

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Панченко Володимира Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему	<u>Впровадження технології брикетування без зв'язуючого</u> <u>для підвищення насипної густини в камері коксування</u>
	<i>(повна назва теми)</i>

за матеріалами	<u>Техніко – економічні показники роботи КХВ ПАТ</u> <u>«АМКР»</u>
	<i>(повна назва бази дослідження)</i>

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

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 20__р. № ____

Завідувач кафедри _____

(підпис)

Наук. ступень, вчене звання Ініціали, прізвище

Кривий Ріг – 2026

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Хімічних технологій та інженерії

(підпис) доцент, к.т.н.
Шмельцер К.О.
(посада, вчене звання ,
прізвище, ініціали)
« ____ » _____ 20 ____ року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Панченко Володимира Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Впровадження технології брикетування без зв'язуючого для підвищення насипної густини в камері коксування

керівник кваліфікаційної роботи бакалавра Десна Наталя Анатоліївна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу №228-ст від «6» квітня 2026 р.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2024

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

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

4.1 Аналітична частина: Формування фізико-механічних властивостей коксу: якісні показники коксу в сучасних умовах та їх вплив на техніко-економічні показники доменної плавки. Сучасні методи підвищення насипної густини шихти. Основоположення методів брикетування матеріалів. Аналіз існуючих технологічних схем брикетування. Огляд міжнародної практики та дослідів.

4.2 Основна частина: Обґрунтування впровадження технології беззв'язуючого брикетування на виробництво. Фізико-хімічні властивості беззв'язуючого брикетування. Технологічна схема беззв'язуючого брикетування. Оцінка на процес коксування і якість коксу. Охорона праці та захист навколишнього середовища

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

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання «6» квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач

(підпис)

Панченко В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Десна Н.А.

(прізвище та ініціали)

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

[illegible]

АНОТАЦІЯ

Панченко В.С. Впровадження технології брикетування без зв'язуючого для підвищення насипної густини в камері коксування.

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

Кваліфікаційна робота присвячена технології брикетування, а також можливості брикетування без зв'язуючим методом для підвищення насипної густини в камері коксування.

У роботі проаналізовано різні методики можливого ущільнення вугільної шихти та обґрунтування доцільності впровадження без зв'язуючого брикетування(термічної пластифікації).

Показано, що використання природних термопластичних властивостей вугілля дозволяє повністю відмовитися від токсичних і дорогих зв'язуючих, що суттєво знижує собівартність продукції та покращує екологічну безпеку виробництва.

Встановлено, що пресування вугільної маси під високим тиском після контрольованого нагрівання ефективно компенсує дефіцит рідкої фази. Це дає змогу залучати до виробництва дешевше слабоспікливе вугілля та промислові відходи(антрацитові штиби, шлами).

При цьому застосування без зв'язуючих брикетів суттєво покращує експлуатаційні показники металургійного коксу: підвищується механічна та гаряча міцність, знижується стиранність і реакційна здатність. Значна об'ємна усадка таких брикетів під час карбонізації ефективно компенсує тиск розпирання, гарантуючи збереження цілісності кладки коксових батарей.

Ключові слова: брикетування, насипна густина, вугільна шихта, без зв'язуюче брикетування.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Формування фізико-механічних властивостей коксу: якісні показники коксу в сучасних умовах та їх вплив на техніко-економічні показники доменної плавки	9
1.2 Сучасні методи підвищення насипної густини шихти	16
1.3 Основоположення методів брикетування матеріалів	20
1.4 Аналіз існуючих технологічних схем брикетування	23
1.5 Огляд міжнародної практики та дослідів	31
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	43
2.1 Обґрунтування впровадження технології беззв'язуючого брикетування на виробництво. Фізико-хімічні властивості беззв'язуючого брикетування	43
2.2 Технологічна схема беззв'язуючого брикетування	46
2.3 Оцінка на процес коксування і якість коксу	48
2.4 Охорона праці та захист навколишнього середовища	55
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61

ВСТУП

Інтерес до ефективного використання горючого палива у світовому масштабі залишається стабільно високим. Незважаючи на активний розвиток альтернативних джерел енергії та освоєння нових сировинних баз паливно-енергетичних ресурсів. Це зумовлено сукупністю взаємопов'язаних економічних, технологічних та екологічних факторів. Які формують сучасні вимоги до енергоефективності виробничих процесів.

Саме історично, підвищення ефективності використання палива набувало особливої актуальності в періоди паливно-енергетичних криз, коли виникали необхідність перегляду існуючих технологічних рішень у паливно-енергетичному комплексі.

У такі періоди відбувалося формування нових підходів до підготовки, транспортування та використання палива, спрямованих на зменшення втрат енергоносіїв, підвищення коефіцієнту корисної дії та оптимізацією технологічних режимів.

Коксохімічне виробництво є одним з ключових споживачів енергетичних ресурсів, а саме вугілля. Тому питання раціонального використання набуває принципового значення.

Ефективність процесу коксування значною мірою визначається якістю вугільної шихти, її гранулометричним складом, фізико-хімічними показниками вихідного вугілля. У зв'язку з цим важливою складовою є оцінка характеристика вугілля різних марок, що видобуваються в різних вугільних басейнах, оскільки їх властивості можуть суттєво відрізнятися від умов походження.

Стан вугільної промисловості України свідчить про суттєве скорочення сировинної бази під впливом економічних та геополітичних факторів. Існуючі родовища, характеризуються поступовим виснаженням запасів, що потребує імпортування вугілля. У таких умовах, особливої актуальності все ж і набуває

розробка технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності використання наявної сировинної бази та імпортного вугілля.

Одним із перспективних напрямів удосконалення підготовки вугільної шихти є впровадження технології брикетування. Даний процес полягає у формуванні ущільнених структурованих агломератів із дрібнодисперсних фракцій вугілля, що дозволяє покращити гранулометричний склад шихти та підвищити її однорідність.

Залежно від технологічних умов виробництва можуть застосовувати різні методи брикетування, включаючи технології як із використанням зв'язуючих компонентів, так і без них.

В умовах обмеженості сировинної бази, необхідності підвищення енергоефективності та вимог до збільшення насипної густини шихти в камері коксування, технологія брикетування вугільної сировини розглядається все ж, як один із перспективних напрямів розвитку коксохімічного виробництва.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Формування фізико-механічних властивостей коксу: якісні показники коксу в сучасних умовах та їх вплив на техніко-економічні показники доменної плавки

Формування шихти виступає важливою технологічною задачею на коксохімічному виробництві, а саме в вуглепідготовочому цеху.

Шихтою називають суміш вугілля різних марок, взятих в потрібній пропорції, для отримання коксу потрібної якості. В задачу цього цеху входить не тільки зберігання і можливе транспортування, а також дозування за допомогою сучасного обладнання. Марки вугілля класифікують згідно ДСТУ 3472:2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація».[1]

Потреба в цих діях, пов'язана з дефіцитом коксівного вугілля і можливим впливом на доменній плавці на пряму. Основними фізико-хімічними показниками: зольність, вихід летких речовин, вологість, вміст сірки, теплова здатність, розмір зерен, ступінь метаморфізму. Саме ці показники класифікують якість.

Для роботи коксохімічного виробництва, використовують спеціальні марки кам'яного вугілля, головною технологічною характеристикою якого є здатність переходити у пластичний стан при нагріванні без доступу до повітря та спікатися. Для отримання високоякісного металургійного коксу на практиці майже не використовують одну марку вугілля, формуючи натомість багатокомпонентну коксову шихту.

До її складу залучають взаємодоповнюючі марки, кожна з яких виконує свою специфічну функцію в процесі коксоутворення. Газове вугілля (Г) забезпечує високий вихід летких речовин і полегшує усадку коксового масиву, тоді як жирне (Ж) виступає головним пластифікатором, гарантуючи надійне злипання всіх можливих компонентів суміші завдяки максимальній товщині

пластичного шару. При цьому, піснувато-спікливе (ПС) та пісне (П) вугілля використовують як опіснювальні добавки для зменшення тріщинуватості, збільшення розміру шматків та підвищення загальної структури міцності готового продукту.

