

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

Зубок Владислава Олексіївна

за матеріалами КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

науковий К.Т.Н. _____ Шмельцер К.О.
керівник
(підпис)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

Від 12.06.2026 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)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Хімічних технологій та інженерії
Завідувач кафедри _____
(підпис) _____
«_____» _____ 20__ року
доцент, к.т.н.
Шмельцер К.О.
(посада, вчене звання ,
прізвище, ініціали)

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Зубок Владислави Олексіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Розробка математичних залежностей прогнозування насипної густини з урахуванням характеристик вугільної сировини

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 №227-ст від «6» квітня 2026 р.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026р.

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: аналіз науково-технічної літератури щодо ролі насипної густини вугільної шихти у процесах підготовки вугілля до коксування та її впливу на якість доменного коксу. Дослідження факторів, що впливають на величину насипної густини вугільної сировини, зокрема технологічні, петрографічні та гранулометричні характеристики вугілля.

4.2 Основна частина: аналіз властивостей вугільних компонентів за показниками технічного, пластометричного та петрографічного аналізів, а також оцінка впливу вологості, ступеня окисненості та гранулометричного складу на насипну густину. Математична обробка експериментальних даних із використанням кореляційного та регресійного аналізу. Розробка математичних залежностей для прогнозування насипної густини вугільних концентратів і вугільних шихт з урахуванням їх якісних характеристик. Розробка рекомендацій щодо використання отриманих залежностей для оптимізації складу вугільних шихт

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 «6» квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	12.05.2026	
2.	Основна частина	26.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2026	
4.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
5.	Захист роботи в ЕК	16.06.2026	

Здобувач

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

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

[illegible]

					ННТІ. 161. КБР. ПЗ				
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Відомість кваліфікаційної бакалаврської роботи	Літ.		Лист	Лист
Розробив	Зудак В.О.					КРБ	Т	1	
Керівник	Шмельцер К.О.					ННТІ ДУЕТ			
Консульт.	Шмельцер К.О.					Каф. ХТІ			
Н.контр.	Шмельцер К.О.					гр. ХТ-23-ск			
Затв.	Шмельцер К.О.								

АНОТАЦІЯ

Зубок В.О. Розробка математичних залежностей прогнозування насипної густини з урахуванням характеристик вугільної сировини – Рукопис.

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

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню впливу параметрів підготовки вугільної шихти на насипну щільність та якість доменного коксу в умовах сучасного коксохімічного виробництва.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення ефективності процесу коксування та забезпечення стабільних показників якості коксу відповідно до вимог доменного виробництва.

Встановлено, що одним із визначальних комплексних показників ефективності підготовки вугільних шихт при класичній технології шарового коксування є насипна щільність шихти, яка суттєво впливає на механічну міцність, стиранність та реакційну здатність коксу.

У роботі проаналізовано основні фактори, що визначають величину насипної щільності вугільної шихти, зокрема вологість, зольність, ступінь помелу та окисненість вугілля. Досліджено вплив вологості шихти на величину тиску розпирання та усадку коксового пирога. Встановлено, що зі збільшенням вологості шихти змінюються умови формування коксового масиву та перебігу пластичного стану вугілля, що обумовлює необхідність жорсткого контролю вологості для забезпечення стабільності технологічного процесу та прогнозованої якості коксу.

Показано, що підвищення зольності вугільної шихти супроводжується збільшенням її насипної щільності внаслідок високої густини мінеральної частини вугілля. При цьому мінеральні включення негативно впливають на структуру та механічні властивості коксу, сприяючи зростанню його стираності та зниженню міцності. Встановлено, що найбільш істотний вплив на насипну

щільність мають робоча та аналітична волога, високі значення яких часто пов'язані з окисненістю вугілля.

За результатами дослідження підтверджено можливість використання розроблених математичних залежностей для прогнозої оцінки насипної щільності вугільних концентратів у силосах на основі лабораторних даних. Визначено, що підвищення насипної щільності вугілля суттєво збільшує навантаження на конструкції силосів і бункерів, що необхідно враховувати при їх експлуатації та проектуванні.

Узагальнення отриманих результатів показало, що регулювання насипної щільності, вологості та зольності вугільної шихти є важливою умовою підвищення ефективності процесу коксування, покращення структурно-механічних характеристик доменного коксу та забезпечення стабільної роботи доменних печей.

Ключові слова: вологість, зольність, насипна щільність, силос, окиснення, якість коксу, продуктивність коксових печей.

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Наукові основи технології підготовки вугілля до коксування

1.2 Насипна щільність та фактори впливу на її величину

1.3 Дослідження впливу зольності, вологості та гранулометричного складу на насипну щільність вугільної шихти в умовах КХВ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз впливу технологічних параметрів якості вугільних концентратів на їх насипну щільність

2.1.1 Методологія виконання дослідження. Характеристики сировини та устаткування

2.1.2 Результати дослідження якості вугільних концентратів

2.2 Математичний аналіз досліджених взаємозв'язків якості вугільних концентратів та їх насипної щільності

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

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, спікливості, 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 вдосконаленню 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.

Наразі найбільш перспективною технологією доменної плавки є технологія вдування в фурми печі пиловугільного палива, а в коксовому виробництві — технологія трамбування вугільної шихти перед подачею її в коксові печі, що забезпечує високу насипну щільність вугільного пирога.

Головним фактором підготовки вугільних шихт при класичній технології шарового коксування також є насипна щільність вугільної шихти, на яку найбільший вплив, без застосування механічних способів її збільшення (трамбування, часткове брикетування тощо), чинить вміст у ній вологи, золи та ступінь помелу шихти.

Оцінка та контроль величини насипної щільності дасть можливість оптимізувати роботу вуглепідготовчих цехів, що безсумнівно позитивно вплине на роботу коксового виробництва та якість коксу.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Наукові основи технології підготовки вугілля до коксування

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

Якість коксу залежить як від компонентного складу вугільної шихти, так й від технології підготовки вугільних концентратів до процесу коксування за такими показниками, як: гранулометричний склад, насипна щільність, вологість, вихідна температура вугільної маси. Останнім часом у коксохімічному виробництві значну увагу приділяють упровадженню нових технологічних рішень, спрямованих на покращення властивостей вугільних шихт. Одним із таких напрямів є використання різних типів добавок: неорганічних (карбонати, карбіди), опіснюючих (антрацит, коксовий дріб'язок, коксовий пил), а також органічних компонентів, представлених рідкими й твердими продуктами коксохімічного та нафтохімічного виробництва [1–4]. Крім того, поширення набули технології коксування трамбованих шихт [5, 6], методи підготовки сухої та термічно обробленої шихти [7–11], а також процеси повного або часткового брикетування [12–18].

Підвищення насипної щільності при трамбуванні досягається внаслідок ущільнення шихти, що супроводжується переміщенням, переорієнтацією та більш щільним розташуванням вугільних зерен [4–6].

Технологія попереднього висушування шихти, розроблена компанією Nippon Steel Corporation, спочатку була реалізована у вигляді процесу СМС, основу якого становить регулювання вологості шихти, а пізніше модернізована до процесу DAPS, який поєднує сушіння та огрудкування вугільної маси [19].

У межах технології СМС вугілля перед коксуванням висушують у трубчастій сушарці, знижуючи його вологість приблизно з 10 % до 5–6 % [19].

Процес DAPS передбачає сушіння шихти у псевдозрідженому шарі до вологості близько 2 %. Пілоподібна фракція, що утворюється під час сушіння, надходить на огрудкування, після чого отриманий матеріал змішують із сухим крупним вугіллям та направляють у коксову піч [20].

Технологія термічної підготовки полягає у швидкому нагріванні шихти до температури 150–250 °С без доступу кисню перед коксуванням. Її застосування забезпечує можливість отримання коксу з підвищеною механічною міцністю навіть із шихт, що містять значну кількість високолеткого слабоспівливого вугілля [10]. Так, зниження вологості вугілля, яке досягається в зазначених процесах, призводить до збільшення насипної щільності вугілля.

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

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

- прийоми підготовки, які застосовуються на практиці, не призводять до глибокої зміни органічної маси вугілля;
- позитивний вплив прийомів підготовки вугілля полягає у створенні комплексу заданих фізико-хімічних параметрів у насипній масі вугільної завантаження;
- підготовка вугілля покращує фізико-хімічні умови протікання процесів спікання продуктів деструкції зерен вугілля як у пластичній зоні, так і на стадії коксоутворення.

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

У складі вугільної шихти використовують вугілля різних технологічних груп, що мають різні фізичні та технологічні властивості. Для отримання постійної якості коксу важливо забезпечити рівномірне спікання і коксівність вугільної шихти. У зв'язку з цим не обходимо, щоб зерна вугілля мали якомога більшу поверхню зіткнення [2].

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 вуглепідготовки, 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.

Газове вугілля, що характеризуються підвищеною газопроникністю, не забезпечує достатнього внутріпластичного тиску в пластичному стані. Тому необхідно зерна цього вугілля змішувати з зернами жирного та коксового вугілля, важко газопроникних в період пластичного стану. У такій суміші забезпечуються необхідні газопроникність і внутріпластичний тиск в період спікання. Також необхідний контакт зерен слабоспікливого пісного вугілля із зернами добреспікливого вугілля.

Враховуючи наведені аргументи сформулюємо основні завдання при підготовці вугілля до коксування:

- забезпечити максимально постійні показники якості вугілля;
- звести до мінімуму відхилення показників якості від середніх значень (усереднення вугілля);
- добре змішувати компоненти вугільної шихти і підтримувати сталість її складу в процесі складання.
- подолання впливу неоднорідності вугільного матеріалу для отримання коксу необхідної якості.

Основні шляхи підвищення якості коксу наведені в таблиці 1.1.

Як видно з даних таблиці, одним з основних напрямків і способів підвищення якості коксу при підготовці вугілля для коксування є збільшення насипної маси вугільної шихти, що досягається наступними способами:

- зниженням вологості вугільної шихти;
- підбором оптимального марочного складу вугілля (кількість Ж, К і ПС, показник відбиття вітриніту, вихід летючих, товщина пластичного шару, зола, волога, сірка та ін.);
- застосуванням технології вибіркового подрібнення, гранулювання, брикетування, трамбування, термічної підготовки, обмаслювання шихти.

Так визначено, що якщо замість звичайного дроблення використовується вибіркоче із застосуванням пневматичної сепарації, то кокс виходить кращий за текстурною та структурною однорідністю [1].

Таблиця 1.1

Основні шляхи підвищення якості коксу

Напрямок, технологія	Способи
Підготовка вугілля до коксування	1. Підбір раціонального компонентного складу шихти, що забезпечить її оптимальні властивості (кількість Ж, К та ПС; показник відбиття вітриніту; вихід летких; товщина пластичного шару; зольність; волога; сірчистість та ін.). 2. Збільшення насипної щільності (зниження вологості; вибіркоче подрібнення; гранулювання; брикетування; трамбування; формування в пластичному стані; термічна підготовка).
Зниження градієнту усадки при коксуванні шихти	1. Зниження вологості. 2. Термічна підготовка.
Зміцнення тіла коксу	1. Підвищення температури коксування 2. Сухе гасіння. 3. Позапічна обробка.
Підготовка коксу до доменної плавки	1. Механічна обробка. 2. Сорткування на вузькі класи. 3. Оптимальний розмір кусків.

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1-3]

Також існує спосіб підготовки вугільної шихти для коксування, який включає дозування, сортування, дроблення, сушіння і змішування вугілля. Перед остаточним дробленням вугільну шихту поділяють за розміром зерен вугілля, відокремлюючи клас фракцією менше або дорівнює 6 мм, а частину шихти подрібнюють і змішують з попередньо виділеною фракцією менше або дорівнює 6 мм і сушать до 4-6 % залишкової вологості. В сушарці відокремлюють пилоподібний клас менше або дорівнює 0,5 мм, який брикетують. Брикети змішують з підсушеною шихтою і передають в коксове виробництво. Розглянутий спосіб підготовки вугільної шихти дозволяє підвищити щільність вугільного завантаження в коксові печі, продуктивність коксового виробництва, збільшити вихід валового і металургійного коксу, зменшити вміст класу вугілля 0 - 0,5 мм готової шихти, отримати кокс з поліпшеними показниками післяреакційної міцності коксу (CSR), реакційної здатності коксу (CRI) і збільшеною механічною міцністю M_{40} [1].

Одним з напрямків удосконалення підготовки вугільних шихт є вибір оптимального ступеня їх подрібнення. Раціональним напрямком підготовки вугільних шихт варто вважати укрупнене диференційоване подрібнення вугілля класу 3-0 мм (з 78 до 74,5 %), що забезпечує таке співвідношення крупності, при якому досягається максимальна щільність вугільного завантаження та висока спікливість вугільних шихт [7]. Міцність спікання вугільних часток перебуває в прямої залежності від насипної щільності вугільної маси.

Механічна міцність та стиранистість коксу можуть змінюватися внаслідок відхилення складу шихти та температурного режиму коксування. Якість коксу в першу чергу визначається оптимальним складом і кількістю вугільних концентратів. Неритмічність поставки великого числа марок вугілля й коливання їхніх фізико-хімічних параметрів знижують якість коксу та стабільність його показників.

