальну плинність, показник відбиття вітриніту, співвідношення між спікливими (вітриніт, ліптиніт) та інертними (інертиніт) мацералами органічної маси вугілля, рефлектограму вітринітової складової, співвідношення  $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  та індекс лужності.

В роботі [33] коефіцієнт ССР для вугілля запропоновано розраховувати за рівнянням:

$$ССРofcoal = \frac{\sum_{m=1}^{10} (w_m \times R_{pm})}{100} \quad (1.4)$$

де  $W_m$  – Weightage (кожній властивості  $m$  надається певне значення (вага  $W_m$ ), відповідно до її впливу на коксівність вугілля);  $R_{pm}$  – потенціал коксування  $m$ -ої властивості  $p$ -го зразка вугілля.

Для вугільної шихти коефіцієнт обчислюється наступним чином:

$$CCPofcoalblend = \frac{\sum_{p=1}^n (wt_p \times CCPofcoal)}{100} \quad (1.5)$$

$wt_p$  - частка вугілля в шихті.

Встановлено, що вугільна суміш з вищим коефіцієнтом  $CCP \geq 4,7$  забезпечує отримання коксу з високими значеннями післяреакційної міцності  $CSR \geq 65\%$ . Залежність описується рівнянням (1.6):

$$PredictedCSR = 51.7 + (2.8 \times CCPofcoalblend) \quad (1.6)$$

Математична модель, описана рівнянням 23, що показала ефективність в умовах заводу Tata Steel (Індія), використовується для оптимізації складу вугільних шихт, як за властивостями, так і з урахуванням вартості вугільної сировини. Її застосування дозволяє забезпечити виробництво коксу з високими термохімічними властивостями [32].

І, насамкінець, особливу увагу слід звернути на ряд моделей, що використовують комплексний підхід до прогнозування властивостей коксу на основі характеристик вихідної сировини (шихти).

Новий комплексний підхід до прогнозування реакційної здатності коксу (CRI) та його міцності після реакції з  $CO_2$  (CSR) представлений в роботі [33]. Для досліджень використовували 41 коксівне вугілля та 36 варіантів вугільних шихт. Вугілля та вугільні шихти оцінювали наступними показниками якості: зольність ( $A^d$ ), вміст загальної сірки ( $S^d_t$ ), вихід летких речовин ( $V^d$ ), індекс вільного спучення (SI), максимальна плинність за Гизелером ( $F_{max}$ ), індекс лужності, контракція ( $a$ ) та дилатація ( $b$ ) за методом Одібера-Арну, відбивна здатність вітриніту (R), мацеральний склад (вміст вітриніту  $V_t$ , інертиніту I та ліптиніту L). Були запропоновані двоступеневі моделі. В моделі 1 перший крок

– попередній розрахунок CRI/CSR з використанням модифікованих рівнянь регресії, які попередньо використовувались для прогнозування якості коксів, отриманих при коксуванні індивідуального вугілля (тип I - кокси, отримані при коксуванні індивідуального вугілля). В моделі 2 на першому етапі виконується розрахунок значень CRI/CSR для коксів, отриманих з вугільних шихт (тип II - кокси, отримані при коксуванні вугільних сумішей (шихт)), з використанням розрахованих середньозважених значень CRI і CSR для коксів (типу I).

В обох моделях розрахункові значення CRI/CSR були скореговані з використанням поправочних коефіцієнтів з рівнянь регресії, які враховують середньозважені характеристики вугільних шихт. Такий підхід дозволив підвищити точність прогнозування якості коксу, про що свідчать високі коефіцієнти кореляції. Так, коефіцієнти кореляції між прогнозованим і експериментально визначеним CRI і CSR для моделі 1 становлять  $R = 0,815$  для CRI і  $R = 0,814$  для CSR, для моделі 2 –  $R = 0,852$  для CRI і  $R = 0,856$  для CSR.

Нині запропоновано численні математичні моделі прогнозу якості коксу, зокрема за показниками CRI і CSR, на основі хіміко-петрографічних показників вугільної шихти, технології її підготовки, коксування і способу газіння коксу [14-18].

### **1.3 Висновки до аналітичної частини**

Основними показниками, що визначають комплекс споживчих властивостей доменного коксу, є його склад, механічні характеристики й реакційна здатність. У свою чергу, ці властивості формуються під впливом характеристик вугільної сировини (складу, спіклivosti, петрографічних характеристик) і режиму коксування, для якого визначальною величиною є тривалість періоду коксування, при правильній експлуатації коксових печей визначальними є практично всі значимі технологічні параметри.

Актуальним є проведення досліджень по розробці й реалізації в промисловості параметрів підготовки й коксування вугільних шихт із різним складом й властивостями, що забезпечують одержання коксу відповідно до сучасних вимог основного споживача - доменного виробництва. При цьому одним з можливих напрямків робіт є диференціація наявних вугільних сировинних ресурсів з метою виробництва на різних коксових батареях (з урахуванням їх конструкцій, строку експлуатації й технічного стану) коксу із заданими властивостями (підвищена механічна міцність, низька реакційна здатність, знижена сірчистість і т.д.) для використання при виплавці чавуну різного призначення в доменних печах різного об'єму. Такий підхід дозволить підвищити техніко-економічну ефективність виробництва як при випуску коксу, так і при його використанні.

## 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Використання питомого електричного опору як комплексного показника структурних характеристик коксу

Як вже зазначалося, якість коксу є ключовим фактором для задовільної роботи печі і може бути оцінена з точки зору фізичних характеристик (показники стійкості коксу до стирання і подрібнення, гранулометричний склад), хімічного складу, індексу реакційної здатності коксу і міцності коксу після реакції. За хімічним складом для металургійних процесів потрібен кокс з максимальним вмістом вуглецю та мінімальним вмістом золи і сірки. За гранулометричним (фракційним) складом кокс повинен бути однорідним за розміром з мінімальним вмістом найменшого (<25 мм) і найбільшого (>80 мм) класів [1,2].

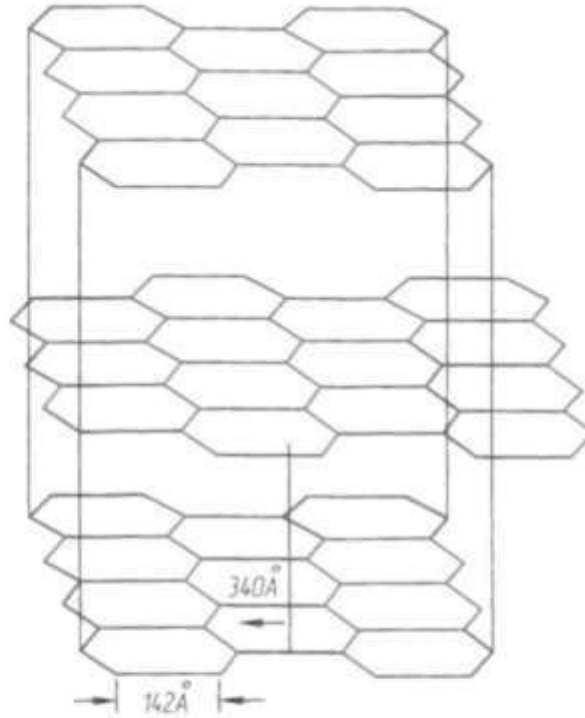
До фізичних властивостей коксу відносяться мікроструктура, дійсна та уявна густина, пористість, електропровідність, електроопір, структурна міцність, абразивна твердість та теплофізичні характеристики (теплоємність, теплота згоряння, температуропровідність) [4]. При цьому основними факторами впливу на фізичні властивості є структура речовини коксу. У свою чергу сировина (вугілля різних стадій метаморфізму) і технологічні фактори (період і температура) коксування визначають вуглецеву структуру доменного коксу та його фізико-механічні властивості. Поглиблення термохімічних перетворень вугільної речовини також призводить до поліпшення структури коксу. Тому для отримання високоміцного коксу з низькою абразивністю необхідний відповідний компонентний склад вугільної шихти з достатнім рівнем спікливості, оптимальний рівень її подрібнення і відповідний тепловий режим її коксування [5,6].

Молекулярна будова органічної маси коксу обумовлюється кінцевою температурою процесу. Кількісно вона характеризується даними рентгеноструктурного аналізу з використанням наступних показників:  $d_{002}$  – середня

відстань між сусідніми площинами у сусідніх блоках;  $C_b$  – частка вуглецю, який міститься в блочних структурах, %;  $L_a$  – середньостатистичний розмір когерентних блоків направленні нормалі до площин вуглецевих шарів, нм;  $L_c$  – середньостатистичний розмір вуглецевих шарів в площині, нм [4].