При цьому основною маркою є коксівна марка вугілля, оскільки: низький вміст сірки та фосфору, висока механічна міцність та густина, ідеальне джерело енергії порівняно з жирним і газовим вугіллям[1].(Таблиця 1.1)

Таблиця 1.1

Функціональна роль вугільних компонентів котрі найчастіше використовують

Марка вугілля	Основні функції в шихті	Технологічна особливість
Газове (Г)	Забезпечення усадки	Полегшує видачу коксового пирога
Жирне (Ж)	Формування щільності	Забезпечує міцність, але надлишок веде до тріщин
Коксівне (К)	Стабілізація структури	Забезпечує однорідність та грудчастість
Піснувате (ПС)	Спіснення	Знижує тріщинуватість, підвищує крупність
Пісне(П)	Регулювання	Додається обмежено (до 5-6%), тонке подрібнення

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Емпірично встановлено, що максимально можливе зниження вмісту в шихті спіклого вугілля, а саме без погіршення кінцевого продукту, складає лише 3-4%. При цьому ефективність шихтування безпосередньо залежить від балансу властивостей різних марок вугілля, де кожен компонент виконує свою технологічну функцію.

Газове вугілля забезпечує необхідну усадку вугільного завантаження, що є критично важливим для легкої видачі коксового пирога з камери.

Жирне вугілля відповідає за показник щільності, добре спеченого коксу з високим відсотком механічної міцності, але його надлишок формує можливе погіршення у вигляді надмірної тріщинуватості та дрібнення шматків. Своєю чергою, коксівне вугілля формує стабільну структуру та однорідну грудчастість готового продукту.

Піснувате вугілля виступає опіснюючим компонентом, що знижує тріщинуватість та сприяє підвищенню крупності коксу, тоді як пісне вугілля може вводитися лише в обмеженій кількості (не більше 5-6%), при тонкому подрібненні до 2 мм.

Оскільки надлишок пісних марок найчастіше різко підвищує стиранисть коксу, погіршуються і його металургійні властивості.

При складанні шихти важливо враховувати закономірності взаємного впливу компонентів. Сумісне коксування марок, близьких за ступенем метаморфізму (до прикладу, жирного і газового та коксового і жирного).

Забезпечує збіг температурних меж пластичного стану, що сприяє якісному спіканню компонентів.

Водночас поєднання вугілля, далеко віддаленого одне-одного за ступенем метаморфізму, не підпорядковується правилу адитивності та призводить до опіснення системи, тому для поліпшення взаємодії, в такі суміші додають дуже добре спікливе вугілля.

Окрему увагу в процесі формування шихти слід приділяти балансом рідкої фази, оскільки її дефіцит є критичним ризиком для якості коксу.

Встановлено, що одночасне введення значних обсягів газового (Г) та піснувато-спікливого (ПС) вугілля провокує суттєве зниження ресурсів рідкої фази в системі.

З огляду на це, при складанні шихти вкрай важливо уникати надмірної концентрації цих компонентів у суміші, натомість пріоритетом має бути стабільна присутність марок жирного (Ж) та коксівного (К) вугілля.

Саме ці марки виступають основоположниками пластифікуючих компонентів, що значно підвищують загальну спікливість шихти та забезпечують формування міцного коксового каркаса.

Оскільки у процесі доменної плавки кокс виконує роль конструкційного елемента. Що витримує колосальне механічне навантаження від стовпа рудних матеріалів, висота якого в сучасних печах може сягати до тридцяти метрів. Міцний каркас забезпечує необхідну газопроникність завантаження.

У випадку, коли шихта виявляє надмірну спікливість, що загрожує технологічній стабільності процесу коксування, застосовують методи її корекції. Ефективним способом регулювання виступає введення спеціальних спіснюючих добавок чи використання петрографічно неоднорідного вугілля, що дозволяє зменшити концентрацію надлишкової пластичної маси та запобігти утворенню небажаних дефектів.

Особливого виваженого підходу вимагає введення в шихту пісного вугілля.

Саме його використання, обов'язково повинно компенсуватися збільшенням частки високоспіклого газового та жирного вугілля.

При цьому вкрай важливо мінімізувати або повністю виключити із таких композицій слабоспікливі газові компоненти, оскільки їх присутність у поєднанні з пісним вугіллям створює умови для різкого зниження якості готового коксу, зокрема підвищення його стираності та зниження грудчастості.

Таким чином, досягнення оптимальних властивостей коксу потребує не просто механічного змішування, а глибокого аналізу сумісності компонентів за їхньою реакційною здатністю та температурними межами пластичного стану.

Отримання коксу поділяють на 5 етапів: стадія сушіння, початкова стадія розкладання, стадія пластичного стану, стадія напівкоксу, стадія утворення коксу. Кожна з стадій має свої температурні особливості, контроль температури є важливим для стабільного протікання процесу.

Матеріальний баланс заснований на Законі збереження маси речовин, тобто скільки в апарат прийшло вихідних речовин, рівно стільки й повинне

вийти. Як правило розрахунок матеріального балансу проводять на 1000 кг шихти для коксування. До прикладу, вихід із 1000 кг шихти(%) на Авдіївському коксохімічному заводі складає (Таблиця 1.2) [2].

Таблиця 1.2

Вихід із 1000 кг шихти на Авдіївському коксохімічному заводі

Продукт	Вихід продуктів(%)
Кокс сухий валовий	75,3
Пековий кокс	0,02
Смола кам'яновугільна	3,85
Нафталін	0,15
Бензол кам'яновугільний	0,87
Фталевий ангідрид	0,001
Сульфат амонію	0,01
Зворотний коксовий газ	12,8
Сірчана кислота	0,007

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням[2]

Сам кокс описують як високоякісне і бездимне паливо, яке в доменній печі виконує дві критичні ролі: забезпечує необхідну температуру для розплавлення шихти та виступає реагентом для відновлення.

Кокс класифікують за показниками: вологість, гранулометрія, механічна міцність, реакційна здатність (Табл. 1.3).

Зокрема, вологість коксу, яка є неминучим наслідком технології мокрого гасіння, безпосередньо впливає на чисту вагу відвантажуваного матеріалу та знижує його теплову здатність, що потребує суворого контролю на етапі сушіння. Безпосередні експлуатаційні властивості коксу описуються комплексом фізико-механічних показників, серед яких першочергове значення має гранулометрія.

Таблиця 1.3

Вимоги до якості коксу в доменній плавці ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Параметри	Одиниці виміру	Оптимальне значення/роль
Гранулометрія	мм	45-55(для доменної плавки)
Гаряча міцність(CSR)	%	55-60
Реакційна зданість(CRI)	%	Мінімальна(для запобігання газифікації)
Вологість	%	Суворий контроль залежно від потреби(впливає на теплоту)

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Оптимальний розмір шматків для доменної печі становить 45-55 мм, причому стабільність цього гранулометричного складу є критично важливою для забезпечення високої газопроникності стовпа шихти, адже вузький розподіл розмірів сприяє рівномірному проходженню висхідних потоків газу.

Забезпечення належної якості металургійного коксу є багатофакторною задачею, де механічна міцність та термічна міцність відіграють ключову роль у підтримці стабільності доменного виробництва. Механічна стійкість матеріалу до руйнування та стирання регламентується галузевими індексами M_{10} та M_{40} , які комплексно оцінюють здатність коксового шматка зберігати свою цілісність у складних умовах експлуатації.

Ці показники є визначальними при оцінці спроможності коксу протистояти інтенсивним та динамічним навантаженням, що виникають як на етапах транспортування та вантажно-розвантажувальних операцій, так і під дією величезного статистичного тиску стовпа шихтових матеріалів всередині робочого простору печі.

Проте, в сучасних умовах високоінтенсивного плавильного процесу механічних показників недостатньо для повної оцінки якості.

Критичного значення набувають параметри реакційної здатності (CRI) та гарячої міцності (CSR), які є основними дескрипторами поведінки коксу в нижній, найбільш високотемпературній зоні печі (зоні фурм).