Стабільний і оптимальний ступінь подрібнення компонентів шихти і максимально ефективно їх змішання визначають сталість фізичних і фізико-

хімічних властивостей коксу. Ступінь остаточного подрібнення залежить від характеристики і властивостей вугілля. Рядове вугілля більш зольне і петрографічне неоднорідне вугілля потребує більш тонкого подрібнення. Органічна речовина коксу та мінеральні частинки мають різні термічні коефіцієнти об'ємного розширення і усадки, тому вони не зрощуються і поверхня, що їх розділяє служить початком тріщин. Якщо мінеральні зерна крупні, тріщини розширюються, подовжуються і послаблюють кокс. Наявність крупних зерен породи підвищує тріщинуватість, а зерен розміром від 1,5 до 3 мм викликає підвищену стиранність коксу [8]. Щоб уникнути надмірного переподрібнення шихти необхідно виділяти крупні, більш тверді і з менш текучою речовиною при нагріванні зерна і проводити їх тонке додрібнення з подальшою присадкою в шихту. В роботі [7] визначено, що при підготовці шихт до коксування «не треба дробити нічого зайвого». Тому раціональним є попереднє виділення на грохотах з вихідної шихти клас 0-3 мм, а на дроблення посилати тільки фракцію 3 мм. При цьому дроблення цієї частини шихти повинне вестись таким чином, щоб сумарний вміст класу - 0,5 мм у шихті, що йде на коксування, не перевищував значення 30-32 % [7]. Якщо забезпечити цю умову не вдається, то треба переходити на виділення із шихти класу 0-6 мм, а на дроблення відправити клас + 6 мм.

Таким чином, основні умови для поліпшення якості коксу:

- повинен бути досягнутий оптимум подрібнення вугілля, який залежить від глибини їх збагачення, петрографічного складу і спікливості;
- для підвищення міцності коксу найбільш ефективно подрібнення вугілля або шихт, в результаті якого при зниженні верхнього класу крупності утворюється оптимальна кількість тонких класів, а крупні класи виходять покращеного петрографічного складу і менш мінералізованими;
- покращувати якість залишкових крупних класів необхідно для зменшення напруженості і тріщинуватості коксу, а знижувати кількість пилу — для підвищення міцності його пористого тіла;

- крупність вугілля можна зменшити тільки до певної межі, перевищення якої негативно впливає на якість коксу (з подрібненням вугілля знижується міцність пористого тіла коксу);

- для отримання коксу з найбільшою міцністю пористого тіла, що менш стирається, вміст класу менше 0,5 мм повинен знаходитися в межах 35-40 % [6];

- оптимальне поєднання класів крупності шихти забезпечується при гранулометричному складі: 10 % 6-12 мм, 20 % 3-6 мм, 30 % 0,5-3 мм і 40 % класу менше 0,5 мм [6].

- зниження щільності насипної маси при подрібненні вугільної шихти збільшує пористість коксу, внаслідок чого міцність коксу знижується;

- подрібнення вугільної маси знижує спікливість вугілля, оскільки збільшує питому поверхню вугільних частинок, підсилює адсорбцію вугіллям кисню, збільшує газопроникність пластичної маси вугілля, прискорює евакуацію парогазової фази і гальмує протікання при піролізі відновних процесів [6].

Таким чином, для підвищення міцності коксу найбільш ефективним є спосіб подрібнення вугілля або шихти, в результаті якого при зниженні верхньої межі крупності утворюється оптимальна кількість тонких класів (35-40 % класу менше 0,5 мм), а залишкові крупні класи отримуються покращеного петрографічного складу і менш мінералізованими, з показниками спікливості і усадки, аналогічними показникам суміші інших класів.

Основні технологічні прийоми підготовки вугільних концентратів, використаних на сучасних коксохімічних виробництвах України, на жаль не характеризуються різноманітністю і зводяться в основному до прийому, дозування і подрібнення до рівня, що забезпечує насипну масу 0,750 - 0,800 т/м³, тобто вміст класу < 3 мм коливається від 75 до 80%. В той же час значні коливання марочного складу шихти за рахунок залучення для виробництва коксу вугілля різних басейнів з різними технологічними властивостями роблять необхідним рекомендувати диференціальний підхід при виборі рівня подрібнення вугільних шихт.

1.2 Насипна щільність та фактори впливу на її величину

Щільність укладання вугільних зерен у завантаженні за значимістю є головним технологічним параметром, який визначає фізико-хімічні умови процесів спікання в пластичній зоні. У вугільному завантаженні є 40-50 % повітряних пор, для заповнення яких необхідно утворення достатньої кількості спінених термостійких нелетких продуктів термічної деструкції з зерен вугілля різної крупності і стадії метаморфізму. Кількість рідинної нелеткої складової пластичної маси, їх якісна характеристика, ступінь парогазонасиченості і внутрішньопластичний тиск залежать від елементного складу і будови вугілля і, зокрема, від кількості кисневмісних сполук в органічній масі вугілля. Оціночним параметром для характеристики фізико-хімічних умов протікання процесів спікання може служити відношення утвореної кількості спіненої рідинної нелеткої складової до об'єму порожнин у вугільному завантаженні в межах ширини пластичної зони. Оптимальне поєднання класів крупності шихти (при найбільшому розмірі зерен 12 мм), що забезпечує максимальне значення щільності її насипної маси: 12-6 мм – 30-40 %; 6- 3 мм – 10-15 %; 3-0,5 мм – 10-15 %; < 0,5 мм – 35-40 % [3, 4].

У літературних джерелах досить широко висвітлено питання впливу різних факторів на насипну щільність вугілля та шихт [4–11]. В основному це стосується вологості, зольності та гранулометричного складу.

Подрібнення вугілля перед коксуванням має забезпечити оптимальний гранулометричний склад вугільної шихти, який повинен поєднувати інтереси отримання коксу необхідної якості з максимальною насипною щільністю завантаження, яка забезпечить також і підвищення спікливості шихти – високу рухливість вугільної пластичної маси і низьку її газопроникність [2].

Найбільший вплив на насипну щільність вугільної шихти, без застосування механічних способів її збільшення (трамбування, брикетування і т. д.), здійснює вміст у ній вологи і ступінь подрібнення шихти. Ці фактори впливають на тепловий

режим процесу коксування, фізико-механічні властивості коксу, вихід і якість хімічних продуктів коксування [4–11]. Коливання насипної щільності вугільної шихти змінюють якість коксу, у зв'язку з чим необхідно прагнути до дотримання постійності цього показника при експлуатації коксових печей.

Однак на даний час цих знань виявляється недостатньо для науково обґрунтованого ведення процесу отримання коксу та обліку вугільних концентратів у силосах закритого складу. Це стало наслідком того факту, що, у зв'язку з підвищенням вимог до якості коксу і ситуацією, що склалася з виснаженням вітчизняних ресурсів коксівного вугілля, українські коксохімічні підприємства змушені вводити в сировинну базу коксування вугілля ближнього (Казахстан, Польща) і далекого (США, Австралія, Канада тощо) зарубіжжя, а також вугілля малих підприємств України. Використання вугілля декількох басейнів в шихтах для виробництва високоякісного доменного коксу потребує вирішення ряду задач, найважливішими з яких є вивчення впливу технологічних факторів, таких як технологія підготовки вугільної сировини, на формування властивостей коксу. Зазначені вугільні концентрати відрізняються підвищеною зольністю, окисненістю і вмістом опіснюючих компонентів. Отже, актуальним є дослідження та уточнення математичних залежностей взаємозв'язку характеристик вугільної сировини з її насипною щільністю.

На думку Діденка В. Є. [2] підготовка вугілля перед коксуванням має забезпечити оптимальний гранулометричний склад вугільної шихти, який повинен поєднувати інтереси отримання коксу необхідної якості з максимальною насипною густиною завантаження, яка забезпечить також і підвищення спікливості шихти – високу рухливість вугільної пластичної маси і низьку її газопроникність.

Найбільший вплив на насипну густину вугільної шихти, без застосування механічних способів її збільшення (трамбування, брикетування і т. д.), здійснює вміст у ній вологи і ступінь подрібнення шихти. Ці фактори впливають на тепловий режим процесу коксування, фізико-механічні властивості коксу, вихід і якість

хімічних продуктів коксування [7-13]. Коливання насипної густини вугільної шихти змінюють якість коксу, у зв'язку з чим необхідно прагнути до дотримання постійності цього показника при експлуатації коксових печей.

Дані, наведені в роботах [2, 3], показують (рисунок 1.1), що при загальній вологості вугілля 1 % його насипна густина різного ситового складу росте і має максимум при вмісті класу 3-0 мм від 75 до 80 %. При вологості 2 % характер кривої той самий, але максимум виражений менш різко і знаходиться в області вмісту класу 3-0 мм близько 90 %. Збільшення вологості з 4 до 8 % викликає зменшення величини насипної густини вугільної шихти при будь-якому вмісті класу 3-0 мм, що підкреслює найбільший вплив вологості шихти на її насипну густину. У цих роботах також наведено графіки залежності насипної густини вугілля від вологості для вузьких класів його ситового складу. Найнижчу насипну густину має фракція 0-0,5 мм при вологості 10-14 %. При збільшенні ступеня подрібнення вугілля і шихт найбільш швидко зростає вміст класу <0,5 мм, що призводить до погіршення спікливості навіть коксівного вугілля [2]. В роботах [13, 15] вказується, що оптимальним вмістом вугільних зерен крупністю <0,5 мм в шихті є ≈ 35 %.

На рис. 1.2 наведено графіки залежності насипної маси вугілля від вологості для вузьких класів його ситового складу. Найнижчу насипну масу вугілля має фракція <0,5 мм при вологості 10–14 % [7, 8].

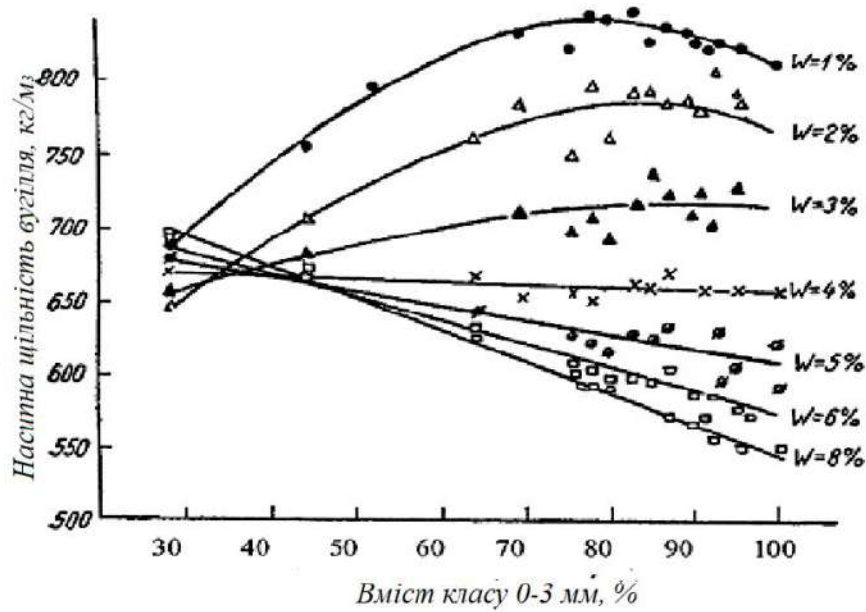


Рис.1.1. Залежність насипної щільності вугілля від ситового складу та вологості

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1-3]

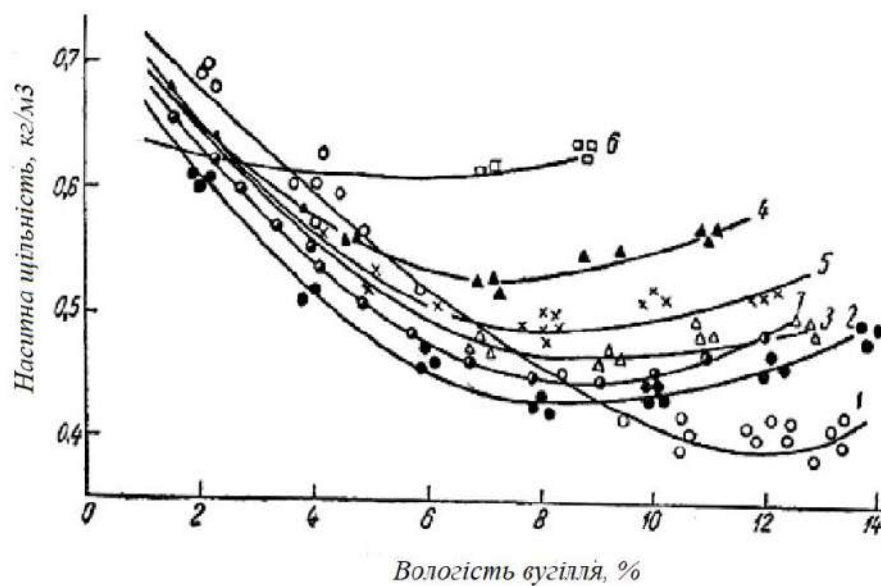


Рис.1.2. Залежність насипної щільності вугілля від ситового складу та вологості:

- 1 – клас 0-0,5 мм; 2 – клас 0,5-1,5 мм; 3 – клас 1,5-3 мм; 4 – клас 3-5 мм;
 5 – клас 1,5-5 мм; 6 – клас 5-6 мм; 7 – суміш: 0,5-1,5 мм – 50 %, 1,5-3 мм – 25 %, 3-7 мм – 25 %

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1-3]

Зі збільшенням ступеня подрібнення вугілля та шихт найшвидше зростає кількість фракції $-0,5$ мм, що призводить до погіршення спікливості навіть коксівного вугілля [6].