Зі збільшенням ступеню метаморфізму вугілля ароматичні ядра також збільшуються, а ароматична структура змінюється після термічної обробки [7]. Загалом, зі збільшенням температури піролізу розмір ароматичних ядер збільшується, про що свідчать розмір кристалітів ( $L_{11}$ ), ароматичність ( $f_a$ ) та міжшарова відстань ( $d_{002}/d_\gamma$ ). У дослідженні [8] зазначено, що після нагрівання при 1200 °C значення  $L_{11}$  сирого вугілля збільшилося з  $\sim 5,9-6,5$  до  $\sim 7,8-10$  Å, в той час як  $f_a$  змінився з 58-72% до 75-82%. Одночасно  $d_{002}$  зменшився з  $\sim 3,5-3,59$  Å для сирого вугілля до  $\sim 3,46-3,53$  Å для нагрітого вугілля, в той час як  $d_\gamma$  зменшився з  $\sim 4,72-5,01$  Å до  $\sim 4,33-4,74$  Å, відповідно.

В основі досліджень структури коксу лежать дослідження вуглецю коксу, розподіл атомів вуглецю за гібридними станами і ступінь упорядкування, тобто, співвідношення впорядкованого і невпорядкованого вуглецю. Вугілля являється діелектриком [10] через наявність в бічних ланцюгах його макромолекули великої кількості  $\sigma$ -зв'язків, утворених вуглецем у стані  $sp^3$ -гібридизації. Внаслідок впливу високих температур в процесі коксування та глибокого крекінгу макромолекули практично позбавляються бічних ланцюгів і переважна частина вуглецю в коксі знаходиться у вигляді конденсованих поліароматичних структур, в яких вуглець знаходиться в  $sp$ -гібридизації. Це обумовлює підвищення ступеня впорядкованості структури коксу, наближаючи її до структури графіту (рис.2.1), монокристали якого складаються з великої кількості паралельних шарів, утворених шестикутниками з атомів вуглецю. В просторі між шарами  $\pi$ -електрони утворюють єдине єдину електронну хмару, яка володіє достатньою рухливістю. Цим пояснюються високі значення електропровідності вуглецевих матеріалів.



**Рис.2.1. Схема будови графіту**

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [4].

У високоякісному коксі  $d_{002} = 0,346-0,356$  нм (для графіту  $0,340$  нм), кількість вуглецю, що міститься в блокових структурах ( $C_b$ ) становить 72-88%,  $L_c = 2,1-2,2$  нм,  $L_a = 5-6$  нм. Зі збільшенням кінцевої температури значення  $d_{002}$  і  $L_c$  зменшуються, а  $C_b$  і  $L_a$  збільшуються [4].

Таким чином, ступінь упорядкування структури коксу та інших вуглецевих матеріалів можна контролювати за величиною питомого електроопору.

Можна сказати, що питомий опір є мірою температурної дії при протіканні процесу термічної деструкції вугілля і перетворення коксу. Залежно від кінцевої температури процесу питомий електричний опір зменшується тим більше, чим вище ця температура. Тому показник питомого електроопору може характеризувати ступінь готовності коксу.

Так, в роботах [11-13] показано, що питомий електричний опір деревного вугілля зменшується зі зростанням температури термообробки і

наближається до питомого опору вуглецевих матеріалів при температурах вище 1400 °С. Автори також зазначають, що температура термообробки вуглецевого матеріалу є основним впливовим параметром, тоді як час витримки має лише незначний вплив на питомий електричний опір.

Кокс за значенням електроопору відноситься до напівпровідників.

Електричний опір насипної маси коксу суттєво залежить від його крупності та тиску: зі зменшенням крупності та підвищенням рівномірності коксу опір зростає; збільшення тиску, що призведе до збільшення щільності контакту між частинками коксу, знижує електроопір [14].

Починаючи з 1930-х років різні дослідники вивчали можливість використання електричного опору коксу для контролю якості в коксохімічному виробництві. Що стосується реакційної здатності, було помічено, що електричний опір коксу зменшується з підвищенням температури коксування. 5,6~8~9 Причиною зменшення питомого також була також пояснювали підвищеною графітизацією або утворенням кристалітів. Оскільки реакційна здатність і електричний питомий опір коксу виявилися функцією одних і тих же мікроструктурних параметрів, очікувалося, що електричний опір коксу буде корелювати з його реакційною здатністю.

## **2.2 Вивчення взаємозв'язку показника питомого електричного опору (ПЕО) з упорядкованістю структури коксу**

В роботі для дослідження використовували вугільні шихти різного компонентного складу (таблиця 2.1), основні характеристики та технологічні властивості яких представлені в таблиці 2.2. Умови коксування зазначених вугільних шихт ілюструють дані таблиці 2.3.

Для визначення характеристик вугільної сировини використовували стандартизовані методики:

- State standard of Ukraine 4096–2002 “Brown coal, hard coal, anthracite, combustible shale and coal briquettes. Methods of sample selection and preparation for laboratory tests” [38];

- ISO 1171-97 “Solid mineral fuels. Methods for determination of ash” [39];

- ISO 589-81 “Hard coal—Determination of total moisture”[40];

- ISO 7404-3-84 “Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite—Part 3: Method of determining maceral group composition” [41];

- ISO 7404-5-85 “Methods for the petrographic analysis of coals—Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite” [42];

- State standard of Ukraine 7722:2015 “Hard coal. Method of Determining Plastometric Characteristics” [43]. Марочний склад, якісні характеристики вугільних шихт та показники процесу коксування наведені в таблицях 2.1 – 2.3.

Таблиця 2.1

**Марочний склад дослідних шихт**

№ проби	Марочний склад шихт							
	Г1	Г2	ГЖП	ГЖ	Ж	К	ПС	КС
1			6	44	6	16	13	15
2		10	3	33	15	2	14	23
3				40	20	10	20	10
4			20	43	10	9	9	9
5		37			46	5	5	7
6	30	25	4	10	4	27		
7	34	23	5		10	28		
8	24	29	10		7	30		
9	35	8	5	23		29		
10		30		15		55		
11		31		12		57		
12		31		12		57		
13		31		12		57		
14		31		12		57		
15		42				58		
16		43				57		
17		43				57		

Таблиця 2.2

**Петрографічний, технічний та пластометричний аналізи дослідних шихт**

№ проби	Петрографічний аналіз, %		Технічний аналіз, %					у, мм
	R <sub>o</sub>	V <sub>t</sub>	V <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	W <sup>rt</sup>	A <sup>dt</sup>	S <sup>dt</sup>	
1	1	71,6	27,2	29,7	9,9	8,5	0,51	14
2	1,01	74,9	27,4	30	8,6	8,7	0,96	17
3	1	73,2	27,2	29,8	9,9	8,8	0,8	16
4	0,95	73,7	29	31,9	9,1	9,7	0,56	18
5	0,95	79	30	32,4	10,4	9,5	1,84	20
6	0,86	77	31,1	35,1	10	11,3	1,59	12
7	0,91	86,8	30,8	35	10,4	12	1,54	13
8	0,85	81,7	30,3	34,1	7,8	11,1	1,47	15
9	0,83	84,6	31,5	35,8	8,2	12	1,82	14
10	0,95	81,7	29,4	32,3	8,7	9	1,34	15
11	0,98	80,2	30,3	32,7	8	7,3	1,32	18
12	1	87	30,2	32,8	8,8	7,8	1,17	16
13	1,02	85	29	31,3	8,7	7,3	1,23	15
14	0,97	86,1	30,5	32,9	8,6	7,4	1,24	16
15	1	82,4	30,3	32,9	9,1	8	1,34	14
16	1	82	28,1	30,7	8,2	8,4	1	14
17	1,02	87	30,1	32,6	8,7	7,7	1,19	14

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [30].

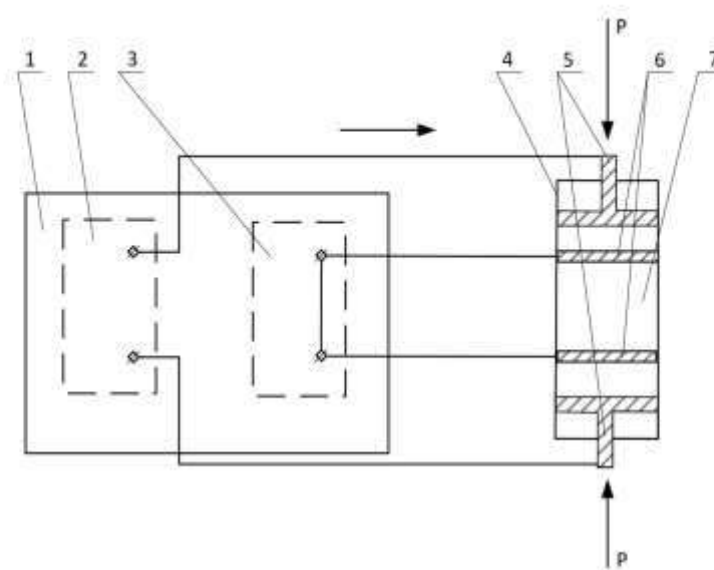
## Умови коксування вугільних шихт

№ проби	Період коксування, год	Температури в контрольних вертикалах, °С	
		машинна сторона	коксова сторона
1	23,46	1230	1265
2	19,69	1220	1260
3	37,58	1150	1170
4	58,74	1100	1160
5	50,09	1100	1160
6	28,11	1160	1180
7	21,05	1200	1240
8	17,56	1200	1230
9	36,8	1150	1170
10	18,9	1240	1265
11	18,7	1240	1265
12	18,41	1250	1270
13	18,30	1250	1280
14	18,9	1240	1275
15	24,26	1200	1245
16	22,55	1230	1265
17	21,26	1230	1265

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [30].