Згідно з технологічними вимогами, кокс повинен демонструвати мінімальну реакційну здатність до діоксиду вуглецю, що дозволяє уникати його передчасної газифікації, та високу гарячу міцність (CSR), яка за стандартами більшості виробництв складає 55-60%.

Саме ці фізико-хімічні характеристики обумовлюють довговічність коксового зерна. Здатність зберігати свою структурну форму при контакті з екстремальними температурами забезпечує виконання коксом його головної технологічної місії – функції жорсткого опорного каркаса.

Саме здатність зберігати ці показники дозволяє коксу не руйнуватися під дією екстремальних температур, зберігаючи свою цілісність та виконуючи функцію стабільного опорного каркаса шихти протягом усього циклу плавки.

Підсумовуючи, слід зазначити, що формування вугільної шихти є складним емпіричним(дослідним) процесом, який виходить далеко за межі простого механічного змішування компонентів за допомогою дозаторів і складів.

Ефективність процесу і правильність підбору базується на синергії сучасних технологій автоматизації, точного дозування та глибокого розуміння фізико-хімічних закономірностей спікання.

Рационально підібрана шихта, сформована згідно марочного складу та ступеня метаморфізму вугілля, є основоположником передумови отримання металургійного коксу з прогнозованими показниками міцності, реакційної здатності та гранулометрії.

Оскільки доменна плавка висуває жорсткі вимоги до якості коксівного палива, будь-яке відхилення в технології підготовки шихти має пропорційний негативний вплив на техніко-економічні показники роботи доменного цеху.

1.2 Сучасні методи підвищення насипної густини шихти

Сучасні технологічні підходи до підвищення насипної густини матеріалів спрямовані на мінімізацію пустот між частинками та створення монолітної структури шихти.

Ефективність цих процесів безпосередньо впливає на продуктивність плавильних агрегатів, інтенсивність тепломасообміну та якість кінцевого продукту. Існують різні методики та принципи: вібраційне трамбування, статистичне підпресування, брикетування (Табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Порівняльна характеристика методів

Метод	Основний інструмент	Ступінь ущільнення	Перевага
Трамбування	Вібро-системи	Помірна	Висока рівномірність
Статистичне підпресування	Прес-механізм	Висока	Миттєвий результат
Брикетування	Валкові/штемпельні преси	Найвища	Оптимальна газопроникісь

Примітка. Джерело: Розроблено авторо

Розглядаючи трамбування як один з методів, це є не менш актуальним рішенням із високим вмістом слабкоспікливих (малометаморфізованих) марок вугілля. Яке забезпечує насипну щільність на рівні 1,1-1,25 т/м³ за рахунок механічного та капілярного зближення вугільних зерен. При цьому мінімізація «міжзернового простору» (збільшення щільності завантаження понад 900 кг/м³) стає визначальним чинником для успішного спікання такої гетерогенної системи.

Для досягнення подібних результатів у промисловості використовують процес трамбування та вібрації.

Статистичне підпресування шихти, загалом це метод підвищення насипної щільності перед процесами термічної обробки, застосуванні зовнішнього тиску, спрямованого для зменшення пористості та оптимізації перерозподілу частинок.

Це дозволяє не лише збільшити масу шихти, що завантажується в робочу зону, а й суттєво покращити якісні показники кінцевого продукту, зокрема міцність агломерату чи коксу.

Процес орієнтований на створення максимальної щільності і формування гетерогенної суміші. Зазвичай, для підпресування використовується шихта, попередньо підготовлена шляхом дроблення до класу 0-3 мм, частка якої становить до 97% загальної маси.

Ефективність ущільнення через коефіцієнт підпресування, який визначає динаміку зростання щільності під дією прес-механізму. Чим більше значення цього коефіцієнту, тим критичніша стабільність технологічного циклу.

При цьому, в цьому методі можуть використовувати додаткові в'язучі компоненти. Зокрема, використання кислої смолки (продукту очищення бензолу сірчаною кислотою) з густиною 1,28-1,3 т/м³ дозволяє не лише підвищити загальну густину шихти, а й суттєво поліпшити її структурування.

Ці добавки діють як змащувальний та зв'язуючий матеріал, заповнюючі дрібні порожнини та забезпечуючи монолітність вугільного пирога, що критично важливо для процесів спікання слабоспівливих марок вугілля.

Процес брикетування, не є чимось технологічно новин, але фактично поєднує в собі декілька процесів: використання тиску, температури, застосування зв'язуючого за потреби.

В останні роки спостерігається поступове відродження наукового та практичного інтересу часткового і повного брикетування вугільної шихти. Такий підхід дозволяє не лише підвищити ступінь ущільнення вугільної маси, але й комплексно вирішити низку важливих технологічних і екологічних завдань.

Зокрема, мова йде про ефективну утилізацію дрібнодисперсного вугілля, а також вторинних продуктів коксохімічного виробництва, що накопичується в процесі роботи підприємства.

Крім того, впровадження часткового/повного брикетування сприяє покращенню структурно-механічних характеристик кінцевого продукту, тобто металургійного коксу, що має безпосередній вплив на його міцність, реакційну здатність та стабільність у доменному процесі.

Таким чином, дана технологія виступає як багатофункціональний інструмент підвищення ефективності коксохімічного виробництва.

Як зв'язувальні речовини у процесах брикетування можуть використовуватися різноманітні вуглеводневі продукти коксохімічного походження, що утворюються як основні або побічні фракції технологічних процесів.

До них належать кислі смолки цехів уловлювання та ректифікації, кам'яновугільна смола, фуси, пек, смолисті та масляні фракції біохімічних установок, полімерні компоненти бензольного відділення, а також малотоннажні відходи, що формуються під час очищення та експлуатації технологічних ємностей.

Використання таких матеріалів є особливо доцільним, оскільки дозволяє поєднати технологічну функцію зв'язування з утилізацією промислових відходів без суттєвого погіршення якості кінцевого продукту.

Експериментальні дослідження, виконані в лабораторних умовах із використанням п'ятикілограмової печі УХІНу, були спрямовані на оцінку ефективності різних варіантів частково брикетованих шихт.

У межах досліджень було проаналізовано двадцять експериментальних складів та два контрольні (базові) варіанти шихти. При цьому застосовувалися різні підходи: як брикетування окремих компонентів, так і формування брикетів із попередньо змішаної шихти, що дозволило більш комплексно оцінити вплив структури матеріалу на кінцеві властивості.

Отримані результати свідчать, що за умов використання термопластичних зв'язуючих компонентів та вуглеводневих добавок можливе формування брикетів із підвищеною щільністю.

Зокрема, при тиску пресування близько 20 МПа були отримані брикети із середньою щільністю $1,19 \text{ т/м}^3$, що вказує на суттєве ущільнення структури шихти та зменшення міжзернової пористості.[3]

При цьому процес брикетування без зв'язуючого, це ущільнення за високого тиску, зазвичай в межах 100-250 МПа. Під дією такого навантаження частинки вугілля максимально зближуються, деформуються і щільно контактують одна з одною.

У результаті виникають сили міжмолекулярного зчеплення, а також механічне поєднання частинок за рахунок їхньої форми та шорсткості поверхні. Додатково можуть працювати природні компоненти вугілля, які мають слабкі зв'язувальні властивості.

Для такого процесу зазвичай використовують дрібно подрібнену сировину, оскільки саме малий розмір частинок дозволяє отримати більш щільну та однорідну структуру брикету.

Обладнання для беззв'язуючого брикетування повинно витримувати дуже високі навантаження, тому застосовують потужні гідравлічні або валкові преси спеціального типу. Головною перевагою такого методу є отримання максимально екологічного палива. Однак є і суттєві недоліки. Використання високого енергоспоживання, оскільки необхідно створювати значний тиск. Крім того, процес занадто чутливий до властивостей сировини, особливо до вологості та гранулометричного складу.

Подібне брикетування найчастіше застосовують де є можливість до високих енергетичних витрат і потреба в отриманні екологічного продукту.

Підсумовуючи, що сучасні методи до підвищення насипної густини вугільної шихти формуються на використанні різних технологій ущільнення, серед яких трамбування, статистичне підпресування і саме брикетування

займають основні місця. Всі ці методи спрямовані на покращення контакту між частинками, та залежно від вихідних умов обирається технологічна схема.