З даних, наведених на рис. 1.3 [7, 8], видно, що крива зміни насипної маси для вугілля з високою вологістю 12 % при збільшенні ступеня подрібнення бцльш круто падає, ніж при вологості 8 % (рис. 1.3).

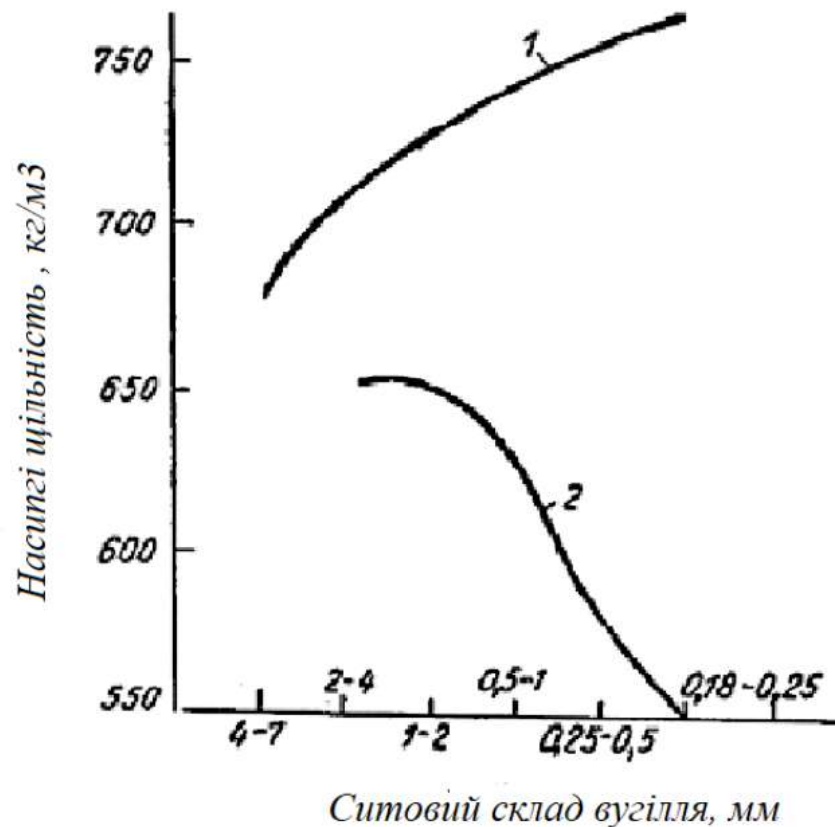


Рис.1.3. Залежність насипної щільності вугілля від ситового складу:

1 – сухе вугілля, 2 – вугілля з вологістю 12 %

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [7]

Зі збільшенням ступеня подрібнення вугілля і шихт помітно знижується їх насипна густина. Величина цього зниження при зміні ступеня подрібнення від 85 % вмісту класу 3-0 мм до 100 % коливається в значних межах для вугілля різних марок (табл. 1.2) [7].

Таблиця 1.2.

Зниження насипної густини вугілля різних марок при зміні ступеню подрібнення від 85 до 100 % вмісту класу 3-0 мм

Марка вугілля	Зниження насипної густини вугілля, %
Г	5,0
Ж	3,5
КЖ	8,0
К	14,0

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

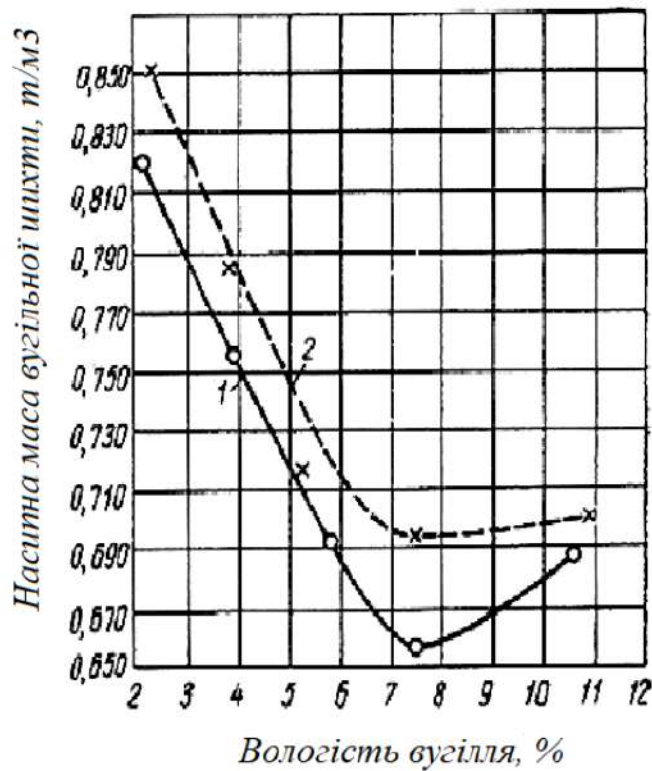


Рис. 1.4. Залежність насипної маси вугільної шихти від її вологості та подрібнення: 1 – 90 % класу < 3 мм; 2 – 84,6 % класу < 3 мм (оптимум)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

З матеріалів літературного огляду слідує, що проблема вдосконалення технології підготовки вугілля до коксування залишається актуальною і вимагає

підвищеної уваги. Комплексним показником ефективності технології підготовки є насипна густина вугільної шихти.

1.3 Дослідження впливу зольності, вологості та гранулометричного складу на насипну щільність вугільної шихти в умовах КХВ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Збільшення насипної густини вугільної шихти, яка завантажується в коксові камери, не тільки підвищує продуктивність коксових батарей, але й призводить до поліпшення якості коксу [11].

Використовуючи методику, наведену в розділі 2, було відібрано проби вугільної шихти для визначення технічних, пластометричних і петрографічних параметрів, а також для визначення насипної густини та гранулометричного складу шихти ВПЦ КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Навантаження на стрічці ВПЦ в цей період було 300 т/год. Якість досліджуваних вугільних концентратів наведено в таблиці 1.3 [13].

Таблиця 1.3

Гранулометричний склад вугілля, яке використовується в шихті ВПЦ КХВ

Постачальник, найменування ЦЗФ, ЗФ	Марка вугілля	Волога (W^t), %	Гранулометричний склад вугілля, мм					Насипна густина, т/м ³
			+6	3-6	0,5-3,0	0-0,5	0-3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ТЗ4 Польща	Г	9,1	38,29	15,99	32,69	13,03	45,72	0,859
“Coking Coal Pardee”, США	ГЖ	11,0	42,65	13,76	22,24	21,35	43,59	0,870
Компанія “Укркокс”,	Ж	14,4	12,48	13,33	41,05	33,14	74,19	0,859

Продовження табл.1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЦЗФ “Київська”, Україна	Ж	12,0	2,86	5,98	49,81	41,35	91,16	0,832
ЦЗФ “Червонолиманська”, Україна	Ж	10,5	40,56	19,74	23,10	16,60	39,7	0,871
ЗФ “Печорська”, РФ	2Ж	10,5	29,48	14,56	25,10	30,86	55,96	0,841
ЗФ “Східна”, Казахстан	К+КЖ	12,6	6,68	9,52	40,4	43,40	83,80	0,801
ЗФ “Північна”, РФ	К	12,7	19,95	15,24	32,32	32,49	64,81	0,847

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [13]

За результатами проведених досліджень побудували графіки впливу вмісту класів 0-3 мм і 0-0,5 мм на насипну густину вугільної шихти (рис. 1.5, 1.6).

З аналізу графіків видно, що при збільшенні ступеня помелу шихти з 71 до 92 % (рис. 1.5) при її середній вологості 11,2 % насипна густина зменшується з 0,862 до 0,761 т/м³, тобто підвищення ступеня подрібнення шихти на 1 % знижує її насипну густину на 4,8 кг/м³, а при середній вологості шихти 5,6 % – на 3,9 кг/м³. Необхідно зазначити, що при постійному ступені подрібнення шихти її насипна густина тим вище, чим нижче вміст води в шихті [13].

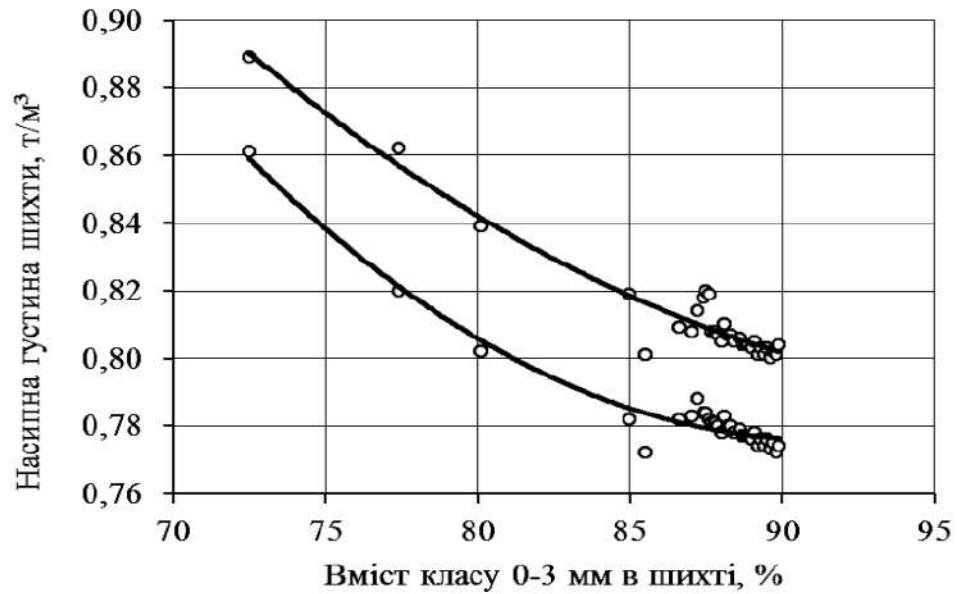


Рис. 1.5. Залежність насипної густини вугільної шихти від ступеня її помелу (при середніх значеннях вологості шихти (W^r_t): верхня крива 5,6 %, нижня – 11,2 %)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [13]

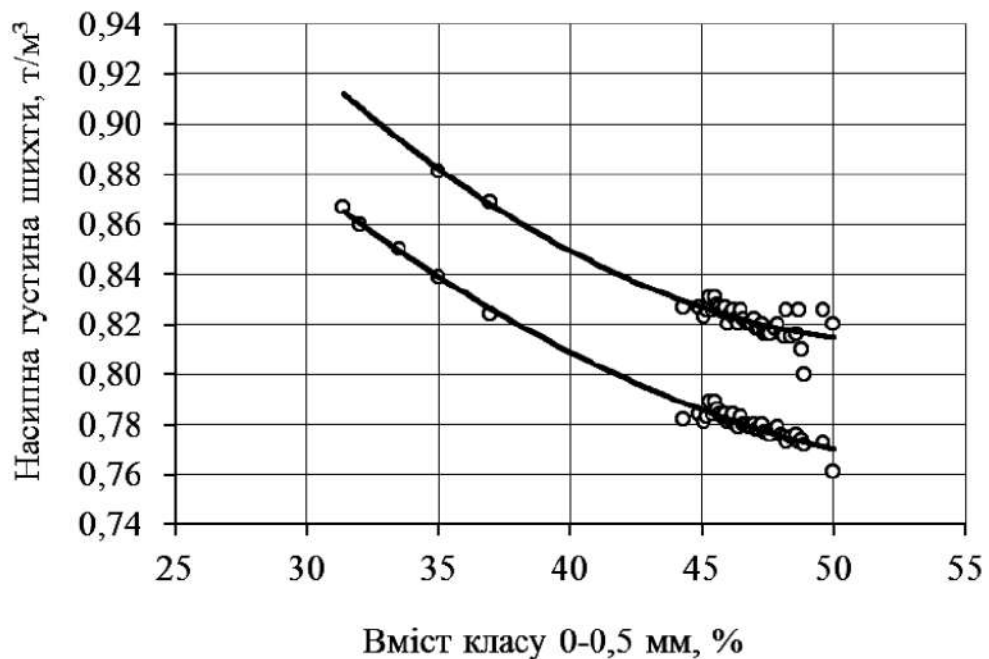


Рис. 1.6. Залежність насипної густини вугільної шихти від вмісту в ній класу 0-0,5 мм (при середніх значеннях вологості шихти (W^r_t): верхня крива 5,6 %, нижня – 11,2 %)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

Вміст фракції 0-0,5 мм на теоретично оптимальному рівні $\approx 35\%$ [13-15] (рис. 1.6), навіть при вологості шихти 11,2 %, забезпечує досить високе значення насипної густини шихти 0,86 т/м³, а при вологості 5,6 % можна очікувати підвищення насипної густини шихти до 0,91 т/м³; у всякому разі, експериментально отримано, що при вмісті в шихті 35 % “опіснюючої” фракції 0-0,5 мм при вологості 5,6 % насипна густина шихти дорівнює 0,885 т/м³.

Переподрібнення шихти і збільшення в ній фракції 0-0,5 мм до 54 % призводить до різкого зменшення насипної густини шихти до 0,75 т/м³. Ситуацію можна поліпшити, якщо цілеспрямовано знизити вологість вугільної шихти з 11,2 до 5,6 %, при цьому насипна густина шихти збільшиться до 0,81 т/м³.