**Рис.2.2. Установка для визначення питомого електричного опору**



1-вимірювальний блок, 2-джерело струму, 3-цифровий вимірювальний прилад, 4-двондова вимірювальна матриця, 5-струмові електроди, 6-вимірювальні електроди, 7-зразок коксу

**Рис. 2.3. Блок-схема пристрою для вимірювання електричного опору порошку коксу**

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [44].

Питомий електричний опір коксу визначався за ДСТУ 8831:2019 Кокс. Метод визначення питомого електричного опору порошку коксу кам'яновугільного [44]. Сутність методу полягає у вимірюванні спаду напруги під час проходження постійного струму через спресований стовбчик коксу з крупністю частинок менше 0,3-0,4 мм, який розташований в матриці між двома пуансонами під тиском 100 кгс/м<sup>2</sup>, та розрахунку питомого електричного опору ( $\rho$ ) за формулою:

$$\rho = R \frac{s}{h}, \quad (2.1)$$

де R – електричний опір зразку, Ом; s – поперечний переріз зразка, м<sup>2</sup> або см<sup>2</sup>; h – висота зразка, м або см.

Термомеханічні властивості визначались за стандартною методикою ISO 18894:2006 “Coke-Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)”.

Зазначені показники якості коксів представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

#### Характеристики коксів

№ проби	Термохімічні характеристики коксу, %		Питомий електричний опір, Ом·см
	CRI	CSR	
1	34,3	49,5	0,045
2	41,7	34,4	0,066
3	39,6	41,6	0,059
4	41,9	37	0,066
5	46,1	30,9	0,068
6	51,5	23,8	0,068
7	54,9	20,2	0,087
8	53,9	22,2	0,093
9	56	21	0,079

Продовження таблиці 2.4

10	43,8	41,6	0,062
11	43,4	40,5	0,069
12	41,3	42,6	0,064
13	42,5	42,7	0,074
14	43	40,7	0,073
15	43,8	39,2	0,065
16	43,4	40,8	0,065
17	43,6	40,4	0,068

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [30].

Аналізуючи показники якості вугільних шихт та коксів, були встановлені наступні зв'язки, які характеризуються коефіцієнтами кореляції, представленими в таблиці 2.5.

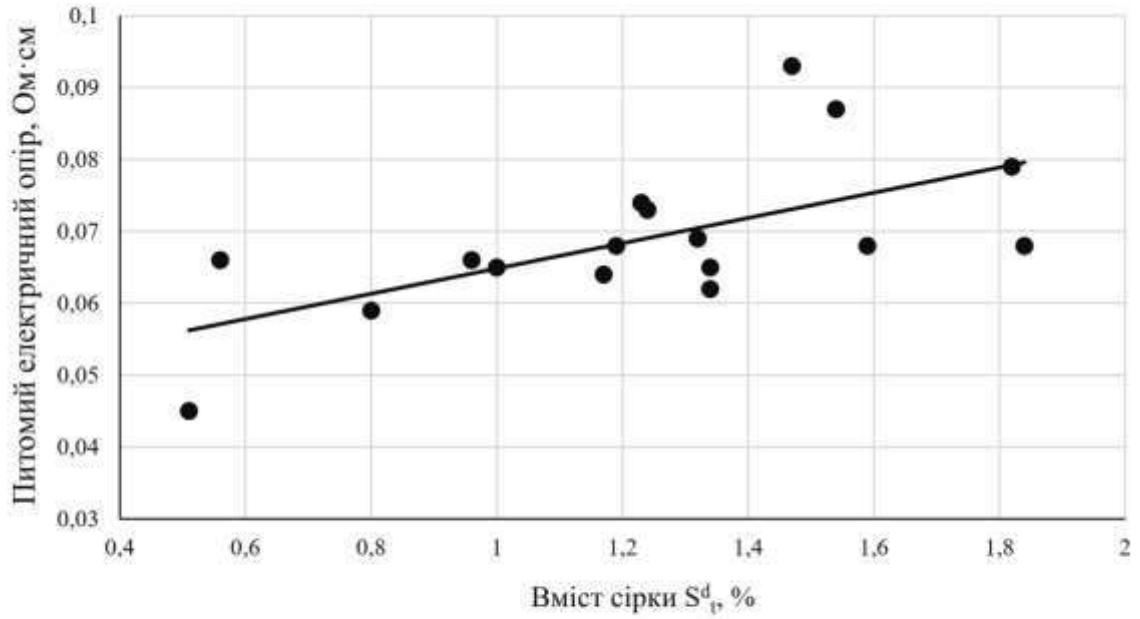
Таблиця 2.5

### Коефіцієнти кореляції

	$R_o$	$V_t$	$V^{daf}$	$W_t^r$	$A_t^d$	$S_t^d$	$y$	CRI	CSR	$\rho$
$R_o$	1									
$V_t$	-0.07426	1								
$V^d$	-0.61753	0.659324								
$V^{daf}$	-0.79845	0.546991	1							
$W_{it}$	0.012508	-0.33014	-0.04795	1						
$A_t^d$	-0.87171	0.037004	0.688635	0.169807	1					
$S_t^d$	-0.59603	0.556968	0.77939	-0.0028	0.490139	1				
$y$	0.265145	-0.26499	-0.3461	-0.04235	-0.27341	-0.0909	1			
CRI	-0.85725	0.432163	0.883709	-0.06813	0.861412	0.789118	-0.32664	1		
CSR	0.867639	-0.18684	-0.77504	-0.07283	-0.94936	-0.67822	0.215319	-0.94637	1	
$\rho$	-0.60693	0.561369	0.696006	-0.28618	0.679095	0.623354	-0.11561	0.845227	-0.7864	1

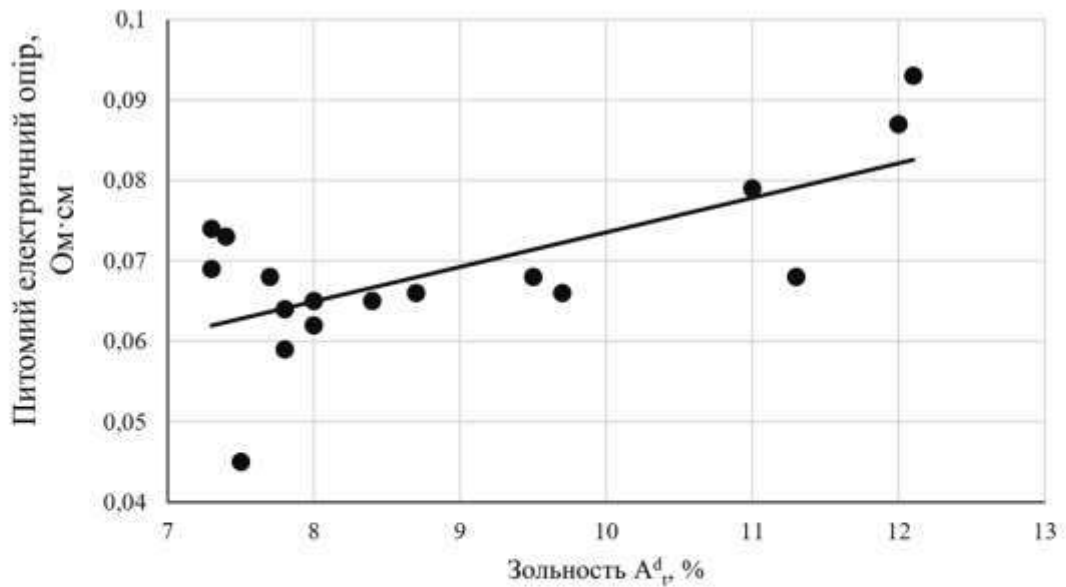
Примітка. Джерело: Розроблено автором

На підставі аналізу властивостей вугільної сировини і характеристики коксів отримали наступні графічні залежності (рис. 2.3-2.8).