1.3 Основоположення методів брикетування матеріалів

Брикетування як процес поєднує в собі доволі багато технологічних дій: підготовка, подрібнення, грохочення, сушку, дозування, нагрівання, пресування, обробка сухого брикету. Залежно від поставлених задач майбутнього брикету. Брикетування – процес термохімічної зміни та переробки корисних копалин, концентратів і відходів.[4]

Комплексне дослідження процесу брикетування сировини має на меті не лише оцінку функціональної ефективності різноманітних зв'язуючих речовин, але й глибоку оптимізацію технологічних режимів, необхідних для формування структурно стійких та механічно міцних брикетів.

На початковому етапі лабораторних чи промислових випробувань здійснюється ретельне формування дослідної проби.

Цей процес передбачає ретельну гомогенізацію основного дисперсного матеріалу зі спеціально підібраними адгезійними компонентами у точно заданих пропорціях або без.

Як приклад, для зміцнення залізорудних концентратів найчастіше застосовують мінеральні добавки, зокрема високопластичні бентонітові глини, тоді як для структурної консолідації кам'яновугільного дріб'язку оптимальними є органічні нафтозв'язуючі композиції (бітуми, смоли тощо) (Табл. 1.5).

Після досягнення високого рівня однорідності, підготовлену багатокомпонентну масу (шихту) піддають цілеспрямованому сушінню на певний час і пресування. Контрольоване нагрівання відіграє критичну роль: воно сприяє активації в'язучих властивостей добавок за наявності, підвищенню загальної пластичності суміші, видаленню надлишкової вологи та зниженню внутрішнього тертя частинок.

Таблиця 1.5

Класифікація зв'язуючих речовин у процесах брикетування

Група зв'язуючих	Типові представники	Механізм дії та сфера застосування
Неорганічні (мінеральні)	Вапно, високопластичні бентонітові глини, гіпс, цемент, магнезит, гранульований шлак	Утворюють жорсткий мінеральний каркас. Найчастіше застосовуються для зміцнення залізрудних концентратів та нерудних корисних копалин.
Органічні	Коксівне вугілля (як пластифікатор), кам'яновугільний пек, гудрон, бітуми, смоли	Забезпечують високу міцність та водостійкість. Використовуються для структурної консолідації кам'яновугільного дріб'язку.
Органічні (відходи виробництв)	Сульфітний луг, лігносульфонат, меляса (відходи цукрового виробництва)	Екологічна альтернатива нафтопродуктам. Використовуються для зниження собівартості

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Комплексна лабораторна методика оцінки показників термічної стійкості (термостійкості) збрикетованої продукції базується на проведенні суворо регламентованих, багатоетапних високотемпературних випробувань.

Ці глибокі дослідження здійснюються з використанням спеціалізованих муфельних печей, здатних забезпечити точний контроль градієнта температур у камері.

Процес випробування охоплює надзвичайно широкий температурний діапазон, що варіюється від початкових 100 °С до екстремальних 800-1000 °С. Алгоритм термічного впливу передбачає строго дискретне, ступінчасте нагрівання: підвищення температури відбувається з фіксованим кроком у 100 °С за 15 хвилин [5].

Підсумовуючи, технологічне отримання брикетів пов'язане на декількох основних етапах: пошук та підбір відповідної можливої сировинної бази вугілля котре буде придатним для застосування як природний пластифікатор, аналіз технологічного потенціалу та показників якості обраного вугілля-пластифікатора, формування експериментальних партій брикетів за умов варіювання компонентного складу шихти та саме зміни ключових режимів виробництва, встановлення раціональних параметрів із можливих, з'ясування допустимих робочих інтервалів кожної суміші різного марочного складу.

Аналіз виконаних дослідів емпірично довів, що початкова можлива температурна межа утворення пластичного складу вугілля знаходиться від 325-412 °С. При цьому затвердження відбувається при 397-475 °С. Головною метою цих технологічних операцій є отримання готового продукту, який відповідає комплексу суворих вимог щодо міцності та експлуатаційної стійкості (Табл. 1.6)

Таблиця 1.6

Комплексна система параметрів оцінки якості брикетів

Критерій оцінки	Фізичний зміст показника	Методика визначення / Вплив на експлуатацію
Механічна міцність	Стійкість до механічних навантажень без руйнування	Визначається опором на стиск, вигин, стирання в барабані та скидання
Атмосферна стійкість	Опірність впливу вологи, кисню та перепадів температур	Оцінюється за втратою міцності після тривалого відкритого зберігання
Водостійкість	Збереження форми та цілісності при контакті з водою	Запобігає розмиванню брикету під час транспортування та зберігання
Термостійкість	Стійкість до розтріскування під дією високих температур	Випробування в муфельних печах (моделювання умов плавильного агрегату)
Газопроникність	Пропускна здатність газу через поверхню брикету	Безпосередньо визначає швидкість горіння та реакцій усередині печі

Джерело: Розроблено із виконанням[5]

1.4 Аналіз існуючих технологічних схем брикетування

Саме розуміння процесу брикетування починається з класифікації існуючої сировини або похідних викидів з інших галузей. Тому, перш ніж

обирати і обґрунтовувати технологію, необхідно правильно класифікувати матеріали.

Загалом, їх поділяють на дві великі групи. Формально їх можна назвати група «А» та група «Б» і від того, до якої групи належить сировина, залежатиме вся структура і складність майбутньої лінії.

До групи «А» відносять корисні копалини та відходи, які здатні зліплюватися в міцний брикет під дією тиску без додавання будь-якого стороннього клею.

Технологічні лінії для таких матеріалів зазвичай трохи простіші за складом обладнання, але вони вимагають застосування дуже потужних пресів. Цю групу доцільно поділити на чотири підгрупи.

Перша включає матеріали з природними цементувальними властивостями, такі як глина, відновлене залізо, сульфіти металів, а також деякі види дрібних залізних руд і бурого вугілля, які під тиском самостійно утворюють достатньо міцний структурний каркас.

Друга підгрупа, матеріали з колоїдними властивостями, переважно вологі та пилюваті копалини, наприклад, торф або молоде буре вугілля, що тримаються купи за рахунок капілярних сил та природної вологи.

Третя група охоплює рудні копалини, які потребують випалу, зокрема піритні недопалки та магнетитовий дріб'язок, тому щоб такий брикет став міцним, технологічна схема обов'язково повинна включати етап термічної обробки вже після пресування.

До четвертої підгрупи належать матеріали, що вимагають екстремального тиску понад 150 МПа, оскільки в них взагалі немає природних цементуючих елементів, як от старе буре вугілля або специфічні руди, і для їх брикетування потрібні надпотужні преси, щоб за рахунок величезного тиску частинки деформувалися і зчепилися між собою.

При цьому, саме група «Б», характеризується більшістю неорганічних копалин, а також усе кам'яне вугілля, антрацит і вугільні похідні, такі як

коксовий дріб'язок. Загалом, спресувати їх під тиском доволі складно на простих пресах, тому обов'язково потрібно додавати компоненти для зв'язування.

Технологічні схеми для цієї групи є набагато різноманітними та складнішими, оскільки саме вони вимагають встановлення додаткового обладнання для підігріву, точного дозування та при цьому дуже ретельного перемішування щоб була однорідність.

Описаний раніше метод брикетування поділяють на дві методики, залежно від умов і поставлених технологічних завдань, використовується потрібна модель брикетування.

Потрібно не забувати, існуюча автоматизація все ж і тут виконує свою важливу роль, а саме в сенсі дозування.

Ключовим елементом системи є автоматизація, а саме програма «ПОТІК» та високоточні дозатори фірми «Schenk»(Рис.1), які під керування контролеру Siemens/Mitsubishi забезпечують змішування компонентів із точністю 0,5%.[6]

До цього вугілля піддається різноманітним методам стандартизації до зазначених фізико-хімічних і розмірних показників та класифікації на збагачувальних фабриках. До прикладу, для фінальної обробки вугілля використовують сучасні молоткові дробки фірми «SANDVIK», що дозволяють гнучко регулювати ступінь подрібнення шихти.