Дослідження вугілля, яке використовується для складання шихт на КХВ, показало, що більша їх частина вже містить класу 0-0,5 мм на рівні, і навіть вище, оптимального його значення в шихті. У зв'язку з цим при ступені подрібнення шихти 87,7-89,2 % в ній вміст класу 0-0,5 мм дорівнює 46-49 %, що, безумовно, позначається на якості коксу. При такому високому вмісті фракції 0-0,5 мм у вугіллі необхідно застосовувати технології попереднього гранулювання або брикетування цієї фракції для підвищення насипної густини шихти, а деякі марки вугілля, наприклад, “Ж – Київська”, взагалі небажано піддавати подальшому подрібненню, дотримуючись “класичного” принципу, що при підготовці до коксування шихт “не треба подрібнювати нічого зайвого” [13].

Досліджуючи залежність насипної густини вугільної шихти, що надходить на батареї 1-4 коксохімічного виробництва ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг”, від її вологості, отриманий графік, наведений на рис. 1.7 (за батареями 5-6 залежність представлена на рис. 1.8).

Він має вигляд параболи з мінімальним значенням насипної густини при вологості 10,3 %, але зростання насипної густини відбувається не за рахунок зниження вологості шихти, а, навпаки, за рахунок її збільшення, тобто відбувається зростання насипної густини шихти за рахунок збільшення маси води в шихті [13].

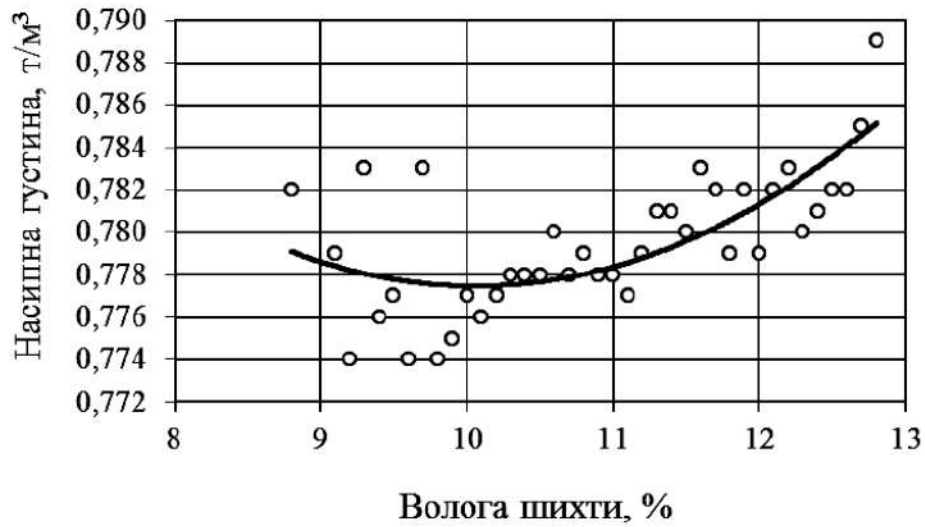


Рис. 1.7. Залежність насипної густини вугільної шихти (бат. 1-4) від її вологості (W_t) при середніх значеннях: класу -3 мм – 88,2 %, зольності – 10,2 %, класу -0,5 мм – 46,8 %

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [13]

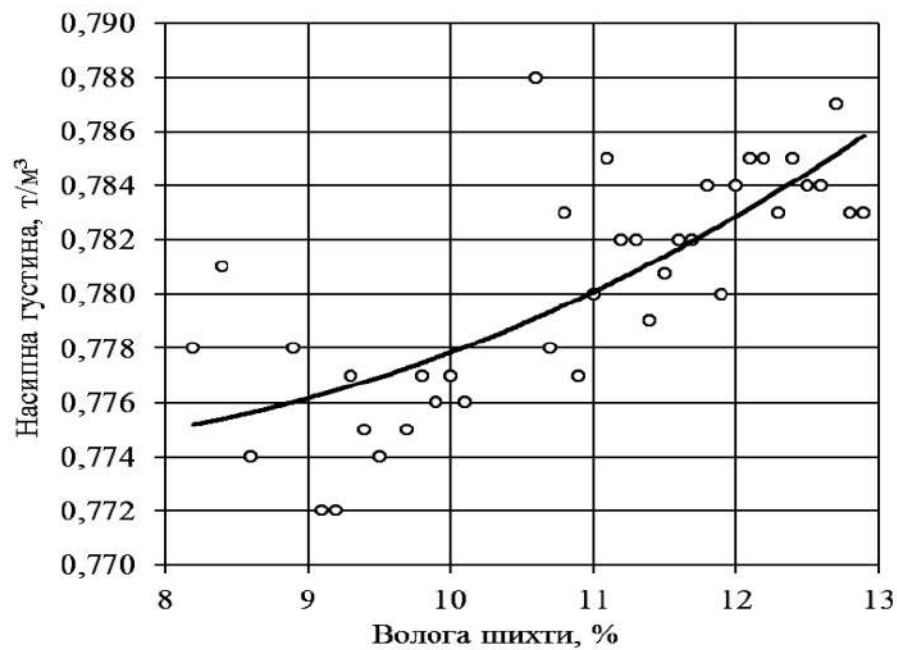


Рис. 1.8. Залежність насипної густини вугільної шихти (бат. 5-6) від її вологості (W_t) при середніх значеннях: класу -3 мм – 88,1 %, зольності – 10,2 %, класу -0,5 мм – 46,6 %

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [13]

Вплив зольності на насипну густину шихти, що поступає на батареї 1-4 КХВ ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” показано на рис. 1.9 (по батареям 5-6 аналогічна залежність представлена на рис. 1.10).

Як видно з рисунків, зі збільшенням зольності вугільної шихти її насипна густина зростає за рахунок того, що дійсна густина мінеральної частини вугілля значно вище дійсної густини його органічної маси. Так, дійсна густина органічної маси вугілля Донецького басейну змінюється в діапазоні від 1160 до 1390 кг/м³ в залежності від ступеню метаморфізму, дійсна густина мінеральної частини вугілля >1800 кг/м³ [11].

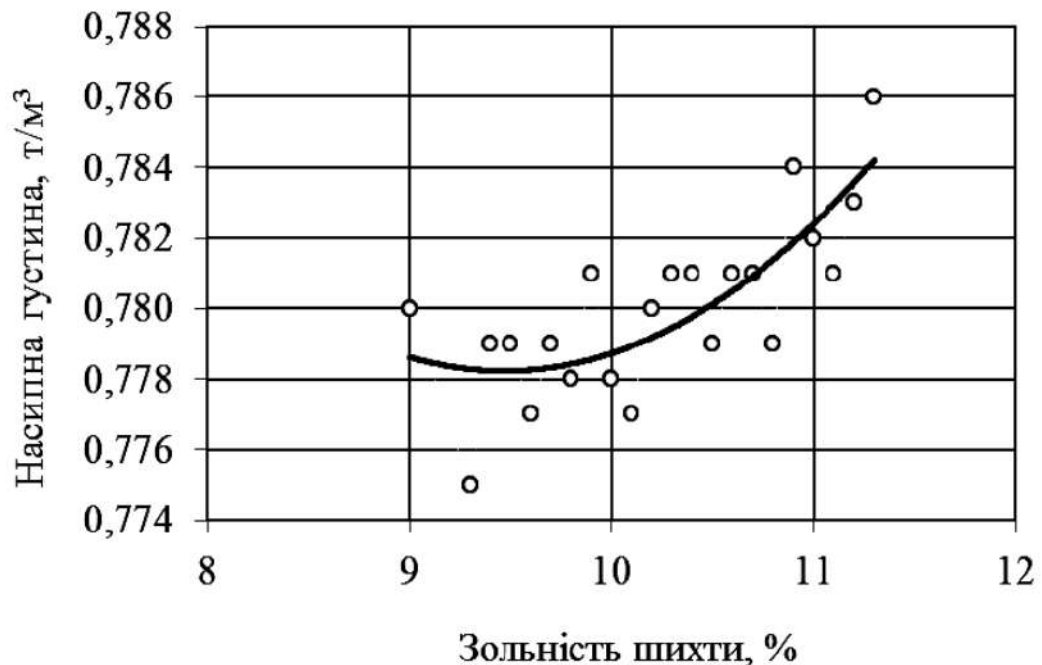


Рис. 1.8. Залежність насипної густини вугільної шихти (бат. 1-4) від зольності при середніх значеннях: класу -3 мм – 88,2 %, класу -0,5 мм – 46,8 %

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

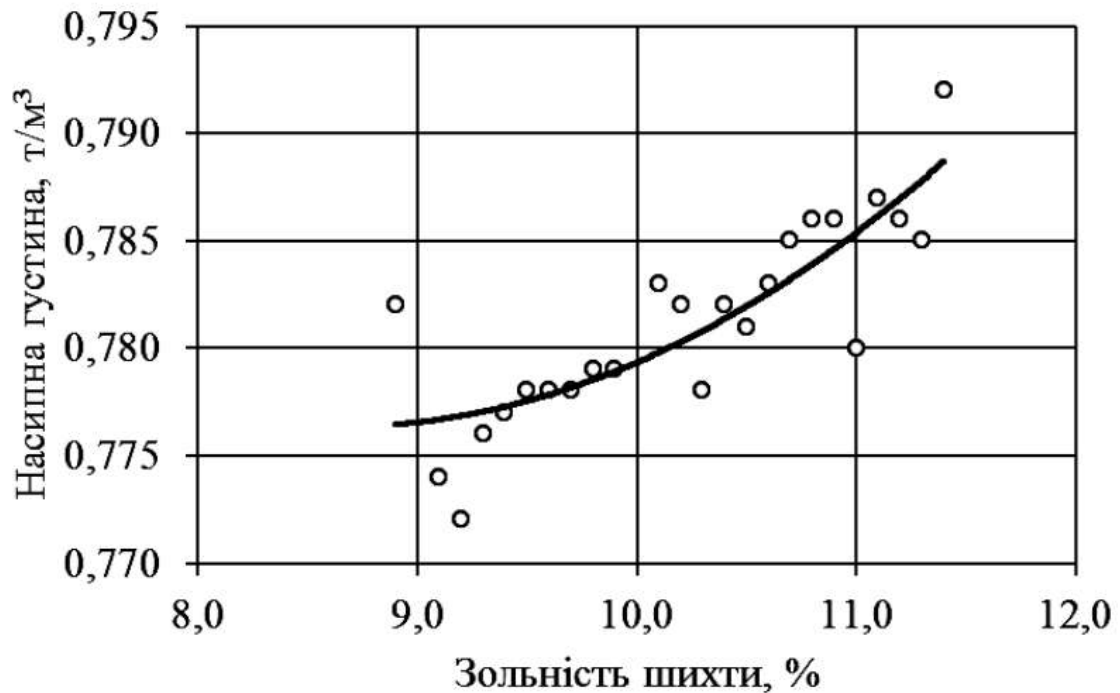


Рис. 1.9. Залежність насипної густини вугільної шихти (бат. 5-6)

від зольності при середніх значеннях: класу -3 мм – 88,1 %,

вологості – 11,2 %, класу -0,5 мм – 46,6 %

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

Також необхідно враховувати, що мінеральні включення є центрами внутрішніх напружень, тобто послаблюють структуру коксу, знижуючи його міцність.

На негативний вплив зольності на фізико-механічні властивості коксу також вказує автор роботи [13]. В роботі [9] проаналізовано вплив хімічного складу мінеральної частини вугілля на реакційну здатність коксу, запропоновані математичні моделі для прогнозування реакційної здатності та післяреакційної міцності коксу з урахуванням індексу основності золи.