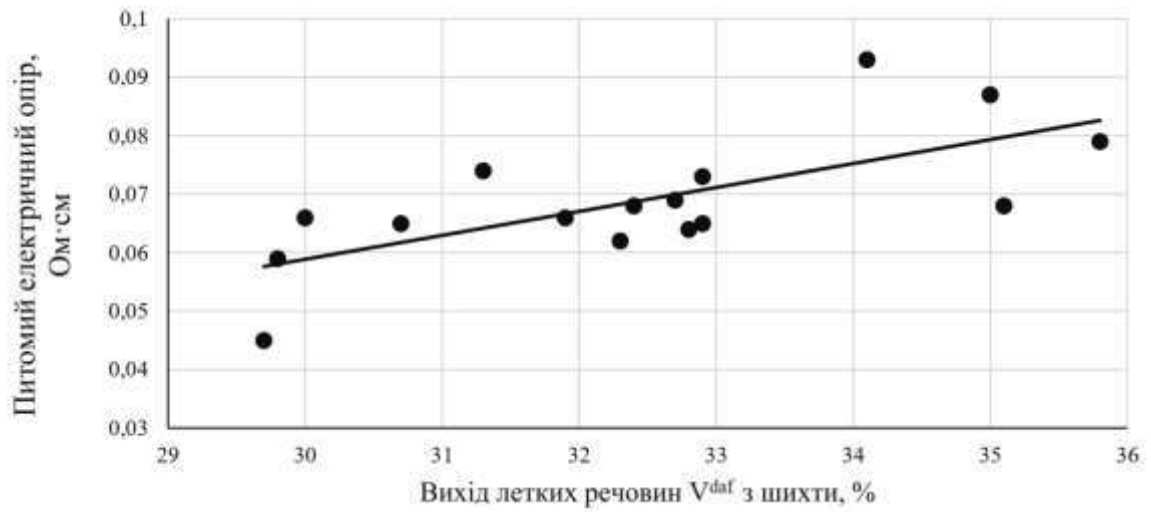
**Рис.2.3. Залежність питомого електричного опору коксу від вмісту сірки в шихті**

Примітка. Джерело: Розроблено автором



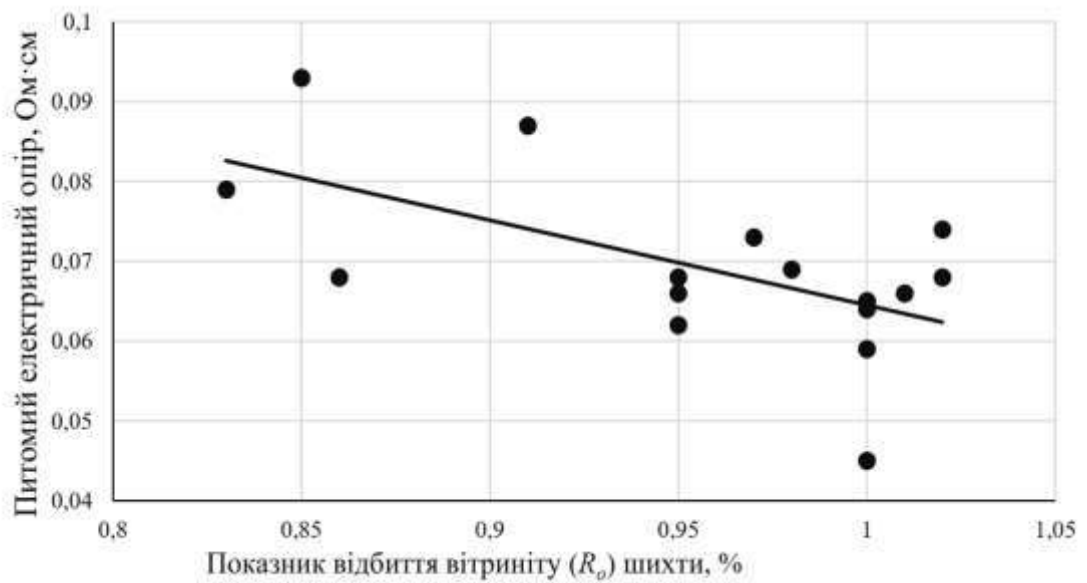
**Рис.2.4. Залежність питомого електричного опору коксу від зольності шихти**

Примітка. Джерело: Розроблено автором



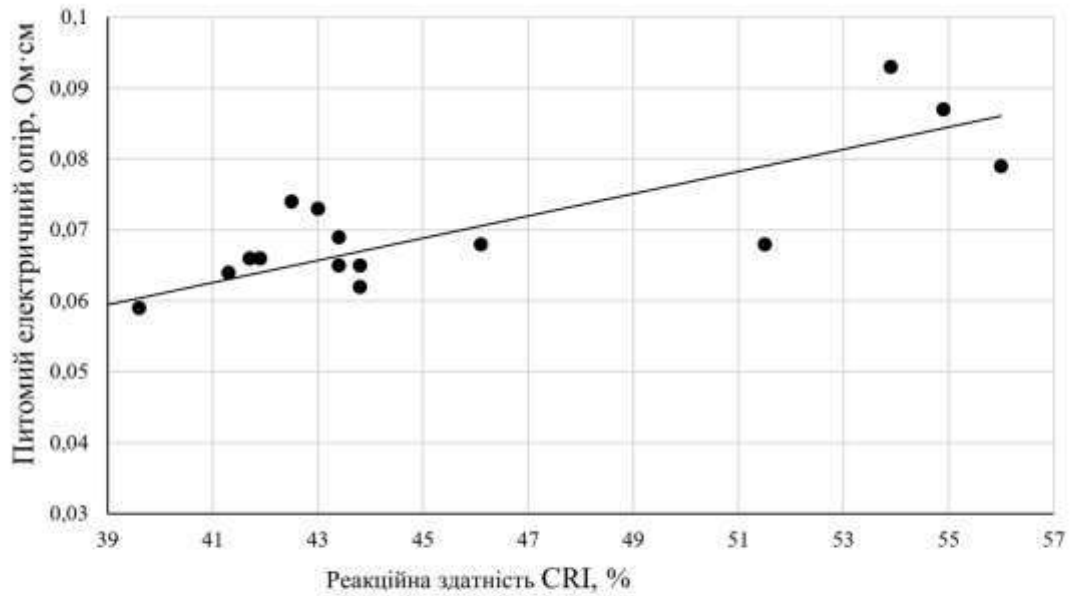
**Рис.2.5. Залежність питомого електричного опору коксу від виходу летких речовин шихти**

Примітка. Джерело: Розроблено автором



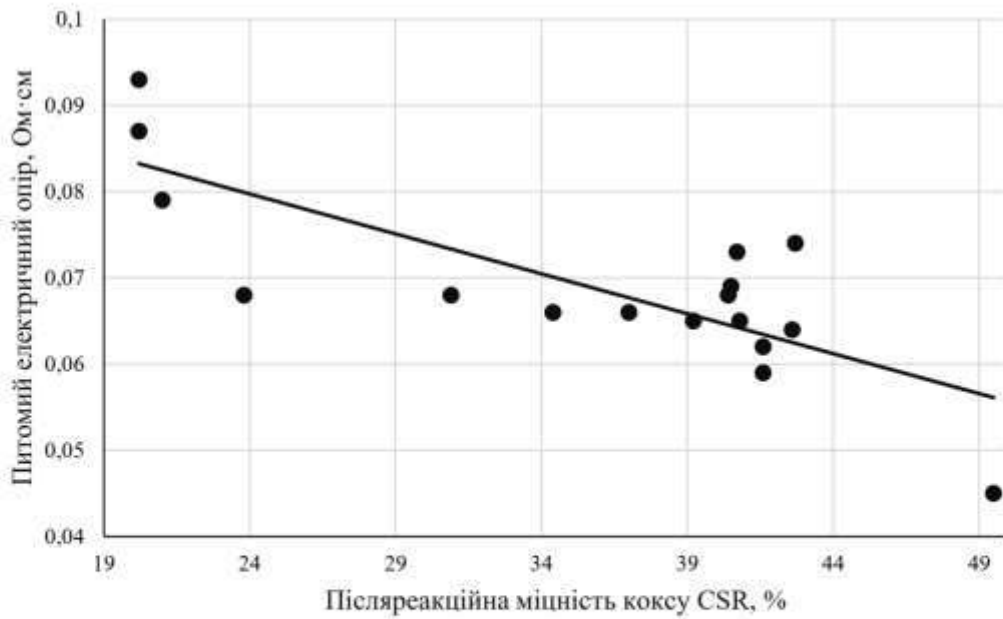
**Рис.2.6. Залежність питомого електричного опору коксу від показника відбиття вітриніту**

Примітка. Джерело: Розроблено автором



**Рис.2.7. Залежність питомого електричного опору  
від реакційної здатності коксу**

Примітка. Джерело: Розроблено автором



**Рис.2.8. Залежність питомого електричного опору  
від післяреакційної міцності**

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Було встановлено, що зростання вмісту загальної сірки  $S_t^d$ , виходу летких речовин  $V^{daf}$  та зольності ( $A_t^d$ ) у вугільній сировині обумовлює зростання питомого електричного опору коксів з 0,0176 до 0,0043 Ом·см.