Увесь цей процес супроводжується безперервними можливими існуючими методиками збереження сировинного і технологічного ресурсу.

Інтегровані потокові онлайн-аналізatori в режимі реального часу відстежуються вологість та зольність сушіння, передаючи дані на головний контролер для оперативного коригування роботи дозаторів.

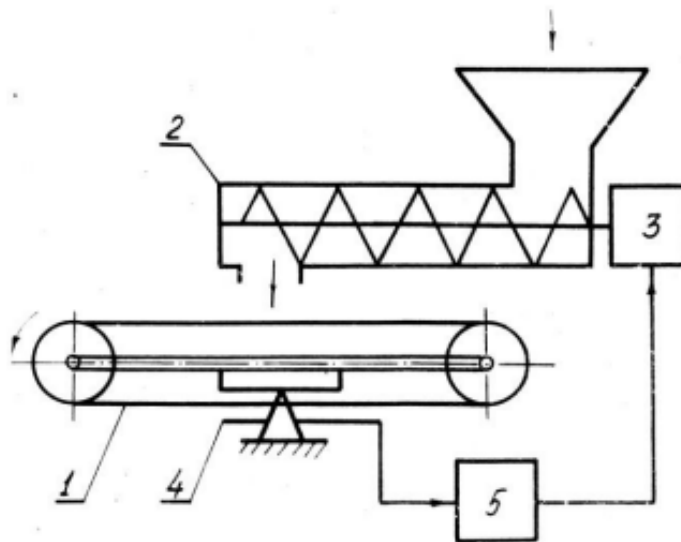


Рис. 1.1 Дозатор сипучих матеріалів фірми «Schenk»

1 – масовимірувальний транспортер; 2 – шнековий бункер-живильник; 3 – регульований електропривод; 4 – масовимірувальний пристрій; 5 – блок керування

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням [6]

Складно сперечатись з думкою, що процес брикетування є інноваційним і технологічно оптимальним.

Брикетування вугільної шихти є одним із перспективних напрямів удосконалення підготовки коксівної сировини, що дозволяє підвищити її насипну густину, поліпшити гранулометричний склад та забезпечити більш рівномірне завантаження коксових камер.

Суть процесу полягає у пресуванні дрібнодисперсних вугільних матеріалів у брикети заданої форми та щільності під дією тиску, з можливим використанням або без використання зв'язуючих речовин.

Першим з них є брикетування із застосуванням додаткових речовин, котрі виконують функцію клею, передбачає введення до шихти спеціальних компонентів, таких як кам'яновугільний пек, смоли або лігносульфонати, що забезпечують формування міцної структури готового брикету після пресування.

Для цього методу характерна робота при середніх тисках у діапазоні від 20 до 80 МПа, а також необхідність можливого включення до технологійного процесу додаткових стадій змішування та термообробки.

При цьому подібна методика дозволяє використовувати для обробки дрібні фракції вугілля з недостатньою природною зв'язністю. Значим мінусом є вища собівартість, підвищеною енергоємністю процесу та нижчою екологічністю.

Вивчення тематичних рішень брикетування антрацитового штибу показало можливу перспективність використання в якості речовини для з'єднання через бітум та лігносульфонату, а також можливого зменшення зольності.

Як показали дослідження, використання немодифікованого технічного лігносульфонату як сполучної речовини призводить до зниження показників міцності та водостійкості готових брикетів порівняно з бітумними аналогами.

Для вирішення цієї проблеми було запропоновано застосовувати термообробку брикетів.

Початкові тести брикетів на основі антрацитового штибу (АШ) та лігносульфонату натрію виявили проблему: у температурному діапазоні 80-350 °C виникало розстріскування структури, хоча сам ефект зміцнення спостерігається. Щоб запобігти руйнуванню брикету загалом та підвищити їхні технологічно-енергетичні характеристики, було розроблено нову вугільну композицію 70-80% АШ, 10-15 вугілля марок Г чи Д та 10-15% лінгіну. Для визначення оптимальних визначень параметрів термообробки було проведено емпірично серію випробувань із використанням АШ (із Трипільської ТЕС, фракція 0-3мм, зольність за сертифікованим показником 29,2%).

Пресування виконували при тиску 25 МПа (діаметр матриці 25 мм) із суміші, що містила лише 78% АШ, 10% лінгіну та 12% лігносульфонату натрію. Процес термообробки від 80-350 °C і визначено оптимальним режим витримки при температурі 250-350 °C протягом 5-15 хвилин.

Та при цьому визначений альтернативний метод, при зниженні температурного рівня до 200 °C час обробки необхідно збільшити до 20-30 хвилин, що є економічно менш вигідним через падіння продуктивності обладнання (Табл. 1.7) [4].

Таблиця 1.7

Технологічна карта процесу брикетування

№	Показник технологічного параметру	Можливі межі
1	Брикетний склад:	
	АШ, максимальний, %	80-70
	Лігнін, максимальний %	10-15
	Вугілля Д чи Г, максимальний %	10-15
2	Зольність компонентів шихти брикетної, %:	
	Незбагаченої	25-30
	Збагаченої	15-20
3	Вугілля марки Д чи Г:	
	Незбагачене	20-25
	Збагачене	10-15
	Лігніни	4,5
4	Крупність брикетованої шихти, мм:	0-3
	Клас +6 мм, %	0 V
	Клас +3 мм, %	Не більше 10%
5	Вологість шихти вугільної, %:	
	При застосуванні лігносульфонату	Не більше 10%
	При застосуванні бітуму	Не більше 4%
6	Витрата зв'язуючого в масовому відношенні % до вугільної шихти:	
	Лігносульфат технічний	12
	Нафтобітум	8
7	Температура нагрівання бітумного зв'язуючого перед змішуванням з вугільною шихтою, °C	180-200

Продовження таблиці 1.7

8	Режим термообробки брикетів з лігносульфатними зв'язуючими, °C	
	Температура	250-350
	Тривалість термообробки, хв.	5-15

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням[4]

Таким чином, з урахуванням проведених досліджень пропонується наступна технологічна карта процесу брикетування (Рис.1.2)

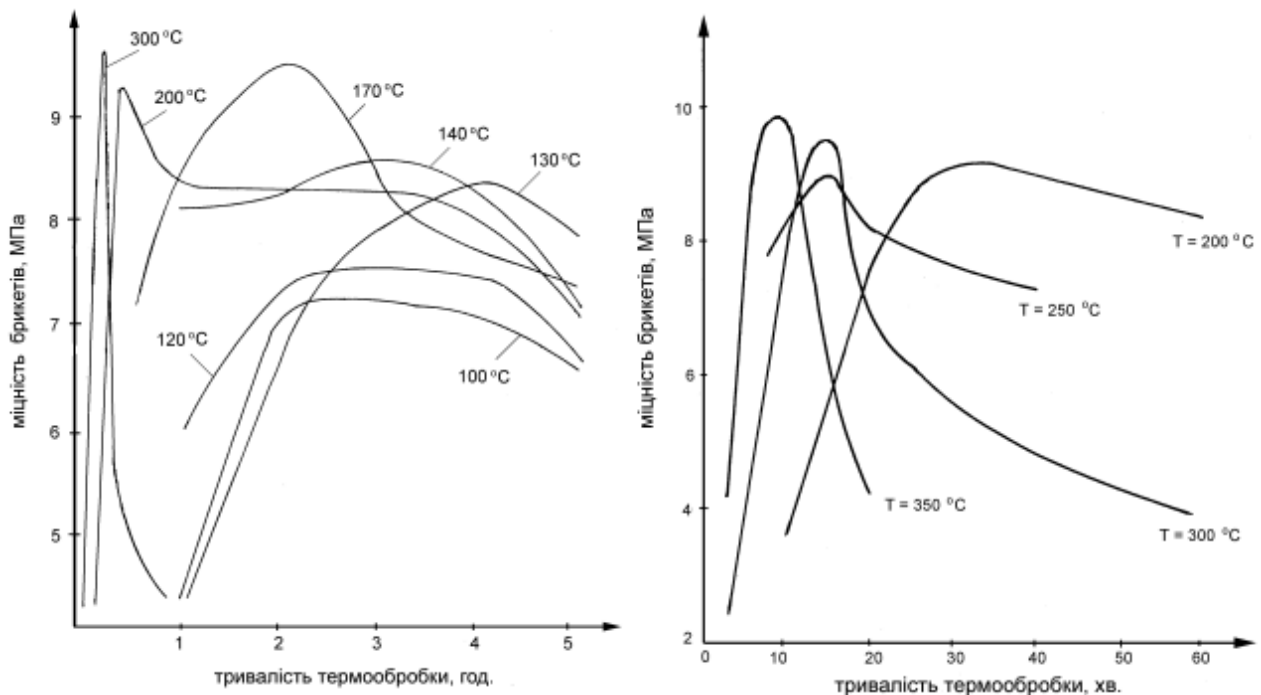


Рис.1.2. Залежність міцності брикетів від режиму термообробки

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням[4]