Для аналізу спільного впливу на величину насипної густини шихти зміни вологості, зольності, гранулометричного складу шихти (за вмістом в ній класів 0-3 мм та 0-0,5 мм) були відібрані проби вугільної шихти. Марочний склад вугільної шихти був такий, %: Г – 10,8 %, Ж – 67,1 %, К – 14 %, ПС – 5,5 % та 2,6 % інші. Характеристики проб вугільної шихти наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Якісні характеристики проб вугільної шихти

Номер проби шихти	Насипна густина, BD^r , т/м ³	Волога шихти W_i^r , %	Зольність шихти A^d , %	Вміст класу 0-3 мм, %	Вміст класу 0-0,5 мм, %
1	0,779	10,3	9,4	87,6	46,9
2	0,779	9,5	9,4	87,56	46,5
3	0,782	9,1	9,3	87,2	45,9
4	0,783	9	9,5	87,3	46
5	0,786	8,3	9,7	86,9	45,6
6	0,788	7,5	9,5	87,0	45,5
7	0,787	7,8	9,6	87,5	46,1
8	0,79	7,7	9,5	85,6	42,9
9	0,795	7,7	9,8	83,0	40,6
10	0,797	8,2	9,8	82,4	40,6
11	0,812	7,8	9,2	80,6	39,0
12	0,805	7,3	9,2	82,5	39,3
13	0,803	7,3	9,6	82,1	39,0
14	0,804	7,9	9,7	82,2	39,7
15	0,803	7,2	10	82,9	41,5
16	0,798	7,5	9,4	84,0	43,2
17	0,798	7,7	9,7	84,3	44
18	0,796	9	9,4	84,7	43,4
19	0,794	9,3	9,8	84,8	42,7
20	0,797	9,3	9,6	84,7	42,6

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [13]

На підставі кореляційного аналізу отримали коефіцієнти парної кореляції, які представлені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Коефіцієнти парної кореляції

Параметр	Коефіцієнти парної кореляції			
	Волога W_t^r , %	Зольність A^d , %	Вміст класу 0-3 мм, %	Вміст класу 0-0,5 мм, %
Насипна густина вугільної шихти, BD^r , т/м ³	-0,63	0,098	-0,95	-0,914

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8,11,13]

Значення отриманих коефіцієнтів свідчать про тісний зв'язок вологи та гранулометричного складу вугільної шихти з її насипною густиною. На підставі кореляційного аналізу отримано регресійне рівняння залежності насипної густини вугільної шихти від зазначених технологічних факторів:

$$BD^r = 1,16 - 0,00174 \cdot W + 0,000553 \cdot \gamma_{(0-0,5 \text{ мм})} - 0,00423 \cdot \gamma_{(0-3 \text{ мм})} - 0,00274 \cdot A^d \quad (1.1)$$

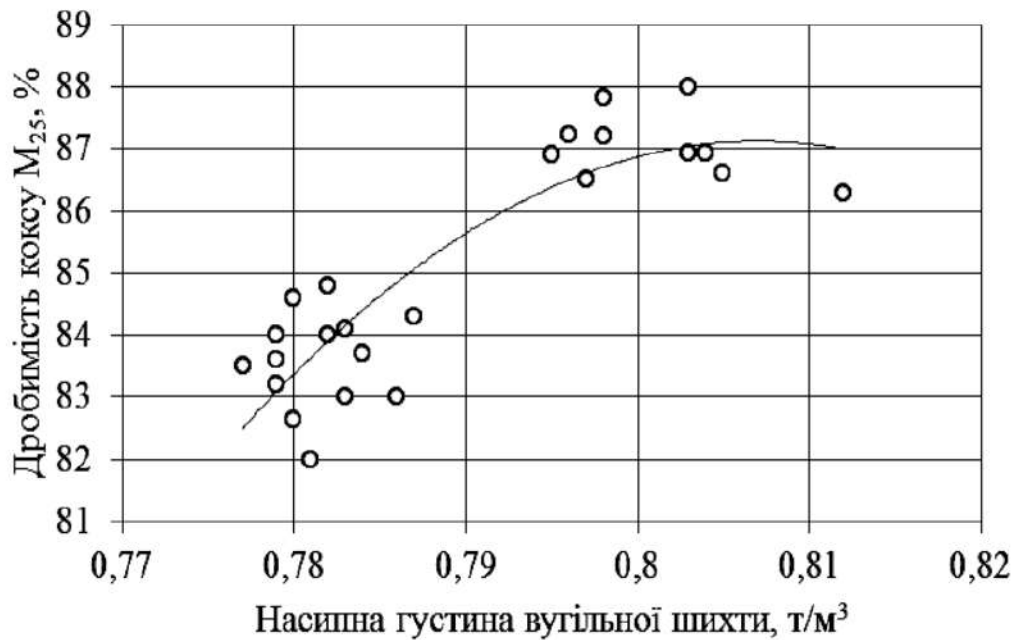
Коефіцієнт детермінації $D = 92\%$; коефіцієнт кореляції $r = 0,959$.

Залежність фізико-механічних властивостей коксу (за показниками міцності M_{25} і M_{10}) від насипної густини вугільної шихти характеризують графіки, представлені на рисунках 1.11 та 1.12.

На підставі даних промислових випробувань та багатофакторного кореляційного аналізу залежностей показників M_{25} і M_{10} від насипної густини вугільної шихти були отримані регресійні рівняння та статистичні оцінки:

$$M_{25} = -32,9939 + 149,4599 \cdot BD^r \quad \text{при } D = 72,4 \%, r = 0,85 \quad (1.2)$$

$$M_{10} = 44,46453 - 46,067 \cdot BD^r \quad \text{при } D = 65 \%, r = 0,81 \quad (1.3)$$



**Рис. 1.11. Залежність дробимості коксу M_{25}
від насипної густини вугільної шихти**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

Таким чином, зниження насипної густини вугільної шихти негативно впливає на процес формування структури коксу та його якісні характеристики. При недостатньому ущільненні шихти погіршуються умови спікання вугільних зерен, формується менш щільна та менш однорідна коксова структура, що призводить до зменшення механічної міцності коксу. Одночасно спостерігається підвищення його стираності та схильності до руйнування під час транспортування й роботи в доменній печі.

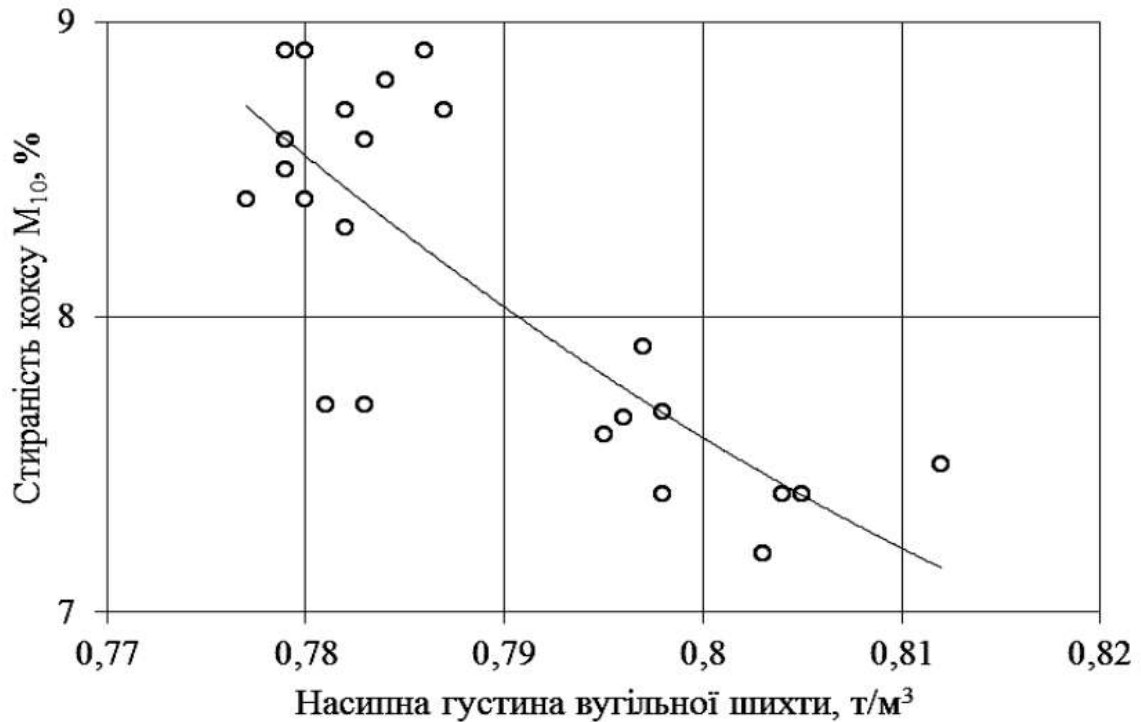


Рис. 1.12. Залежність стираності коксу M₁₀ від насипної густини вугільної шихти

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

Погіршення міцнісних показників коксу супроводжується збільшенням утворення дріб'язку, зниженням газопроникності шихтового стовпа та погіршенням рівномірності проходження газових потоків у доменній печі. У результаті зростає питома витрата коксу, знижується ефективність доменного процесу та ускладнюється стабільне ведення плавки. Крім того, підвищене руйнування коксу в умовах доменного виробництва може негативно впливати на тепловий і газодинамічний режими роботи печі, що в цілому знижує техніко-економічні показники доменної плавки.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз впливу технологічних параметрів якості вугільних концентратів на їх насипну щільність

2.1.1 Методологія виконання дослідження. Характеристики сировини та устаткування

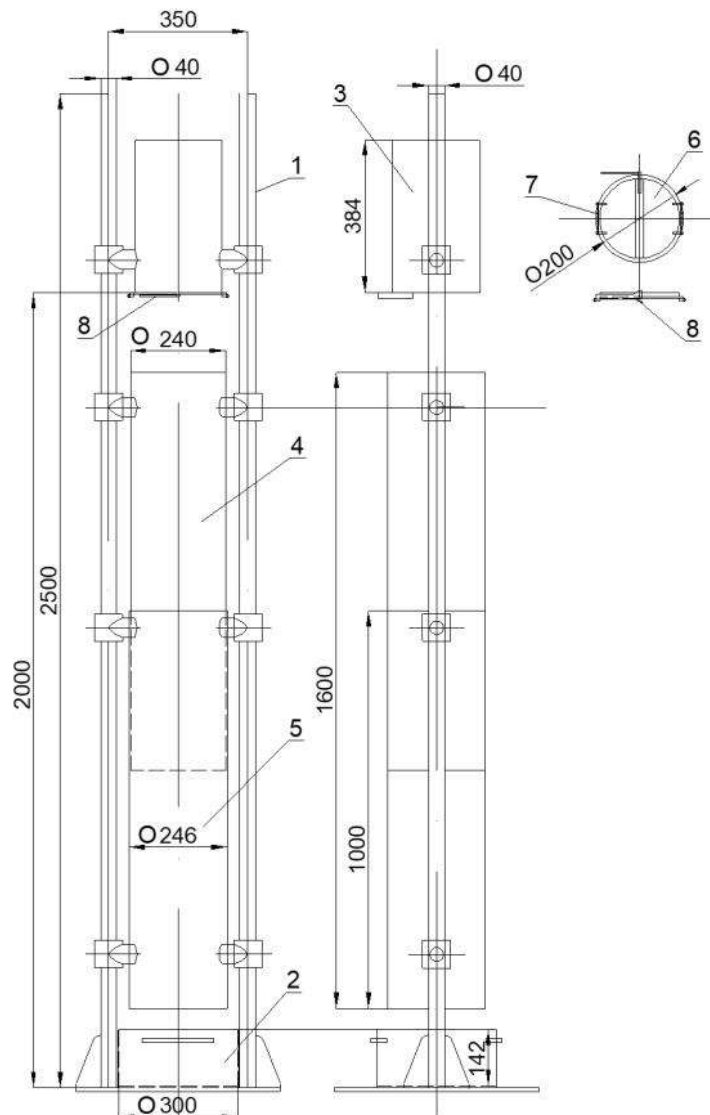
В умовах підприємства були відібрані репрезентативні проби 16 вугільних концентратів, що входять до заводської сировинної бази.

Визначення насипної щільності здійснювали в малому апараті, встановленому на підприємстві. Методика визначення насипної щільності вугільних концентратів і вугільної шихти фактичної вологості та крупності базується на визначенні маси вугілля, яке заповнило мірний контейнер ($V = 0,01 \text{ м}^3$) апарату після скидання з висоти 2000 мм.

Апарат для визначення насипної щільності (рис.2.1) складається з мірного контейнера, завантажувального бункера і направляючої телескопічної труби. Крім того, для проведення випробувань необхідні лінійка для розрівнювання (планування) і зважувальний пристрій.

Контейнер циліндричної форми ємністю $0,01 \text{ м}^3$ з діаметром основи 300 мм і заввишки 142 мм має гладку внутрішню поверхню і обладнаний ручками для полегшення транспортування. Контейнер повинен бути виготовлений з металу достатньої товщини (мінімальна рекомендована товщина стінок – 3 мм) для забезпечення жорсткості стінок і дна в умовах дослідження. Розміри завантажувального бункера повинні бути такими: висота – 384 мм; внутрішній діаметр – 200 мм. Завантажувальний бункер необхідно встановити співвісно над направляючою телескопічною трубою діаметром 240 мм і заввишки 1600 мм та мірним контейнером. Конструкція завантажувального бункера повинна передбачати двостулкове дно на пружинах і фіксуючі його засувки. Лінійка –

залізна смуга завдовжки 800 мм, завширшки 40 мм і завтовшки 5 мм. Ваги платформні будь-якого типу з найбільшою межею зважування не менше 50 кг з похибкою зважування не більше 0,05 кг.



- 1 – опорні металеві стійкі; 2 – мірний контейнер;
 3 – завантажувальний бункер; 4,5 – напрямна телескопічна труба;
 6 – двостулкове дно завантажувального бункера; 7 – пружини;
 8 – засувка

Рис. 2.1. Апарат для визначення насипної щільності

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [16]

Відбір проб вугільних концентратів і вугільної шихти фактичної вологості та крупності проводиться відповідно до вимог чинних нормативних документів. Огляд стандартів (ДСТУ, ISO, ASTM D) щодо відбору проб та підготовки проб твердого палива докладно наведено у роботі [8].

Після усереднення та скорочення маса проби вугільного концентрату або шихти повинна бути не менше ніж 40 кг.

Проведення випробування здійснювали наступним чином. Висипали відібрану пробу вугільного концентрату або вугільної шихти на обробний стіл і усереднювали її перемішуванням на конус не менше трьох разів. Отриманий конус вугільної проби ділили секційним подільником (хрестовиною) на 4 рівні частини. Використовуючи залізний совок, випадково обрану одну четверту частину вугільної проби повністю засипали в завантажувальний бункер до утворення зверху його конуса з кутом природного укосу. Після відведення засувки чекали спорожнення завантажувального бункера і попадання вугільної проби в мірний контейнер. Надлишок вугілля в контейнері зрізали лінійкою по його краю. Мірний контейнер з вугільною пробою встановлювали на зважувальну платформу і зважували.

Випробування виконували за методикою вимірювання розробленою ДП «УХІН», непевність вимірювання u_c не більше ніж 1 % за довірчої імовірності $P = 0,95$ для всього діапазону вимірювань.