При зростанні ступеню метаморфізму вугілля, яких характеризували величиною показника відбиття вітриніту фіксували зменшення питомого електричного опору коксу на 0,0013 на кожен відсоток  $R_0$ .

Збільшення готовності та ступеню впорядкованості структури коксу обумовлює зменшення його електричного питомого опору. Таким чином, збільшення міцності коксу після реакції (CSR) на 1% призведе до зниження питомого опору на 0,0019 Ом·см. А зниження показника реакційної здатності коксу на 1% призведе до зростання опору на 0,0016 Ом·см.

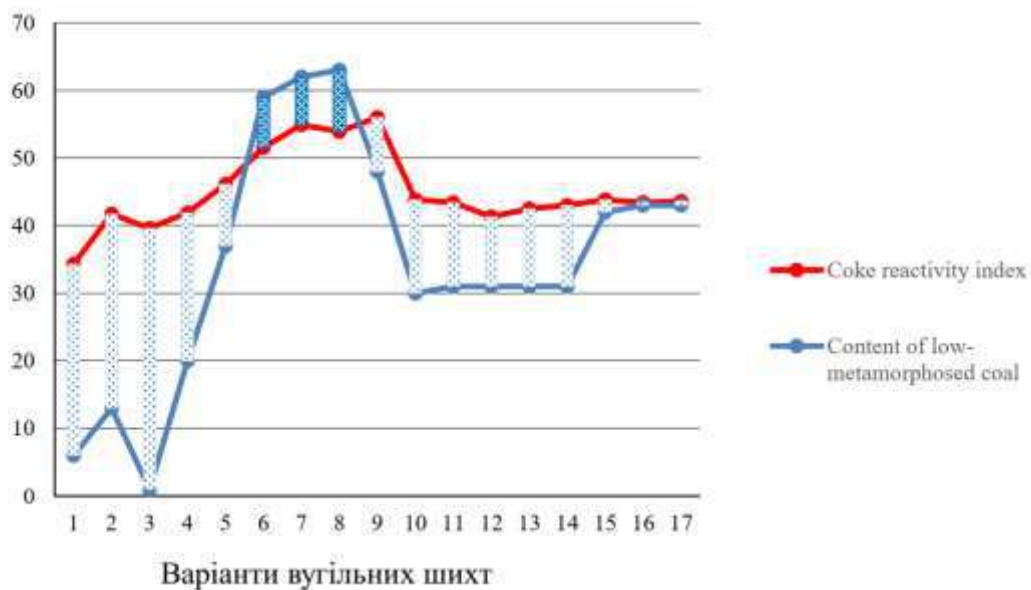
Аналізуючи якісні характеристики дослідних шихт, можна відзначити, що компонентний склад, а саме кількість вугілля газової групи, істотно відрізнявся. Так, для проб 6–9 спостерігаються максимальні вмісти вугілля Г1, Г2 та ГЖП, які коливаються від 42 до 63 %. Одночасно зі збільшенням вмісту газового вугілля збільшувався показник реакційної здатності коксу, отриманого з цих партій, що можна спостерігати на графіках, наведених на рис. 9. Для зразків із найбільшим вмістом слабометаморфізованого вугілля (6–9) спостерігалися найвищі значення питомого електроопору (дані рисунка 2.9).

Найкращі показники термохімічних властивостей коксу за міцністю після реакції з  $CO_2$  (CSR) та показником реакційної здатності коксу (CRI) отримані при коксуванні трьох зразків дослідної шихти. При цьому спостерігався оптимальний вміст (66%) марок вугілля (ГЖ + Ж + К), що характеризуються оптимальними спікливими та коксівними властивостями. При коксуванні варіантів 6–9 дослідних шихт отримано найгірші показники якості коксу (CSR 20,2–23,8%, CRI 53,9–56%). Це було пов'язано з погіршенням марочного складу вугільної шихти за рахунок зменшення частки бітумінозного вугілля та збільшення низькометаморфізованого (42–63%). Внаслідок цього відбулося зниження показника відбиття вітриніту та зміщення інтервалу пластичності в

бік нижчих температур, що спричинило послаблення структури коксу та підвищення його питомого електроопору.

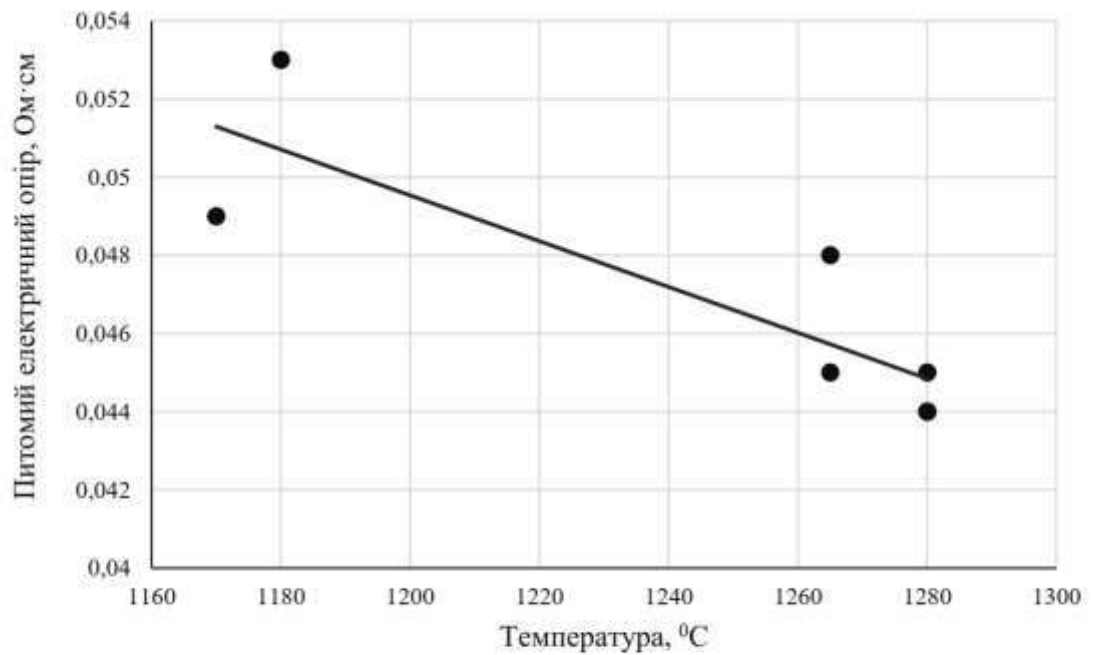
Таким чином, встановлено, що підвищення вмісту вугілля газової групи є переважаючим фактором впливу на властивості коксу; отже, це підвищує реакційну здатність коксу та збільшує питомий опір отриманого коксу. Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що на структуру доменного коксу суттєвий вплив має марковий склад вугільної шихти та клінкерування її компонентів, що в подальшому можна оцінити за допомогою питомого опору.

Для зразків 10–17 шихти вугілля, в яких вміст вугілля газової групи не перевищував 43 %, спостерігали залежність питомого опору від температури кінцевого процесу. Було виявлено, що питомий опір коксу зменшується з підвищенням температури. На рисунку 2.10 показано залежність питомого опору коксу від кінцевої температури процесу коксування.



**Рис.2.9. Зміни вмісту слабометаморфізованого вугілля в шихті та показника реакційної здатності коксу**

Примітка. Джерело: Розроблено автором



**Рис.2.10. Залежність питомого електричного опору коксу від температури**

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Отримані залежності характеризуються математичними рівняннями, які представлені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