Альтернативним напрямком є брикетування беззв'язуючого (сухе), ідея подібної технології сформована на використанні високого тиску, як раніше і описувалось (від 100 до 200 МПа) за можливості і вище. За таких умов відбувається пластична деформація частинок та їхнє надійне механічне зчеплення без застосування добавок.

Цей спосіб порівнюючи з минулим, характеризується нижчою собівартістю через відсутність втрат на речовини для з'єднання та вищою екологічною чистотою процесу, проте якість отриманих брикетів може бути нестабільною і жорстко залежить від рівня вологості вхідної сировини і підготовчих процесів.

Незважаючи на ці присутні обмеження, саме беззв'язуюче брикетування дозволяє ефективно підвищити насипну густину шихти, що у підсумку призводить до покращення механічної міцності отриманого коксу, за рахунок створення брикету як цільної структури та зберігаючи таким чином корисну площу.

Реалізація обох процесів у виробничих умовах здійснюється за різним технологічним пресовим обладнанням. Традиційно найчастіше використовують штемпельні (поршневі) преси, вальцові (роликові) преси, шнекові екструдери та різноманітні гідравлічні системи високого тиску. Незалежно від обраного обладнання та напрямку, загальна технологічна схема полягає в чіткій послідовності дій (Табл. 1.8).

Таблиця 1.8

Порівняння характеристик методів брикетування

Критерій порівняння	Брикетування зі зв'язуючими речовинами	Беззв'язуюче брикетування
Принцип зчеплення	Склеювання частинок вугілля за допомогою додаткових компонентів	Пластична деформація та надійне механічне зчеплення частинок
Робочий тиск	Середній тиск(20-80 МПа)	Високий(100-200МПа і вище)
Наявність добавок	Використовуються(кам'яновугільна пек, смоли, лігносульфонати, тощо)	Не використовуюється
Особливість процесу	Потребує додаткових стадій змішування та термообробки	Жорстко залежить від рівня вологості вхідної сировини та підготовчих процесів

Продовження таблиці 1.8

Якість брикетів	Гарантоване формування міцної структури готового брикету	Може бути нестабільною(якість безпосередньо залежить від вологості)
Економічність (собівартість)	Вища(через витрати на реагенти)	Нижча(відсутні витрати на зв'язуючі речовини)
Екологічність	Нижча	Вища(екологічно чистіший процес і застосування)

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Процес починається з підготовки сировини, як раніше зазначалось для брикетування використовують дрібнодисперсні групи, тому сировина піддається дробленню та класифікації, після чого відбувається сушіння до досягнення оптимального рівня вологості котрий встановлюється дослідним методом. Крайня технологічна задача це чітке дозування та ретельне перемішування компонентів, які будуть застосовуватись у процесі пресування під потрібним тиском. Отриманий брикет обов'язково проходить охолодження до кімнатної температури і стабілізації структури і майбутнього транспортування.

1.5 Огляд міжнародної практики та дослідів

Цікавим є розуміння підходу до визначення потрібних характеристик і задач брикету залежно від країни, географічних умов, економічних факторів.

Яскравим прикладом передових технологій це є країна Японія, країна котра в силу географічних умов, сировинної бази, економічних факторів, котра вона має.

Це все створює виклик для будь-якої промисловості в сенсі отримання максимальної користі з сировини.

Детально розглядаючи основні фактори чому саме брикетування має поширене значення в цій країні, а саме: обмежені сировинні ресурси котрі використовуються протягом не першого десятку років, обмежена доступна площа, часткова або повна залежність від імпорту вугілля.

Тому у японському виробництві надають величезну увагу не тільки якості кінцевого продукту, але й підвищенню ефективності використання кожної тони сировини, зменшенню втрат та стабілізації технологічних процесів і більш жорсткі умови до екологічності виробництва відносно України.

Саме тому в Японії одними з перших почали активно розробляти технології підвищення насипної густини вугільної шихти, що дозволяло покращувати умови коксування навіть при використанні значної частки слабоспікливого вугілля.

Одним із таких напрямків стало впровадження технології брикетного коксування, при якій складу вугільної шихти вводили попередньо ущільнені брикети.

Основною метою такого підходу було саме підвищення щільності завантаження, стабілізації структури коксового масиву та забезпечення необхідної механічної міцності коксу при використанні дешевших набагато або менш якісних марок вугілля.

У процесі емпіричних дослідів, японські дослідники встановили, що важливе значення має не лише склад брикету, а і його технологія зв'язування за допомогою інших компонентів.

При цьому було виявлено, що геометричні характеристики самих брикетів, зокрема їх розмір активно впливає на насипну густину шихти, перебіг пластичного стану вугілля, характер утворення тріщин у коксовому масиві та загальному міцність коксу після карбонізації.

Під час досліджень у Японії використовували як класичні спікливі марки вугілля, так і слабкоспікливі компоненти, частка яких у шихті поступово збільшувалася.

Також досліджувалися брикети, виготовлені з: коксового дріб'язку, антрациту, бурого вугілля, тирси, біомаси. Узагальнюючи, японські розробники розробили декілька важливих технологій: система контролю вологості вугілля(CMC – Coal Moisture Control), система сухого очищення та попереднього ущільнення шихти(DAPS – Dry –cleaned and Agglomerated Precompaction System), коксування з додаванням брикетів, трамбувальне завантаження шихти.

Саме ці технологічні рішення були впроваджені в 1980 роках за національний проєктом зі створення технології формованого коксу (FCP – Formed Coke Process).

У традиційній схемі брикети змішували з порошкоподібним вугіллям та завантажували до стандартних камерних коксових печей, тоді як у технології FCP брикети безперервно коксувалися у вертикальних печах. У дослідженні використовували чотири групи марок вугілля.

Перші три групи належали до спікливих коксівних марок, тоді як четверта група була слабкоспікливою та характеризувалася низьким показником дилатації, а саме 28%.

При цьому, як зв'язувальну суміш використовували кам'яновугільний пек із температурою розм'якшення 25 °C (Таблиця 1.9).

Таблиця 1.9

Характеристика використаного вугілля

Вугілля	VM, %	Зольність, %	Загальна дилатація, %	Максимальна плинність,	Відбиття вітриніту, %
1	21,3	9,4	22	1,38	1,43
2	24,4	8,9	134	3,00	1,28
3	36,8	9,4	233	4,39	0,85
4	36,6	9,3	28	2,32	0,79

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням[7]

Для проведення детального дослід, впливу розміру брикетів на якість коксу, як раніше описувалось, використовували порошкоподібне вугілля та попередньо підготовлену брикетну шихту. Вугілля подрібнювали на декілька класів різної крупності: 3 мм; 1,5 мм; 0,5 мм; 0,3 мм.

Після цього до шихти додавали 8-12% кам'яновугільного пеку. Перемішування здійснювали у високошвидкісному змішувачі при температурі 70-80°C з подачею пари. Брикетування виконували на валковому пресі.

Початкові брикети мали розміри 64x42x32 мм, а саме їх об'єм становив 56 см³.