Оцінку придатності (валідації) цієї методики вимірювань було проведено в умовах виробництва на одному з коксохімічних підприємств під час перевірки оцінювання невизначеності вимірювання залишків сировини та продукції на складах.

Під час перевірки використовували засоби вимірювальної техніки: ваги торгові типу 6 ВП1-Т, найбільша межа зважування 6 кг, $\Delta = \pm 0,002$ кг; штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 та допоміжне обладнання: апарат для визначення насипної щільності шихти по методу Геккер-Мамута - за чинним НД, що

складається з: приймальника, завглибшки 150 мм, діаметр – 109 мм, об'єм – 0,0014 м³; бункера-циліндра; шиберу.

Невизначеність вимірювання насипної щільності складається зі стандартної невизначеності за типом А та невизначеності за типом В.

Результати розрахунку насипної щільності у апараті для визначення насипної щільності шихти по методу Геккер-Мамута та оцінювання стандартної невизначеності вимірювання за типом А наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

**Оцінювання стандартної невизначеності вимірювання за типом А
вимірювання насипної щільності сировини та продукції**

№ силосу	BD_i	$\overline{BD}$	$ (\Delta BD_i) $	$(\Delta BD)^2$	$\Sigma(\Delta BD_i)^2$	S	Sc
8 (Ж «Wellmore»)	827	825,000	2,000	4,000	78,000	6,244998	0,437037
	830		5,000	25,000			
	818		7,000	49,000			
20 (Г «Талтек»)	841	827,000	14,000	196,000	392,000	14,00000	0,977377
	827		0,000	0,000			
	813		14,000	196,000			
31 (Ж «Кузнецька»)	794	784,000	10,000	100,000	158,000	8,888194	0,654541
	781		3,000	9,000			
	777		7,000	49,000			

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [16]

де BD_i – насипна щільність вугільного концентрату, кг/м³;

$\overline{BD}$ - середнє арифметичне значення насипної щільності вугільного концентрату, кг/м³;

$|(\Delta h_i)|$ - абсолютне значення відхилення результату вимірювання від середнього арифметичного значення для серії з 3 вимірювань, кг/м³;

$(\Delta h_i)^2$ – квадрат відхилення результату вимірювання від середнього арифметичного значення для серії з $n = 3$ вимірювань, кг/м³;

$\Sigma(\Delta h_i)^2$ – сума квадратів абсолютного значення відхилення результату вимірювання від середнього арифметичного значення для серії з 3 вимірювань, кг/м³;

S - середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань в серії, кг/м³;

S_C - відносне середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного значення серії результатів вимірювань%.

Максимальне значення відносної стандартної невизначеності за типом А становить $u_A = 0,98 \%$

Визначення стандартної невизначеності за типом В

Невизначеність вимірювання насипної щільності сировини та продукції за типом В обумовлена:

- невизначеністю ваг торгових типу 6 ВП1-Т: $u_{ваг}$.
- невизначеністю штангенциркулю ШЦ-I-125-0,1 під час вимірювання глибини та діаметру приймального $u_{шт}$.

Сумарна невизначеність вимірювання за типом В $u_B = 0,26 \%$

Сумарну стандартну невизначеність вимірювання, за якої результат вимірювання знаходиться за довірчою ймовірністю $P = 0,95$ за попередньо отриманих значень невизначеності вимірювання за типом А та типом В становить 1 %. Отримані результати задовольняють нормованим в НД метрологічним характеристикам і метод може бути використаний для вимірювань насипної щільності.

У таблицях 2.2-2.4 наведено дані технічного, пластометричного, петрографічного та гранулометричного аналізів відібраних вугільних концентратів. Для визначення якісних характеристик використовували наступні стандартизовані методики:

- ISO 1171:2024 Solid mineral fuels. Methods for determination of ash [17];
- ISO 589:2008 Hard coal—Determination of total moisture [18];

- ISO 562:2024 Hard coal and coke — Determination of volatile matter [19];
- ISO 334:2020 Coal and Coke. Determination of Total Sulfur. Eschka Method [20];
- ISO 7404-3:2009 Methods for the petrographic analysis of coals Part 3: Method of determining maceral group composition [21];
- ISO 7404-5:2009 Methods for the petrographic analysis of coals Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite [22];
- ДСТУ 7722:2015 Вугілля кам'яне. Метод визначення пластометричних показників [23].

Крім того, у таблицях наведено дані щодо значень насипної щільності та окисленості.

Значення насипної щільності наведені для робочого (BD^r) та аналітичного (BD^a) стану:

$$BD^a = BD^r \frac{100 - W^a}{100 - W_t^r} \quad (2.1)$$

Визначення ступеня окисненості вугілля проводили методом ДСТУ 7611:2014 Вугілля кам'яне. Метод визначення окиснення та ступеня окиснення [24]. Визначення окиснення і ступеня окиснення ґрунтується на вимірюванні температур займання досліджуваного, відновленого та окисненого вугілля і їх порівнянні. У процесі випробування визначаються показники окиснення і ступеня окиснення. Окиснення вугілля (Δt) – різниця між температурою займання відновленого і досліджуваного вугілля – розраховують у градусах Цельсія за формулою (2.2):

$$\Delta t = t_{зв} - t_з, \quad (2.2)$$

де $t_{зв}$ – температура займання відновленого вугілля, °С;

$t_з$ – температура займання досліджуваного вугілля, °С.

На підставі отриманих результатів встановлюється окисненість вугілля за умовною шкалою:

- вугілля з показником ступеня окисненості Δt °C до 7 умовно приймається за неокиснене;

- при Δt °C від 7 до 12 вугілля злегка окиснене;

- при Δt °C від 12 до 25 вугілля окиснене;

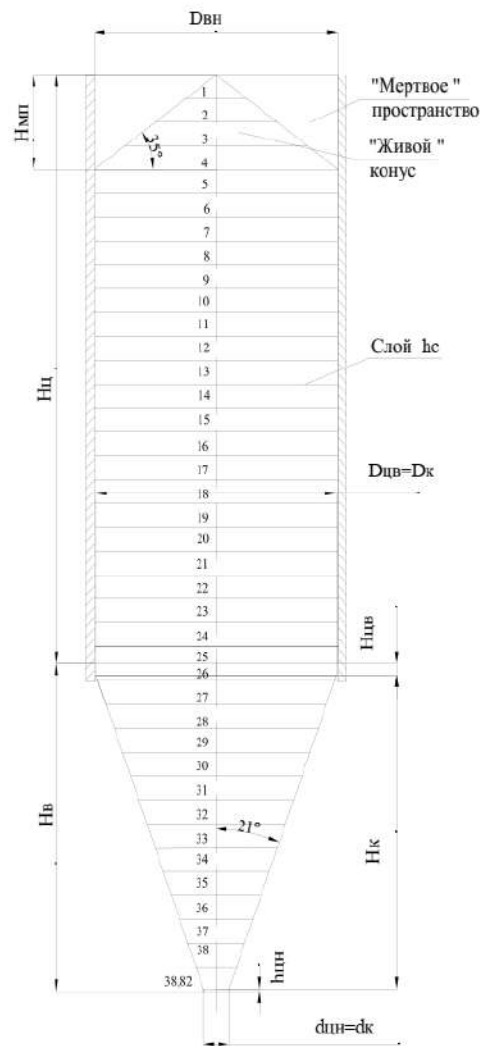
- при Δt °C вище 25 все спікливе вугілля повністю втрачає пластичний шар.

Крім того, для вугільних концентратів була визначена насипна щільність безпосередньо в силосі (рис.2.2).

Проведення прямих визначень насипної щільності вугільних концентратів проходило наступним чином: в опорожнений бункер закритого складу закачувався вугільний концентрат; проводилися виміри висоти вугілля в ньому в шести точках за допомогою шнура з вантажем (лота); за градувальною таблицею визначався об'єм, який займає в силосі цей концентрат. Одночасно з цим за вагами фірми «Шенк» визначалася маса закачуваного в силос вугілля.

Насипна щільність (BD^r) даного концентрату в силосі шляхом ділення його маси на займаний об'єм.

Необхідно відзначити, що в рамках дослідження передбачалося оцінити вплив рівня завантаження силосу вугільним концентратом на величину його насипної щільності. Для цього закачування силосу вугільним концентратом проводили в кілька прийомів: закачували 10 вагонів, потім ще 10, потім ще 10. На кожному етапі визначали насипну щільність закачуваного вугільного концентрату.



$D_{вн}$ – внутрішній діаметр; $H_{ц}$ – висота; $H_{мп}$ – висота циліндру «мертвого» простору; $D_{цв}=D_{к}$ – діаметр верхнього циліндру воронки, який дорівнює верхньому діаметру конусу; $d_{цн} = d_{к}$ – діаметр нижнього циліндру воронки, який дорівнює нижньому діаметру конусу; $H_{цв}$ – висота верхнього циліндру воронки; $H_{в}$ – висота воронки; $H_{к}$ – висота конусу воронки; $H_{цн}$ – висота нижнього циліндру воронки.

Рис 2.2. Схема силосу закритого вугільного склад

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [16]

Таблиця 2.2

Технологічні властивості вугільних концентратів

№ п/ч	Компонент вугільної шихти	Марка за ДСТУ 3472	Технічний аналіз, %					Пластометричні показники, мм		Окисненість, °C	Насипна щільність ¹ , кг/м ³	
			W ^г	W ^а	A ^д	S ^д _t	V ^{daf}	X	Y		BD ^г	BD ^а
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14
1	А	Ж	6,6	1,2	8,6	3,12	37,5	21	18	1,0	<u>875</u> -	<u>926</u> -
2	А	Ж	18,8	13,0	12,0	0,93	28,0	20	0	53,5	<u>975</u> -	<u>1045</u> -
3	А	Ж	10,1	1,0	7,8	1,74	32,6	1	27	1,0	<u>872</u> -	<u>960</u> -
4	А	Ж	12,2	5,7	4,4	0,84	34,0	41	0	21,0	<u>824</u> 964	<u>885</u> 1035
5	А	Ж	21,9	13,2	14,9	1,13	36,9	38	0	40,5	<u>910</u> 979	<u>1011</u> 1088

чисельнику значення насипної щільності, яка визначена в малому апараті, в знаменнику – в силосі

6	A	Ж	15,5	1,7	15,4	2,01	33,5	37	20	10,0	<u>870</u> 958	<u>1012</u> 1115
7	B	Ж	10,0	6,6	11,2	1,83	30,9	40	7	17,5	<u>894</u> 930	<u>928</u> 965
8	C	КЖ+К+КП	8,6	1,0	9,3	0,58	24,4	25	18	7,0	<u>844</u> 852	<u>914</u> 923
9	C	КЖ+К+КП	8,2	1,4	11,6	0,61	24,7	21	13	5,0	<u>870</u> -	<u>934</u> -
10	D	К	7,0	1,4	9,3	0,83	29,1	15	13	6,0	<u>862</u> 956	<u>914</u> 1014
11	D	К	8,7	1,5	8,3	0,80	28,7	17	13	7,0	<u>872</u> 951	<u>941</u> 1026
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14
12	D	К	7,6	1,5	8,7	0,73	28,8	13	11	5,0	<u>855</u> -	<u>912</u> -
13	F	К	23,3	11,4	11,6	0,71	30,4	27	0	54,0	<u>923</u> -	<u>1072</u> -

14	Е	К	11,7	1,1	9,5	0,60	22,6	30	12	4,0	<u>865</u> 892	<u>969</u> 999
15	Е	К	10,1	0,7	14,4	0,42	23,9	26	11	2,0	<u>831</u> -	<u>918</u> -
16	Н	К+КП+ПС	8,8	1,0	9,4	0,44	21,1	26	13	2,0	<u>855</u> -	<u>928</u> -

Таблиця 2.3

Петрографічні характеристики вугільних концентратів

№ п/ч	Компонент вугільної шихти	Марка за ДСТУ 3472-2015	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %					
									0,50 -	0,66 -	0,90 -	1,20	1,40	1,70
									0,65	0,89	1,19	1,39	1,69	2,59
									Марки вугілля, які умовно відповідають стадіям метаморфізму вітриніту					
			Vt	Sv	I	L	Σ FC	R _o	ДГ	Г	Ж	К	ПС	П/А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	А	Ж	91	-	6	3	6	0,88	3	56	41	-	-	-
2	А	Ж	94	-	6	-	6	1,47	-	3	18	22	34	23

3	A	Ж	92	-	6	2	6	1,04	-	1	99	-	-	-
4	A	Ж	89	-	8	3	8	0,80	2	92	6	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	A	Ж	91	-	6	3	6	1,43	6	24	27	-	-	43
6	A	Ж	91	-	7	2	7	0,97	-	23	72	5		-
7	B	Ж	92	-	6	2	6	1,25	4	31	31	-	4	28/2
8	C	КЖ+К+КП	71	-	26	3	26	1,13	-	-	75	18	7	-
9	C	КЖ+К+КП	74	-	25	1	25	1,16	-	1	72	21	6	-
10	D	К	83	1	13	3	14	1,06	-	3	87	10	-	-
11	D	К	86	1	11	2	12	1,09	-	-	89	11	-	-
12	D	К	74	-	25	1	25	1,16	-	1	72	21	6	-
13	F	К	94	-	9	-	9	1,55	-	4	16	12	22	46
14	E	К	39	1	60	-	61	1,13	-	2	75	23	-	-
15	E	К	48	1	51	-	52	1,15	-	-	70	28	1	1
16	H	К+КП+ПС	47	1	51	1	52	1,20	2	1	41	47	8	1