**Математичні рівняння**

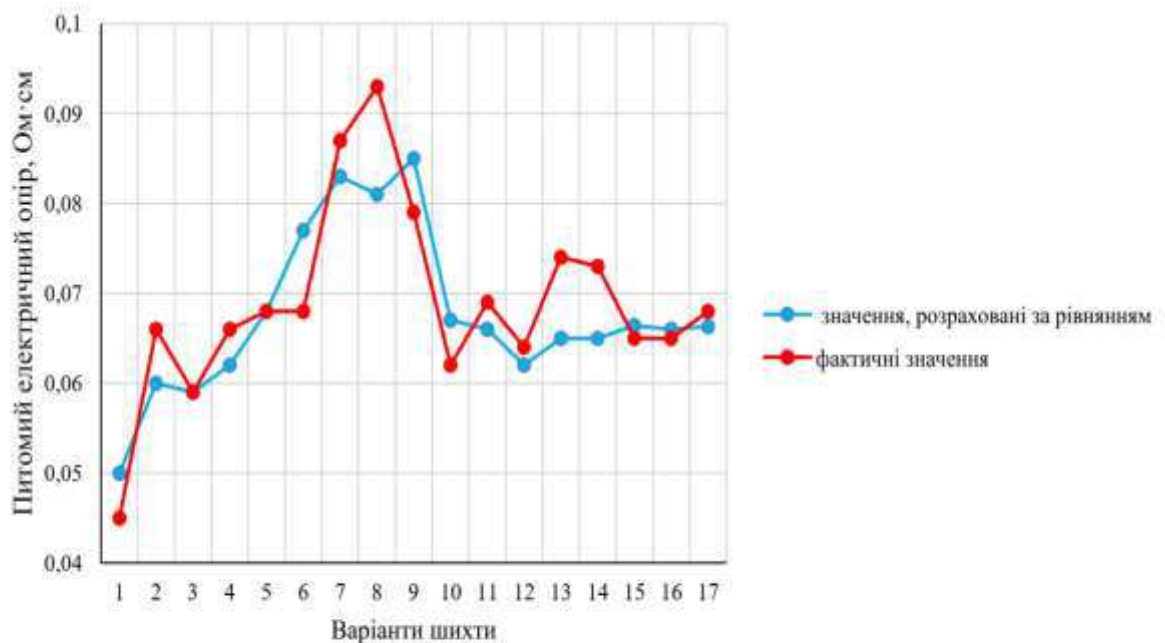
№	Математичні рівняння	Рисунок	Коефіцієнт кореляції, $r$
(2.2)	$\rho = 0,0176 \cdot S_t^d + 0,0473$	4	0,62
(2.3)	$\rho = 0,0043 \cdot A_t^d + 0,0306$	5	0,68
(2.4)	$\rho = 0,0041 \cdot V^{daf} - 0,064$	6	0,696
(2.5)	$\rho = 0,1709 - 0,1064 \cdot R_0$	7	0,61
(2.6)	$\rho = 0,0016 \cdot CRI - 0,0016$	8	0,84
(2.7)	$\rho = -0,0019 \cdot CSR + 0,102$	9	0,79

Наведені вище математичні вирази та їх статистичні оцінки (кореляція 0,6–0,84) ілюструють тісну залежність властивостей сировини та коксу від

питомого опору. Інверсія знаків у рівняннях свідчить про те, що показники CSR та CRI обернено пропорційні. Використовуючи методи математичної статистики для обробки даних, отримано рівняння регресії:

$$\rho = 0,076 \cdot R_0 + 0,002 \cdot V^{daf} + 0,004 \cdot A_t^d + 0,007 \cdot S_t^d - 0,1234 \quad (2.8)$$

Дані порівняння прогнозних (розрахованих за рівнянням 2.8) та фактичних значень питомого електричного опору коксу свідчать про можливість застосування вказаного рівняння для прогнозування якості коксу та оптимізації компонентного складу вугільних виробничих шихт.



**Рис.2.11. Порівняння прогнозних та фактичних значень питомого електричного опору коксу**

Примітка. Джерело: Розроблено автором

На підставі обробки експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики отримано регресійне рівняння:

$$\rho = -0,0095 \cdot CSR - 0,061 \cdot CRI, r = 0,85 \quad (2.9)$$

Встановлений зв'язок між питомим опором і реактивністю та постреакційною силою є логічним. Питомий опір і реактивність різні за своєю природою. Наприклад, аналіз багатьох досліджень [17–19] показує, що на CRI впливають властивості використовуваного вугілля (зольність, вміст сірки, мінеральний склад, вихід летких речовин, петрографічний склад), технологія приготування шихти, тепловий режим його коксування, термін коксування. При цьому обидва ці показники змінюються синхронно, оскільки на них впливають деякі загальні фактори, такі як рівень температури і готовність коксу, що свідчить про впорядкованість його структури.

У роботі [5] проведено оцінку електричних властивостей вугільної сировини різного ступеня карбонізації (деревного та кам'яного вугілля) та продуктів її карбонізації. Так, термічна обробка вуглецевмісної сировини до температури 1400 °C зменшує вихід кисню, упорядковує структуру та знижує електричний опір, тобто трансформація діелектричних властивостей у матеріал із напівпровідниковими характеристиками відбувається зі зміною структури вуглецю [5, 20–24]. Більше того, чим більші зміни властивостей, тим більший ступінь трансформації та впорядкованості нової структури. Автори також відзначають, що температура термообробки вуглецевого матеріалу є основним параметром впливу, тоді як час витримки має лише незначний вплив на питомий опір.

У роботах [1,2,25] також показано, що з підвищенням температури термічної обробки внаслідок термічної деструкції та виділення низькомолекулярних газів, таких як CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, відбувається значне зниження питомого електроопору вуглецевого матеріалу.

Дослідження [26,27] ілюструють результати дослідження впливу добавок біомаси на якість металургійного коксу. Дослідження також виявило, що питомий опір матеріалів, що містять вуглець, зменшувався зі збільшенням температури карбонізації, що пояснюється руйнуванням бічних ланцюгів, відділенням кисню та інших гетероатомів, що містяться у функціональних групах, і реструктуризацією коксової матриці. Опір вуглецевих матеріалів в діапазоні

температур від 950 °С до 1100 °С зменшується в середньому з 13,9 Ом·см до 12 Ом·см.

Кокс класифікується як напівпровідник з точки зору його електричного опору.

Електричний опір насипної маси коксу істотно залежить від його розмірів і тиску: зі зменшенням розмірів і збільшенням однорідності коксу опір зростає; збільшення тиску, що призведе до збільшення щільності контакту між частинками коксу, зменшує електричний опір [26].

Автори роботи [28] досліджували вплив високої температури на макроскопічні властивості та мікроструктуру двох типів коксу (кокс з трамбованої шихти (Т-кокс) і кокс з насипної шихти (ТК-кокс)). Дослідження проводили в інтервалі температур 1100–1400 °С, тобто в умовах, наближених до доменної плавки. У цьому діапазоні температур хімічні зв'язки розриваються. Крім того, зміни в розташуванні атомів у коксі супроводжувалися зміною його електричного опору. За допомогою спектроскопічного аналізу фіксували зміни оптичної структури при підвищенні температури від 1100 °С до 1400 °С. Таким чином, встановлено, що відстань між шарами та анізотропна текстура коксу зменшуються, а також спостерігається збільшення ступеня графітизації, а також збільшення частки великих пор, що в сукупності зумовлює зниження міцності коксу.

Заслуговує на увагу також дослідження [29] щодо зміни електричних властивостей низькосортного вугілля в результаті піролізу під дією мікрохвильового випромінювання. Встановлено, що зі збільшенням часу дії мікрохвильового випромінювання відбувається розщеплення та руйнування функціональних груп. Також зафіксовано збільшення кількості  $sp^2$ -гібридизованих атомів вуглецю та вільних електронів між площинами кристалічного графіту та підвищення ступеня впорядкованості структури; для вугілля GC — від 457,42 до 4,57 Ом·см, для вугілля SL — від 402,46 до 3,59 Ом·см.

Таким чином, як і при температурному впливі, внаслідок структурних змін органічної матриці вугілля трансформуються фізичні властивості, а в даному випадку – і електропровідність (опір).

Тому вуглецеві матеріали (вугілля, активоване вугілля, кокс), електричні властивості яких змінюються залежно від температури, використовуються як сировина для виробництва спеціалізованих конденсаторних технологій [30].

### **2.3 Висновки до основної частини**

За результатами проведених досліджень встановлено взаємозв'язок між ПЕО та термохімічними властивостями коксу (реакційною здатністю та післяреакційною міцністю).

В роботі використовувалися стандартизовані методи вивчення технологічних властивостей вугілля та вугільних шихт (визначення технічного аналізу, петрографічного аналізу, пластометричного аналізу). Вивчення якісних характеристик коксу проводили з використанням термохімічних методів дослідження стандартизованих показників: реакційної здатності (CRI), післяреакційної міцності (CSR). Для аналізу впливу параметрів процесу коксування на характеристики коксу використані методи математичної статистики.

Проведені дослідження дозволили встановити залежність між питомим електричним опором та реакційною здатністю, що є обґрунтованим, так як обидва ці показники характеризують структуру коксу та ступінь її впорядкованості.

## **ВИСНОВКИ**

Якість коксу та напрямки його використання визначаються фізичними, фізико-хімічними, фізико-механічними властивостями.

Зазначено, що основні функції коксу в доменному процесі такі: він є джерелом тепла і відновником. Крім того, кокс, який рухається разом із рудою, повинен забезпечувати можливість газам ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) підніматися вздовж завантаження доменної печі знизу вгору.

В роботі проаналізовано аспекти формування металургійних властивостей коксу, від яких залежить витрата та ефективність його використання в доменній плавці. Сформульовані вимоги до якісних характеристик коксу.

Доведено, що питомий електричний опір є сукупним показником властивостей коксу, значення якого визначаються зольністю, вмістом сірки, виходом летких, петрографічним складом та умовами карбонізації вугільної сировини.