Для отримання брикетів різних фракцій великі брикети подрібнювали та розсіювали через сита розміром: 0,6 мм; 2 мм; 6 мм; 15 мм; 40 мм. Уявна густина брикетів становила 1,18 г/см³. (Рис 1.3)

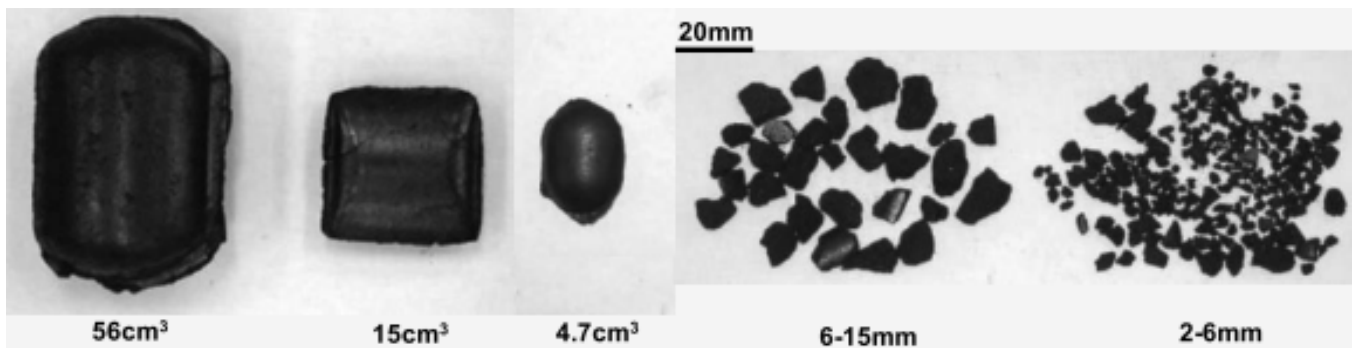


Рис 1.3 Фото брикетів

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням[7]

При цьому, порошкоподібне вугілля та брикети змішували у співвідношенні 70:30 та отриману шихту завантажували до лабораторної коксової печі при наступній густині, а саме 850 кг/м³(на суху масу), сам процес коксування тривав 18,5 годин. При умовах нагріву, еквівалентних температурі простіноків промислової коксової печі, а саме 1250°C.

Після завершення процесу кокс охолоджували в атмосфері азоту. Наступними показниками визначити: DI15015 (холодна міцність), CRI (реакційна здатність коксу). CSR (міцність коксу після реакції).

Для дослідження впливу самого розміру брикетів на насипну густину шихти використовували суміші порошкоподібного вугілля з брикетами різних фракцій: 0,6-2 мм; 6-15 мм; 15-40 мм; 56 см³.

Та при цьому 34 кг суміші скидали з висоти 2 метрів у контейнер об'ємом 0,0283м³.

Результати дослідження показали, що показник DI15015 суттєво залежить від розміру брикетів.

Було встановлено три основні характеристики та типи залежності: максимум DI15015 при розмірі брикетів близько 10 мм, монотонне зростання DI15015 зі збільшенням розміру брикетів, мінімум DI15015 при розмірі близько 10 мм.

Така поведінка пояснюється поєднанням двох основних механізмів: ефектом розширення брикетів, ефектом диспергування пеку.

Чим більший брикет, тим сильніше він розширюється під час пластичного стану вугілля.

Це призводить до ущільнення навколишньої порошкоподібної шихти та підвищення механічної міцності коксу.

У той же час дрібні брикети забезпечують більш-менш рівномірний розподіл пеку, що також позитивно впливає на структуру коксу.

Для шихт із високим вмістом слабкоспікливого вугілля певні розміри брикетів можуть сприяти утворенню додаткових тріщин та збільшенню виходу коксового дріб'язку фракції 6-15 мм. (Рис.1.4)

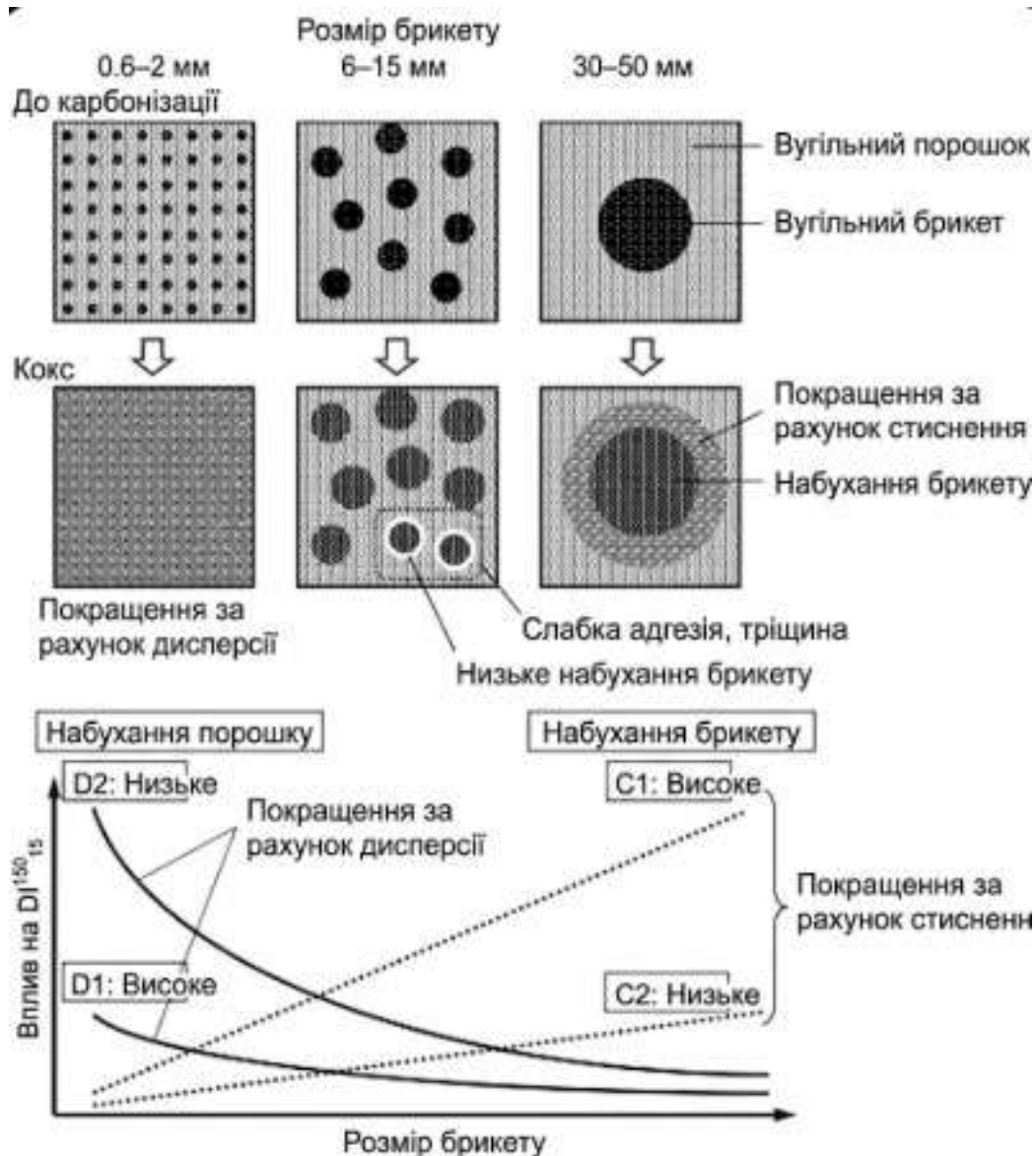


Рис. 1.4. Вплив розміру брикетів

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням[7]

Було встановлено, що середній розмір коксу зменшується зі збільшенням розміру брикетів. Це пояснюється утворенням більшої кількості тріщин у щільних локальних зонах коксового масиву. Показник реакційної здатності у більшості випадків змінювався незначно.

Для окремих випадків дрібні брикети забезпечували зниження реакційної здатності завдяки більш рівномірному розподілу пеку, як і зазначалось раніше.