Таблиця 2.4

Гранулометричний склад вугільних концентратів

№ п/ч	Компонент вугільної шихти	Марка за ДСТУ 3472-2015	Гранулометричний склад (мм), %											Середній діаметр, мм
			+50	25-50	13-25	6-13	3-6	1-3	0,5-1	0,2-0,05	0,07-0,02	-0,07	0-3	d _s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	A	Ж	1,1	7,8	12,3	15,6	15,9	21,4	7,8	11,4	5,6	1,1	47,3	8,83
2	A	Ж	-	4,0	5,8	12,8	17,6	25,0	7,3	13,9	9,1	4,5	59,8	5,24
3	A	Ж	-	1,1	1,1	5,1	10,7	28,6	15,7	21,9	13,5	2,3	82,0	2,39
4	A	Ж	2,4	16,7	18,1	22,0	14,6	11,9	3,6	5,6	3,9	1,2	26,2	14,54
5	A	Ж	8,9	10,7	14,9	13,1	16,4	5,6	11,6	11,6	6,0	1,2	36,0	15,76
6	A	Ж	-	1,0	2,0	3,4	3,7	9,9	13,3	52,1	11,9	2,7	89,9	1,76
7	B	Ж	-	0,9	3,4	11,7	16,9	24,6	10,5	18,8	11,4	1,8	67,1	3,53
8	C	КЖ+ К+КП	1,5	4,6	7,0	11,6	14,3	22,0	9,7	15,8	12,7	0,8	61,0	6,53
9	C	К	-	2,2	10,5	19,8	15,4	21,6	8,3	14,1	6,5	1,6	52,1	5,96
10	D	К	-	4,7	9,4	17,4	15,4	19,7	7,0	13,7	10,7	2,0	53,1	6,42
11	2	К	0,6	7,7	16,2	24,0	14,0	11,6	5,2	10,7	9,4	0,6	37,5	9,66
12	D	К	1,7	2,7	6,4	14,5	17,7	26,3	9,6	16,2	4,4	0,5	57,0	6,34
13	D	К	1,3	2,5	5,4	14,0	19,4	23,4	8,3	12,1	9,0	4,6	57,4	5,74
14	F	К	0,0	6,3	10,2	14,9	11,4	16,1	6,6	15,6	16,9	2,0	57,2	6,70
15	E	К	-	2,4	4,1	10,1	11,4	22,6	9,0	19,1	18,0	3,3	72,0	3,79
16	E	К+КП +ПС	-	4,7	6,9	12,9	12,1	19,2	8,0	16,8	14,5	4,9	63,4	5,39

2.1.2 Результати дослідження якості вугільних концентратів

У таблиці 2.5 наведено середні значення та інтервал варіювання значень показників якості вугільних концентратів. Так, загальна волога змінювалася від 6,6 до 23,3 %, волога аналітичної проби від 0,7 до 13,2 % , зольність від 4,4 до 15,4 %, середній діаметр від 1,76 до 15,76 мм. У світлі того факту, що ці показники загальновизнано є найбільш впливовими на насипну щільність вугілля, можна припустити, що такий широкий інтервал їх варіювання сприятливо позначиться на достовірності математичних моделей, які розроблені.

Вміст загальної сірки, вихід летких речовин, товщина пластичного шару, показник відбиття вітриніту, сума опіснюючих компонентів і ступінь окисненості також досить різко змінюються.

Мінімальні та максимальні значення насипних щільностей вугільних концентратів, визначених як у малому апараті, так і в силосах, відрізняються в середньому на 20 %.

Виходячи з викладеного, можна зробити основний висновок, що в результаті досліджень отримано значення прямих визначень насипної щільності вугільних компонентів, що входять до сировинної бази коксохімічного підприємства. Отриманих даних достатньо, щоб на підставі результатів визначення вологості, зольності, гранулометричного складу і насипної щільності в малому апараті розробити математичні рівняння впливу різних факторів на насипну щільність.

В цілому, можна констатувати, що якість досліджених вугільних концентратів варіюється в широких межах, внаслідок чого, зазначена вибірка може бути піддана математичній обробці з розробкою адекватних прогнозуючих рівнянь.

Таблиця 2.5

Середні значення та інтервал показників якості вугільних концентратів

Показник	Символ, од. вимірювання	Значення		
		максимальне	мінімальне	інтервал
1. Загальна вологість	$W^t, \%$	23,3	6,6	16,7
2. Волога аналітичної проби	$W^a, \%$	13,2	0,7	12,5
3. Зольність	$A^d, \%$	15,4	4,4	11,0
4. Загальна сірка	$S^d_t, \%$	3,12	0,42	2,70
5. Вихід летких речовин	$V^{daf}, \%$	37,5	21,1	16,4
6. Товщина пластичного шару	$Y, \text{мм}$	27	0	27
7. Середній показник відбиття вітриніту	$\bar{R}_r$	1,55	0,80	0,75
8. Сума опіснюючих компонентів	$\sum FC$	61	6	55
9. Окисненість	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	54,0	1,0	53,0
10. Середній діаметр	$d_s, \text{мм}$	15,76	1,76	14,0
11. Насипна щільність в	$(BD)^r_M$	975	824	151

малому апараті на робочий стан				
12. Насипна щільність в малому апараті на аналітичний стан	$(BD)^a_M$	1072	885	187
13. Насипна щільність в силосі на робочий стан	$(BD)^r_C$	979	852	127
14 Насипна щільність в силосі на аналітичний стан	$(BD)^a_C$	1115	923	192

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [16]

2.2 Математичний аналіз досліджених взаємозв'язків якості вугільних концентратів та їх насипної щільності

Математичний аналіз проводився за допомогою програмного забезпечення MathCad 2000 PROFESSIONAL (c) Mathsoft.

Коефіцієнти парної кореляції досліджених взаємозв'язків наведені в таблиці 2.6. Виходячи з наведених у таблиці даних, можна зробити висновок, що найбільш тісно з насипною щільністю (BD^r , BD^a) корелюють наступні показники якості вугілля:

- робоча волога ($r=0,666$ і $0,874$);
- волога аналітичної проби ($r=0,783$ і $0,687$).

Величини зольності ($r = 0,384$ і $0,559$) і середнього діаметра ($r = 0,263$ і $-0,133$) менш тісно пов'язані з насипною щільністю вугілля.

З огляду на те, що показники робочої та аналітичної вологості найбільш сильно впливають на насипну щільність вугілля, математичні рівняння розроблялися на їх основі. Наступним кроком було додавання до рівняння додаткових параметрів, а саме – зольності та величини середнього діаметра проби.

Розроблені рівняння наведені в таблиці 2.7. Крім рівнянь, в таблиці наведені також статистичні оцінки розроблених моделей:

R - коефіцієнт множинної кореляції;

D – коефіцієнт детермінації, $100 \cdot R^2$, %;

σ – стандартне відхилення;

μ - стандартна похибка.

Коефіцієнт множинної кореляції рівнянь (2.2 – 2.9) становить $0,657 - 0,783$, детермінації $43,2 - 61,3$ %, стандартне відхилення $30,3 - 32,2$, а стандартна похибка $23,8 - 28,6$ кг/м³. З огляду на те, що середнє значення насипної щільності при її визначенні в малому апараті дорівнює 875 кг/м³, похибка при її розрахунковому визначенні може становити $2,7 - 3,3$ % відн.

При додаванні до рівняння додаткових факторів, статистичні оцінки опису насипної щільності вугілля дещо поліпшуються. Найбільш точно описує експериментальні дані рівняння 2.7, в якому в якості прогнозуючих параметрів обрані аналітична волога, зольність і середній діаметр. Коефіцієнт множинної кореляції рівняння (2.7) становить $0,807$, детермінації $65,2$ %, стандартне відхилення $33,1$, а стандартна помилка $20,7$ кг/м³ ($2,4$ % відн).

Таблиця 2.6

Коефіцієнти парної кореляції (r) досліджених взаємозв'язків

-	W_t^i	W^a	A^d	S_t^d	V^{daf}	Y	R_0	ΣFC	Δt	d_s	BD^f	BD^a
W_t^i	-	0,864	0,497	-0,080	0,302	-0,626	0,691	-0,266	0,893	0,206	0,666	0,874
W^a	0,864	-	0,317	-0,029	0,375	-0,811	0,724	-0,442	0,966	0,364	0,783	0,687
A^d	0,497	0,317	-	0,023	0,000	-0,120	0,530	0,068	0,301	-0,275	0,384	0,559
S_t^d	-0,080	-0,029	0,023	-	0,736	0,351	-0,350	-0,537	-0,110	-0,089	0,158	0,058
V^{daf}	0,302	0,375	0,000	0,736	-	-0,101	-0,188	-0,816	0,283	0,395	0,221	0,188
Y	-0,626	-0,811	-0,120	0,351	-0,101	-	-0,547	0,136	-0,791	-0,531	-0,437	-0,330
R_0	0,691	0,724	0,530	-0,350	-0,188	-0,547	-	-0,015	0,742	-0,068	0,753	0,717
ΣFC	-0,266	-0,442	0,068	-0,537	-0,816	0,136	-0,015	-	-0,416	-0,190	-0,415	-0,238
Δt	0,893	0,966	0,301	-0,110	0,283	-0,791	0,742	-0,416	-	0,263	0,792	0,763
d_s	0,206	0,364	-0,275	-0,089	0,395	-0,531	-0,068	-0,190	-0,312	-	0,263	-0,133
BD^f	0,666	0,783	0,384	0,158	0,221	-0,437	0,753	-0,415	0,792	-0,312	-	0,815
BD^a	0,874	0,687	0,559	0,058	0,188	-0,330	0,717	-0,238	0,763	-0,133	0,815	-

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Таблиця 2.7

**Математичні моделі для прогнозування насипної щільності
вугільних концентратів**

№ моделі	Вид моделі	Статистичні оцінки			
		R	D, %	σ	μ
2.2	$BD^f = 821,477 + 4,689W_t^r$	0,657	43,2	30,3	28,6
2.3	$BD^f = 849,795 + 6,314W^a$	0,783	61,3	32,2	23,8
2.4	$BD^f = 813,038 + 4,438W_t^r + 0,897A^d$	0,669	44,8	30,5	28,5
2.5	$BD^f = 831,146 + 5,927W^a + 1,940A^d$	0,796	63,3	32,4	23,2
2.6	$BD^f = 834,134 + 5,156W_t^r - 0,546A^d - 2,149d_s$	0,697	48,6	30,9	27,4
2.7	$BD^f = 875,142 + 7,594W^a - 0,350A^d - 3,945d_s$	0,807	65,2	33,1	20,7
2.8	$BD^f_c = 494,551 + 0,508BD^f$	0,318	10,1	30,6	43,7
2.9	$BD^a_c = 178,308 + 0,890BD^a$	0,670	44,9	50,9	49,6

Примітка. Джерело: Розроблено автором

В цілому отримані результати узгоджуються з даними робіт [8-13, 15, 16]. Так, дані, наведені в цих джерелах, показують, що при загальній вологості вугілля 1 % його насипна густина різного ситового складу росте і має максимум при вмісті класу 3 - 0 мм від 75 до 80 %. При вологості 2 % характер кривої той самий, але максимум виражений менш різко і знаходиться в області вмісту класу 3-0 мм близько 90 %. Збільшення вологості з 4 до 8 % викликає зменшення величини насипної щільності вугільної шихти при будь-якому вмісті класу 3-0 мм, що підкреслює найбільший вплив вологості шихти на її

насипну щільність. У цих роботах також наведено графіки залежності насипної щільності вугілля від вологості для вузьких класів його ситового складу. Найнижчу насипну щільність має фракція 0 - 0,5 мм при вологості 10 - 14 %. При збільшенні ступеня подрібнення вугілля і шихт найбільш швидко зростає вміст класу <0,5 мм, що призводить до погіршення спікливості навіть коксівного вугілля. В роботах [2,8,15,16] вказується, що оптимальним вмістом вугільних зерен крупністю < 0,5 мм в шихті є $\approx 35 \%$.

При зволоженні вугілля вода, адсорбуючись його частинками, рівномірно розподіляється по їх поверхні, збільшуючи відстань між частинками вугілля на товщину плівки води, змінюючи насипну щільність вугілля.

Подальше зволоження шихти до значень, що відповідають мінімуму на параболі, призводить до більш різкого зменшення її насипної щільності. Це пояснюється тим, що вільна вода в шихті під дією капілярних сил прагне зайняти обсяг з мінімальною поверхнею і зосередитися в найбільш вузьких проміжках між частинками вугілля, переважно в точках контакту частинок. Поверхневий натяг води, що знаходиться навколо цих точок, є силою, яка прагне втримати частинки одну біля одної, не даючи їм вільно переміщатися і укладатися більш щільно при завантаженні в коксову камеру. Це явище спостерігається при збільшенні вмісту води до 6-10 %.

Подальше збільшення вмісту води призводить до того, що капілярні сили вже не можуть утримати вологу в точках контакту і вода, під дією сил тяжіння, буде відриватися від менісків і переміщатися в порожні проміжки. З цього моменту насипна щільність шихти зростає за рахунок збільшення маси води.

Вологість шихти має також значний вплив на величину тиску розпирання і на величину усадки коксового пирога. Кінцева усадка коксового пирога під час коксування шихти з вологістю 8,1 - 14,5 % дорівнює 230-165 % в порівнянні з усадкою при вологості шихти 3,8 %.