Можна сказати, що питомий опір є мірою температурного впливу під час процесу термічної деструкції вугілля та конверсії коксу. Залежно від кінцевої температури процесу питомий опір зменшується, чим вище температура. Отже, питомий опір може характеризувати ступінь готовності коксу.

Проведені дослідження дозволили встановити взаємозв'язок між питомим опором і реакційною здатністю, що є обґрунтованим, оскільки обидва ці показники характеризують структуру коксу і ступінь її впорядкованості.

Це особливо актуально при використанні коксу в електротермічних процесах (виробництво феросплавів), оскільки питомий опір коксу визначає перебіг фізико-хімічних і хіміко-технологічних процесів відновлення, продуктивність, а також електричний і тепловий ККД печі. Закономірна залежність питомого опору вуглецевих матеріалів від температури дозволяє розглядати кокс як перспективну сировину для виробництва термочутливих конденсаторів, анодів і футерувальних елементів електролізерів в електрохімічному виробництві алюмінію.

Розроблено та рекомендовано регресійні рівняння, які можна використувати для оптимізації компонентного складу та якості виробничих шихт, враховуючи їх значний вплив на питомий опір коксу.

Слід зазначити, що використання методу вимірювання електричного опору коксу для оптимізації компонентного складу сумішей та контролю якості коксу в конкретному коксохімічному виробництві є практичним та економічно доцільним. Оскільки визначення електричного опору є простішим, не потребує реагентів та займає значно менше часу, ніж вимірювання реакційної здатності, його можна вважати оперативним методом визначення структурних характеристик та готовності коксу.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Shmeltser, K., Pyshyev, S. Miroshnichenko, Vytrykush, N., Shved, M. Improvement and Reconstruction of Coking Processes. *Petroleum and Coal*. 2025. 67(1). 68-78.
2. Lyalyuk, V.P., Kassim, D.A., Shmeltser, E.O., Lyakhova, I.A. Improving the technology of preparing coal for the production of blast-furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 1. Optimizing the composition of coal batch by means of petrographic characteristics. *Petroleum and Coal*. 61(1) (2019) 90-93.
3. Lyalyuk V.P., Kassim D.A., Shmeltser E.O., Lyakhova I.A. Improving the technology of preparing coal for the production of blast - Furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 2. Optimizing the degree of crushing by means of petrographic characteristics of the batch. *Petroleum and Coal*. 61(1) (2019) 94-99.
4. Shmeltser E.O., Kormer M.V., Chuprinov E.V., Miroshnichenko D.V. Influence of the degree of mixing on the quality of preparation of coal batches. *Petroleum and Coal*. 65(2) (2023) 525–532.
5. Miroshnichenko D., Saienko N., Popov Y., Demidov D., Nikolaichuk Yu. Preparation of oxidized coal. *Petroleum and Coal*. 60(1) (2018) 113-121.
6. Miroshnichenko D., Kaftan Y., Desna N., Pyshyev S. Impact of oxidation on the expansion pressure of coal. *Petroleum and Coal*. 59(1) (2017) 62-66.
7. Borisova L.N., Shapovalova Yu.G. Directory of coke chemist. In 6 volumes. Volume 1. Angles for coking. Coal enrichment. Preparation of coal for coking, Publishing House Inzhek, Kharkiv, Ukraine, 2010.
8. Shmeltser E.O., Lyalyuk V.P., Sokolova V.P., Miroshnichenko D.V. Influence of the Crushing of Bituminous Batch on coke Quality. *Coke and Chemistry*. 60 (2017) 470-475.
9. Kovalyov ET, Vasiliev Yu.S., Kuznichenko V.M., Krivonis V.V., Danilov A.B., Solovyov M.A. Theory and practice of production of high-quality blast

- furnace coke from rammed charges of reduced spiciness. *Journal of Coal Chemistry*. 3–4 (2009) 24–30.
10. Kuyumcu H.Z., Sander S. Stamped and pressed coal cakes for carbonisation in by-product and heat-recovery coke ovens. *Fuel*. 2014. 121:48–56.
  11. Sand A., Rosenkranz J., Kuyumen H. Modelling and simulation of stamp-charged coke making by 2-D discrete element method. *Advanced Powder Technology*. 24 (2013) 1039–1047.
  12. Rejda M., Galko G., Sajdak M., Wierczorek A. Stamp-charged Cokemaking technology – An Empirical model for prediction of coal charge density for stamp charging coke oven batteries. *Energies*. 15 (2022) 9440.
  13. Vasiliev Yu.S., Gordienko A.I., Lashenko I.M. The first industrial coke battery with the installation of thermal preparation of the charge in Ukraine as a way to increase the resource and energy efficiency of the metallurgical industry. *Journal of Coal Chemistry*. 3–4 (2010) 48–52.
  14. Gordienko A.I., Redin V.A., Dolgarev G.V., Chalenko V.I., Wehera I.M. Experience in the development and operation of the experimental and industrial plant for thermal preparation of the charge at OJSC "Yasiniv Coke Chemical Plant". *Journal of Coal Chemistry*. 5–6 (2008) 22–25.
  15. Nomura S. Recent developments in cokemaking technologies in Japan. *Fuel Processing Technology*. 159 (2017) 1–8.
  16. Zhang L., Wang G., Xue Q., Zuo H., She X., Wang J. Effect of preheating on coking coal and metallurgical coke properties: A review. *Fuel Processing Technology*. (2021) 106942.
  17. Vasiliev Yu.S., Gordienko A.I., Dolgarev G.V., Yushkov E.A., Dudyak V.M. On the influence of the quality of coke obtained from thermally prepared charges containing low-sintering coal on the efficiency of the blast furnace process using PVP. *Journal of Coal Chemistry*. 5–6 (2008) 38–40.
  18. Vega M.F., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Influence of the Heating Rate on the Quality of Metallurgical Coke. *ACS Omega*. 6 (2021) 34615–34623.
  19. Mangena S.J., du Cann V.M. Binderless briquetting of some selected South

- African prime coking, blend coking and weathered bituminous coals and the effect of coal properties on binderless briquetting, *International Journal of Coal Geology*. 71 (2007) 303–312.
20. Mangena S.J., de Korte G.J., McCrindle R.I., Morgan D.L. The amenability of some Witbank bituminous ultra fine coals to binderless briquetting, *Fuel Processing Technology*. 85 (2004) 1647–1662.
21. Sharma A.K., Das B.P., Tripathi P.S.M. Influence of properties of bituminous binders on the strength of formed coke, *Fuel Processing Technology*. 75 (2002) 201–214.
22. Thoms L.J., Snape C.E., Taylor D. Physical characteristics of cold cured anthracite/coke breeze briquettes prepared from a coal tar acid resin, *Fuel*. 78 (1999) 1691–1695.
23. Plancher H., Agarwal P.K., Severns R. Improving form coke briquette strength, *Fuel Processing Technology*. 79 (2002) 83–92.
24. Benk A., Talu M., Coban A. Phenolic resin binder for the production of metallurgical quality briquettes from coke breeze: Part I, *Fuel Processing Technology*. 89 (2008) 28–37.
25. Benk A. Utilisation of the binders prepared from coal tar pitch and phenolic resins for the production metallurgical quality briquettes from coke breeze and the study of their high temperature carbonization behaviour, *Fuel Processing Technology*. 91 (2010) 1152–1161.
26. Benk A. Talu M. Coban A. Phenolic resin binder for the production of metallurgical quality briquettes from coke breeze: II the effect of the type of the basic catalyst used in the resol production on the tensile strength of the formed coke briquettes, *Fuel Processing Technology*. 89 (2008) 38–46.
27. Benk A. Coban A. Molasses and air blown coal tar pitch binders for the production of metallurgical quality formed coke from anthracite fines or coke breeze, *Fuel Processing Technology*. 92 (2011) 1078–1086.
28. Zhang X., Zhang J., Guo R., Xiao Q., Feng Ya, Cheng H. Highly reactive coke made from Low-rank Coal: Relationship between thermal properties and