Зі збільшенням зольності вугільної шихти її насипна щільність зростає за рахунок того, що дійсна густина мінеральної частини вугілля значно вище дійсної густини його органічної маси. Так, дійсна густина органічної маси вугілля Донецького басейну змінюється в діапазоні від 1160 до 1390 кг/м³ в залежності від ступеню метаморфізму, дійсна густина мінеральної частини вугілля > 1800 кг/м³ [11].

Також необхідно враховувати, що мінеральні включення є центрами внутрішніх напружень, тобто послаблюють структуру коксу, знижуючи його міцність.

Аналізуючи наведені дані, можна констатувати, що найсильніший вплив на насипну щільність вугілля має вміст робочої та аналітичної вологи, високі величини яких у деяких випадках є наслідком окисненості вугілля.

Що стосується визначення насипної щільності в силосі, то в першому наближенні її можна оцінити за рівняннями 2.8 і 2.9, в яких в якості прогнозуючих параметрів виступають аналогічні величини насипної щільності, отримані в малому апараті.

В цілому, за підсумками даного дослідження можна зробити висновок, що розроблені математичні рівняння можна рекомендувати для приблизних оцінок насипної щільності вугільних концентратів в силосах. Також треба враховувати, що окиснене вугілля, яке надходить на коксохімічне підприємство та є складовою частиною сировинної бази коксування, характеризується екстремально високими значеннями насипної щільності. При зміні насипної щільності завантаженого до силосу ($V=2700$ м³) вугілля від 0,75 до 0,98 т/м³ його маса збільшується від 2025 до 2646 т або на 30,7 %. Це може призводити до руйнування силосів закритого складу вугілля і бункерів дозувального відділення.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто основні аспекти технології підготовки вугілля до коксування. На підставі літературного огляду джерел зазначено, що комплексним показником ефективності процесу підготовки вугільних шихт при класичній технології шарового коксування є насипна щільність вугільної шихти.

З аналізу факторів на величину насипної щільності вугільної шихти впливає, що зі зменшенням насипної щільності вугільної шихти знижується міцність коксу та зростає його стиранність, що збільшує питомі витрати коксу та значно ускладнює роботу доменних печей.

Встановлено, що вологість вугільної шихти є одним із визначальних факторів, які впливають на величину тиску розпирання та усадку коксового пирога в процесі коксування. Показано, що зі збільшенням вологості шихти від 8,1 до 14,5 % кінцева усадка коксового пирога зменшується до 165–230 % відносно усадки при вологості 3,8 %, що свідчить про суттєву зміну умов формування коксового масиву та перебігу пластичного стану вугілля. Отримані результати підтверджують необхідність жорсткого контролю вологості шихти для забезпечення стабільності технологічного процесу та прогнозованої якості коксу.

Доведено, що збільшення зольності вугільної шихти супроводжується підвищенням її насипної щільності, що обумовлено значно вищою дійсною густиною мінеральної частини порівняно з органічною масою вугілля. При цьому мінеральні включення виступають концентраторами внутрішніх напружень у структурі коксу, що негативно впливає на його механічну міцність та сприяє підвищенню стиранності. Таким чином, зольність шихти має комплексний вплив як на технологічні параметри коксування, так і на структурно-механічні властивості готового коксу.

Аналіз досліджуваних факторів показав, що найбільш істотний вплив на величину насипної щільності вугілля мають робоча та аналітична волога. Високі значення цих показників у ряді випадків пов'язані з окисненістю вугілля, яка суттєво змінює його фізико-механічні характеристики. Встановлено, що окиснене вугілля характеризується аномально високими значеннями насипної щільності, що необхідно враховувати при формуванні сировинної бази коксування та експлуатації обладнання вуглепідготовчих цехів.

За результатами досліджень підтверджено можливість використання розроблених математичних рівнянь для прогнозової оцінки насипної щільності вугільних концентратів у силосах на основі даних, отриманих у лабораторних умовах на малому апараті. Запропоновані залежності можуть бути рекомендовані для інженерних розрахунків та оперативного прогнозування зміни параметрів завантаження вугільних силосів.

Встановлено, що зі збільшенням насипної щільності вугілля, завантаженого до силосу об'ємом 2700 м³, від 0,75 до 0,98 т/м³ маса завантаження зростає від 2025 до 2646 т, тобто на 30,7 %. Таке підвищення навантаження може створювати небезпеку перевищення допустимих механічних навантажень на конструкції силосів закритого складу та бункерів дозувального відділення, що вимагає врахування фізичних властивостей вугілля при проектуванні та експлуатації обладнання.

Узагальнення отриманих результатів показало, що насипна щільність вугільної шихти є одним із ключових параметрів, які визначають якість доменного коксу. Зниження насипної щільності призводить до погіршення міцності коксу та підвищення його стираності, що, у свою чергу, спричиняє збільшення питомих витрат коксу і негативно впливає на стабільність роботи доменних печей. Отже, регулювання насипної щільності шихти, її вологості та зольності є важливою умовою підвищення ефективності процесу коксування та забезпечення високих експлуатаційних характеристик коксу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мірошніченко Д.В., Кафтан Ю.С., Ладжінський В.М., Бесчастний Ю.В. Удосконалення схеми підготовки вугільної шихти на ВАТ «Запоріжжкокс». Вуглехімічний журнал. 2009. №1-2. С.37-47.
2. Діденко В.Є. Технологія приготування шихт для коксування. К.: Вища школа. 1989. 288 с. Choudhury S.B. Solvent-refined coal from high-ash non-coking coals and washery middlings for use in metallurgical coke making Part 1. Production, testing and characterisation // S.B. Choudhury, B.B. Brahmachari, S.R. Dwivedi, A.K. Roy, P.K. Dasgupta, M. Chakraborty, R. Haque // *Fuel Processing Technology*. 1996. vol.4.7 P.203-213. DOI:10.1016/0378-3820(96)01010-7.
3. Zubkova V. Investigation of influence of the additives of expired paracetamol (PR) and naproxen (NP) on the changes in volume of heated charge of a higher rank coal / V. Zubkova, A. Strojwas, M. Kaniewski, S. Ziomber // *Fuel*. 2018. vol.21(7). P.605–616. DOI:10.1016/j.fuel.2020.117752.
4. Kuyumcu, HZ; Sander, S. Stamped and pressed coal cakes for carbonisation in by-product and heat-recovery coke ovens. *Fuel*, 2014, 121:48–56. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.028>.
5. Nomura S. Recent developments in cokemaking technologies in Japan / S. Nomura // *Fuel Processing Technology*. 2017. vol.159. P.1–8. DOI:10.1016/j.fuproc.2017.01.016.
6. Медянцев С.А. Вдосконалення технологічної схеми підготовки вугільної шихти до коксування на ВАТ «Ясинівський КХЗ» / С.А. Медянцев, І.Є. Полуєтков, В.М. Дудяк, В.В. Казаков, І.Д. Дроздник, Д.В. Мірошніченко, Ю.В. Бесчастний // *Вуглехімічний журнал*. 2001. №1-2. С.12-17.

7. Дроздник І.Д. Деякі аспекти підготовки вугілля до коксування. / І.Д. Дроздник, А.Г. Дюканов, Ю.В. Бесчастний [та ін.] // *Вуглехімічний журнал*. 2007. № 3-4. С. 13-20.
8. Lyalyuk, V.P., Kassim, D.A., Shmeltser, E.O., Lyakhova, I.A. Improving the technology of preparing coal for the production of blast-furnace coke under the conditions of multi-basin rawmaterial base. Message 3. Influence of the moisture content of coal batch on the physicommechanical characteristics of the coke. *Petroleum and coal*. 2019. Vol. 61(2). P. 433-441.
9. Рищенко А.І., Шульга І.В. Фактори, які впливають на формування властивостей доменного коксу. *Вуглехімічний журнал*. 2009. № 3-4. С.56-54.
10. Довідник коксохіміка. В 6-ти томах. Том 1. Вугілля для коксування. Збагачення вугілля. Підготовка вугілля до коксування. / Під заг. ред. Л.М. Борисова, Ю.Г. Шаповалова. – Х.: Видавничий Дім “Інжек”, 2010. – 536 с.
11. Bratychak M.M., Pyshyev S.V., Rudkevych M.I. Chemistry and coal processing technology, Beskid Bit, Lviv, Ukraine, 2006.
12. Shmeltser E.O. Influence of the degree of mixing on the quality of preparation of coal batches / E.O. Shmeltser, M.V. Kormer, E.V. Chuprinov, D.V. Miroshnichenko // *Petroleum and coal*. 2023. vol.65(2). P. 525–532.
13. Васильєв Ю.С. Про вплив якості коксу отриманого з термічнопідготовлених шихт, які містять слабоспільне вугілля, на ефективність доменного процесу з використанням ПВП / Ю.С. Васильєв, А.І. Гордієнко, Г.В. Долгарев, Є.А. Юшков, В.М. Дудяк // *Вуглехімічний журнал*. 2008. №5-6. С.38-40.
14. Vega M. F. Influence of the Heating Rate on the Quality of Metallurgical Coke / María F. Vega, Elvira Díaz-Faes, Carmen Barriocanal // *ACS Omega*. 2021. vol.6. P.34615-34623. DOI:10.1021/acsomega.1c05007.

15. 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 rawmaterial base. Message 3. Influence of the moisture content of coal batch on the physicommechanical characteristics of the coke. *Petroleum and coal*. 2019. Vol. 61(2). P. 433-441.
16. Miroshnichenko D.V., Shmeltser K.O., Kormer M.V., Mykhailova I.G., Zelenska N.M. Mathematical analysis of the influence of technological parameters of the quality of coal concentrates on their bulk density. *CTAS*. 2026; Volume 9, Number 9: 70-85. <https://doi.org/10.23939/ctas2026.01.070>
17. ISO 589:2008 Hard coal—Determination of total moisture. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland; 2008.
18. ISO 1171:2024 Solid mineral fuels. Methods for determination of ash. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland; 2024.
19. ISO 562:2024; Hard coal and coke — Determination of volatile matter. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2024.
20. ISO 334:2020; Coal and Coke. Determination of Total Sulfur. Eschka Method. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2020.
21. ISO 7404-3:2009 Methods for the petrographic analysis of coals. Part 3: Method of determining maceral group composition. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2009.
22. ISO 7404-5:2009 Methods for the petrographic analysis of coals Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2009.
23. ДСТУ 7722:2015 Вугілля кам'яне. Метод визначення пластометричних показників. – Київ:ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 21 с.
24. ДСТУ 7611:2014 Вугілля кам'яне. Метод визначення окиснення та ступеня окиснення. – Київ:ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 11 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

161-8д-д

Автор

161-8д-д

Науковий керівник / Експерт

Шмельцер К.О.

ІД документу

334137372

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

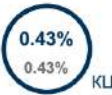
Обсяг знайдених подібностей

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.



6239

Кількість слів



48096

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 наивмисний 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		11
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		74

Джерела

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

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	--	--

Д О В І Д К А

про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):

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

*Розробка математичних залежностей прогнозування насипної густини
з урахуванням характеристик вугільної сировини*

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

ЗУБОК Владислава Олексіївна

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії,

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 57 сторінок друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 19,3 %.

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадиння із:

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

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

на засіданні кафедри Хімічних технологій та інженерії
(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

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

Керівник підрозділу _____

(підпис)

К. Шмельцер

Дата «12» червня 2026 р.

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

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

бакалавра

Здобувача Зубок Владислави Олексіївни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-23-ск

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра

Розробка математичних залежностей прогнозування насипної густини з
урахуванням характеристик вугільної сировини

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	_____ ;
таблиць	_____ ;
схем і рисунків	_____ ;
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	_____ .

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи _____ бакалавра

Кваліфікаційна робота присвячена прогнозування насипної щільності вугільних шихт, яка безпосередньо впливає на ефективність процесу коксування та якість доменного коксу. Отримані результати можуть бути використані для оперативної оцінки властивостей вугільної сировини та оптимізації режимів підготовки шихти в умовах діючих коксохімічних підприємств. У роботі досліджено вплив основних характеристик вугільної сировини - вологості, зольності, ступеня помелу та окисненості - на величину насипної щільності шихти. Встановлено закономірності впливу окремих параметрів підготовки шихти на насипну щільність та показники якості коксу, що дозволило сформулювати цілісне уявлення про взаємозв'язок між характеристиками сировини та технологічними показниками процесу.

Недоліки кваліфікаційної роботи бакалавра
(бакалавра, магістра)

Недостатньо повно розглянуто вплив петрографічних характеристик вугілля на насипну щільність, хоча вони також можуть суттєво впливати на процес підготовки шихти. 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

Здобувач Зубок В.О. під час написання кваліфікаційної роботи бакалавра показала добру загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працювала самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної роботи бакалавра

Кваліфікаційна робота виконана на актуальну тему, характеризується практичною спрямованістю, містить обґрунтовані технологічні рішення та має наукову і прикладну цінність.

Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавра добре/78/С

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

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

(підпис)

« 12 » червня 2026 р.

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

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА
про підготовку здобувача

Зубок Владислава Олексіївна
(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 Розробка математичних залежностей
прогнозування насипної густини з
урахуванням характеристик вугільної
сировини

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 консультанта	Примітка
1	Аналітична частина	Шмельцер К.О.	зараховано			
2	Основна частина	Шмельцер К.О.	зараховано			

Зав. кафедри

(підпис)

К.О. Шмельцер
(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

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

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

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

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

12.06.2026