- multilevel structure, *Fuel*. 337 (2023) 127186.
29. Wang Q., Guo R., Zhao X.F., Sun J.F., Zhang S., Liu W.Z. A new testing and evaluating method of cokes with greatly varied CRI and CSR, *Fuel*. 182 (2016) 879–85.
30. Miroshnichenko, D., Shmeltser, K.O, Kormer, M., Soloviov, Y.; Pyshyev, S., Korchak, B., Shved, M., Prysiashnyi, Y. Electrical Resistance as an Aggregate Characteristic of Coke Properties for Electrochemical and Coke Production. *Electrochem*. 2024. 5(2). P.258–273.
31. Miroshnichenko, D.; Shmeltser, K.; Kormer, M. Factors Affecting the Formation the Carbon Structure of Coke and the Method of Stabilizing Its Physical and Mechanical Properties. *Journal of Carbon Research*. 2023. vol.9 (66).
32. Lyalyuk, V.P., Kassim, D.A., Shmeltser, E.O., Lyakhova, I.A. Improving the technology of preparing coal for the production of blast - Furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 2. Optimizing the degree of crushing by means of petrographic characteristics of the batch components. (2019). *Petroleum and coal*, 61(1), 94-99.
33. Miroshnichenko, D., Shmeltser, K., Kormer, M. Factors Affecting the Formation the Carbon Structure of Coke and the Method of Stabilizing Its Physical and Mechanical Properties. (2023). *C-Journal of Carbon*, 9(3), 66. <https://doi.org/10.3390/c9030066>
34. Borisov, L.N., Shapovalov, Y.G. (eds.). (2010). Handbook of coke chemist. In 6 volumes. Vol. 1. Coals for coking. Coal enrichment. Preparation of coals for coking. Kharkov: Publishing House “Inzhek”.
35. Shmeltser, E.O., Lyalyuk, V.P., Sokolova, V.P., Miroshnichenko, D.V. The using of coal blends with an increased content of coals of the middle stage of meta-morphism for the production of the blast-furnace coke. Message 1. Preparation of coal blends. (2018). *Petroleum and coal*, 60(4), 605–611.
36. Shmeltser, E.O., Lyalyuk, V.P., Sokolova, V.P., Miroshnichenko, D.V. The using of coal blends with an increased content of coals of the middle stage of

- metamorphism for the production of the blast-furnace coke. Message 2. Assessment of coke quality. (2019). *Petroleum and coal*, 61(1), 52-57.
37. Zhang, L.; Wang, G.; Xue, Q.; Zuo, H.; She, X.; Wang, J. Effect of preheating on coking coal and metallurgical coke properties. (2021). *Fuel Process. Technol.*, 22, 106942.
38. State standard of Ukraine 4096-2002; Brown coal, hard coal, anthracite, combustible shale and coal briquettes. Methods of sample selection and preparation for laboratory tests. Technical Committee of Ukraine on standardization TK-92: Kyiv, Ukraine, 2002.
39. ISO 1171-97; Solid mineral fuels. Methods for determination of ash. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1997.
40. ISO 589-81; Hard coal—Determination of total moisture. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1981.
41. ISO 7404-3-84; Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite – Part 3: Method of determining maceral group composition. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1984.
42. ISO 7404-5-85; Methods for the petrographic analysis of coal - Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1985.
43. State standard of Ukraine 7722:2015; Hard coal. Method of Determining Plastometric Characteristics. State enterprise “Ukrainian scientific research and training center for problems of standardization, certification and quality”: Kyiv, Ukraine, 2015.
44. DSTU 8831:2019. Coke. Method for determining the resistivity of coal coke powder. Kyiv: UkrNDNC SE, 2019.
45. ISO 18894:2006 “Coke-Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)”. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.

## ДОДАТКИ

## Звіт подібності

## метадані

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

Заголовок

Олійник Людмила Михайлівна

Автор

Науковий керівник / Експерт

Олійник Людмила МихайлівнаШмельцер К.О.

Підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

## Обсяг знайдених подібностей

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

21.33%  
21.33%

КП 1

1.08%  
1.08%

КЦ

25

Давана фрази для коефіцієнта подібності 2

8217

Кількість слів

62039

Кількість символів

## Тривога

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

Заміна букв		12
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		193

## Подібності за списком джерел

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

## 10 найдовших фраз

Колір тексту

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	ВІЛЬНІСТЬ ЦЕНТРИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	<a href="https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal_paper/2024/jun/35013/240517verstakomove150813.pdf">https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal_paper/2024/jun/35013/240517verstakomove150813.pdf</a>	91 1.11 %
2	Тесленко Сергій 1/10/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	83 1.01 %
3	<a href="https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal_paper/2024/jun/35013/240517verstakomove150813.pdf">https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal_paper/2024/jun/35013/240517verstakomove150813.pdf</a>	59 0.72 %

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

**ДОВІДКА**  
про підготовку здобувача

Олійник Людмили Михайлівни  
(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 Використання питомого електричного  
опору для оперативної оцінки структури  
коксу

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

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консульта	Примітка
1	Аналітична частина	Шмельцер К.О.	зарах	1.06.25	Шмельцер	
2	Основна частина	Шмельцер К.О.	зарах	2.06.25	Шмельцер	

Зав. кафедри

Шмельцер  
( підпис )

К.О. Шмельцер

(ініціали, прізвище)

« 2 » червня 2025 р.

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

**ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

бакалавра

Здобувачки Олійник Людмили Михайлівни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ЗХТ-22ск

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра

Використання питомого електричного опору для оперативної оцінки  
структури коксу

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	55;
таблиць	9;
схем і рисунків	12;
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	-.

**Якісні відмінності кваліфікаційної роботи** бакалавра

Кваліфікаційна робота присвячена вивченню впливу компонентного складу вугільної шихти та кінцевої температури процесу коксування на питомий опір коксу. Проведені дослідження дозволили встановити взаємозв'язок між питомим опором і реакційною здатністю, що є обґрунтованим, оскільки обидва ці показники характеризують структуру коксу і ступінь її впорядкованості. В роботі проаналізовано аспекти формування металургійних властивостей коксу, від яких залежить витрата та ефективність його використання в доменній плавці. Доведено, що питомий електричний опір є сукупним показником властивостей коксу, значення якого визначаються зольністю, вмістом сірки, виходом летких, петрографічним складом та умовами карбонізації вугільної сировини. Розроблено та рекомендовано регресійні рівняння, які можна використовувати для оптимізації компонентного складу та якості виробничих шихт, враховуючи їх значний вплив на питомий опір коксу.

**Недоліки кваліфікаційної роботи** бакалавра  
(бакалавра, магістра)

Суттєвих недоліків не виявлено.

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

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

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


**Можливість використання кваліфікаційної роботи бакалавра**

Рекомендації щодо використання методу вимірювання електричного опору коксу для оптимізації компонентного складу сумішей та контролю якості коксу в конкретному коксохімічному виробництві є практичним та економічно доцільними.

**Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавра** відмінно/90/А

Керівник Шмельцер Катерина Олегівна  
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Зав.кафедри, к.т.н., доцент  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

  
(підпис)

« 13 » червня 2025 р.

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

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

## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

(бакалавра, магістра)

Здобувача Олійник Людмили Михайлівни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи ЗХТ-22ск	
<b>Тема кваліфікаційної роботи</b>	<u>бакалавра</u>
	(бакалавра, магістра)
Використання питомого електричного опору для оперативної оцінки структури коксу	
<b>Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи</b>	<u>бакалавра</u>
	(бакалавра, магістра)
Вивчення взаємозв'язку показника питомого електричного опору (ПЕО) з упорядкованістю структури коксу	
<b>Переваги кваліфікаційної роботи</b>	<u>бакалавра</u>
	(бакалавра, магістра)
Кваліфікаційна робота присвячена вивченню впливу компонентного складу вугільної шихти та кінцевої температури процесу коксування на питомий опір коксу. Рекомендовано рівняння регресії, які можуть бути використовуватися для оптимізації компонентного складу та якості виробничих шихт, враховуючи їх суттєвий вплив на питомий опір коксу.	
<b>Недоліки кваліфікаційної роботи</b>	<u>бакалавра</u>
	(бакалавра, магістра)
Суттєвих недоліків не виявлено. В деяких місцях пояснювальної записки допущені стилістичні помилки та неточність перекладу.	
<b>Рекомендації:</b> робота може бути рекомендована до захисту.	
Рецензент	<u>Десна Наталія Анатолівна</u>
	(прізвище, ім'я та по-батькові)

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

Десна  
 (підпис)

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

Текст (вибрати необхідне):

- кваліфікаційної роботи;  
 навчальної/наукової праці;  
 наукових матеріалів

*Використання питомого електричного опору для оперативної оцінки  
структури коксу*

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

*ОЛІЙНИК Людмила Михайлівна*

(ПІБ)

*кафедра Хімічної технології та інженерії,*

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 59 сторінки друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 21,33 %.

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадіння із:

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

Матеріали було розглянуто та рекомендовано до захисту в ЕК  
(подальшого розгляду, друку, опублікування)

на засіданні кафедри Хімічної технології та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від «13» червня 2025 р. протокол № 16.

Керівник підрозділу



(підпис)

К. Шмельцер

Дата «13» червня 2025 р.

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

Я, *Олійник Людмила Михайлівна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота («Використання питомого електричного опору для оперативної оцінки структури коксу») 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.

13.06.2025

*Олійник Л.М.*

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

Я, *ОЛІЙНИК Людмила Михайлівна*, здобувач(ка) Шск курсу, групи ЗХТ-22ск Державного університету економіки і технологій розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) заборонену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текст в інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

2.06.2025



*Л. Олійник*