Показник міцності переважно збільшувався зі збільшенням розміру брикетів. Також, було встановлено, що насипна густина шихти зростає зі збільшенням брикетів.

При збільшенні розміру брикетів від 0,6-2 мм до приблизно 50 мм густина шихти збільшувалася приблизно на 110 кг/м³.

Це підвищення густини позитивно вплинуло на: загальна якість коксу, продуктивність коксових печей. Проте надмірне ущільнення може призводити до: підвищення тиску коксування, пошкодження стінок печі, ускладнення видачі коксу.

У результаті цього глобального досліджу, було встановлено, що розмір вугільних брикетів є одним із ключових факторів, який суттєво впливає на якість металургійного коксу, так і на технологічні параметри роботи коксових печей, а саме: показник DI15015 істотно залежить від розміру брикетів, залежність може проявлятися у вигляді максимуму або мінімуму чи монотонного зростання, використання слабкоспікливих брикетів може збільшувати об'ємне руйнування коксу, зі збільшенням розміру брикетів – середній розмір коксу зменшується, насипна густина шихти зростає зі збільшенням розміру брикетів.[7]

Не менш цікавим, є вивчення саме послідовного гарячого брикетування та карбонізації (HBC – Hot Briquetting and Carbonization).

Дослід показує, що це є перспективною технологією отримання міцного металургійного коксу з бурого вугілля(лігніту).

У даному досліді було досліджено властивості 12 зразків лігніту. А сам отриманий кокс показав величезний розкид міцності на розриви від 0,2 до 31,2 МПа(за умов брикетування при 200°C під тиском 112 МПа та карбонізації при 1000°C).

Ці розбіжності доволі складно класифікувати, натомість дослідники та автори запропонували два нових методи кореляції міцності коксу з властивостями вихідного вугілля: за хімічною структурою аліфатичних фрагментів, за об'ємною усадкою вугільної матриці під час карбонізації.

Лігніт має колосальні світові запаси (близько 280 мільярдів тонн), але через повну відсутність спікливості він непридатний для класичного коксування у шілінних печах.

Технологія формування коксу беззв'язуючим методом за температури 200°C дозволяє релаксувати макромолекулярну структуру вугілля без його піролітичної деструкції, формуючи високощільний брикет.

Автори, зазначають, що кокс із вікторіанського лігніту досягав міцності понад 30 МПа, що значно вище за звичайний доменний кокс (<6 МПа).

Також до особливостей дослідів, був згаданий японський національний проект «COURDE50», який вимагає розробки високореакційного доменного коксу для доменних печей, що працюють в атмосфері, багатій на водень.

Як раніше описувалось, було узяті 12 зразків з різних регіонів: Австралія (A,C), Індонезія (B, E, G, I) та Монголії (D, F, H, J, K, L). Саме вугілля було подрібнене до розміру <106 мкм і підсушено до вологості приблизно 10%.

Аналізи включали: елементний та технічний склад (вміст вуглецю (C) 65,1-72,0%; зольність (A^d) 1,7-13,5%), твердотілість ЯМР-спектрометр (JEOL ECA 400) для визначення часток вуглецевих груп, термохімічний аналіз (ТМА – об'ємної усадки порошку лігніту при нагріванні до 530°C під мінімальним тиском 19 кПа) (Табл. 1.10).

Таблиця 1.10

Скорочені дані елементного складу та технологічного аналізу лігніту

Лігніт	Вуглець(C),%	Водень(H),%	Азот(N),%	Кисень(O),%	Зола,%
A	69,2	4,7	0,6	25,5	1,7
B	66,1	4,7	0,8	28,4	1,9
C	66,3	5,1	0,8	27,8	27,8
D	66,2	5,5	0,7	27,6	12,6
E	65,1	5,4	0,8	28,4	7,4
F	70,9	4,8	1,0	23,3	6,8
G	68,3	4,6	1,0	26,1	3,2
H	66,9	4,8	0,9	27,5	7,8

Продовження таблиці 1.10

I	66,2	4,8	0,9	28,1	3,3
J	72,0	5,2	1,1	21,7	13,5
K	68,1	4,5	1,1	26,3	10,3
L	65,4	5,6	1,5	27,5	7,3

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням [8]

Приготування коксу та його вимірювання було стандартизованим. Наважку в 1 г пресували у прес-формі(внутрішній діаметр 14,1 мм) за температур: 25,100, 130 або ж 200°C.

Тиск складав: 25, 56 або 112 МПа протягом 8 хвилин. Брикети коксували в атмосфері зі швидкістю 3°C/хв до кінцевої температури, а саме переважно 1000°C. Міцність визначали методом випробування на розкіл(діаметральний стиск) і фіксували як міцність на розрив.

Саме дослідження таких показників як: час, температура та тиск брикетування. Підтвердили, що ефективне брикетування потребує температури понад 100°C.

Покращення міцності за перші кілька хвилин є більш значин, коли температура вища. Можливе пояснення полягає в тому, що висока температура викликає розм'якшення лігніту, що призводить до формування брикету високої щільності та міцності.

Додатково або альтернативно це пояснюється видаленням води за температури понад 100°C, оскільки вода перешкоджає міжчастинковому контакту. Емпіричні досліді дозволили встановити, що параметри: температура, тиск, час.

На рівні 8 хвилин, 200°C і 1000°C відповідні для брикетування беззв'язуючим методом. При тому міцність коксу значно залежала від типу лігніту.

Найвищу міцність коксу понад 30 МПа було досягнуто для коксу, виготовленого з лігніту «А» при тиску 112 МПа.

Водночас, при тиску в 25 і 56 МПа коксові зраки: J, K, L. Взагалі не змогли сформувати брикет через низьку здатність. Спроби пов'язати міцність коксу зі стандартними структурними параметрами (вміст летючих речовин, фіксованого вуглецю, золи) показали великий розкид результатів, що свідчить про їхню непридатність як критеріїв відбору. Для детальшого розуміння було вивчено хімічну структуру, було проведено ЯМР-аналіз (див. табл. 1.11).

Була виявлена тенденція при котрій, зі збільшенням міцності коксу частка ароматичного вуглецю знижується, а частка аліфатичного вуглецю зростає від кінцевого до верхнього показника, для чіткого розуміння ЯМР-аналіз демонструє зворотну пропорційність між частками, які в сумі складають вуглецевий каркас макромолекул.

Таблиця 1.11

Частка вуглецевих фрагментів за даними ЯМР-аналізу(%)

Лігніт	Ароматичний вуглець, %	Аліфатичний вуглець, %
A	64,7	35,3
B	66,8	33,2
C	65,3	34,7
D	68,5	31,5
E	63,4	36,6
F	72,0	28,0
G	68,5	31,5
H	69,4	30,6
I	69,3	30,7
J	73,3	26,7
K	70,1	29,9
L	72,6	27,4

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням[8]

Кореляція міцності коксу з усадкою під час карбонізації зростає з його насипною щільністю.

Щільна вуглецева структура утворюється під час карбонізації, тому важливу увагу надають вивченню усадки лігніту. Більш міцний кокс виходить із брикету лігніту, який показує усадку під час карбонізації.

Важливим доказом є те, що сама по собі усадка майже не залежить від тиску брикетування. Вона визначається природною властивістю лігніту і може слугувати критерієм відбору.

Сама міцність виникає у два етапи: гаряче брикетування та карбонізація. На першому етапі важливим максимально ущільнити лігніт. Високий вміст аліфматичних вуглеців діє як структурний пластифікатор, вони мають sp^3 -гібридизацію, що додає макромелекулам гнучкості, полегшуючи деформацію вугільної матриці під час пресування.

Під час карбонізації (діапазон температур 500-600°C) відбувається ущільнення каркаса. Гаряче брикетування в комбинуванні з усадкою матеріалу сприяють усуненню великих пор (мезо та і макропор), які зазвичай і стають осередком тріщин і руйнування коксу під навантаженням.

Кокс з допомогою такого підходу показав різні показники міцності на розрив від 0,2 МПа до 31,2 МПа.

Основними висновками є: загальносприйняті структурні параметри лігніту(елементний склад, летючі речовин, зольність) не мали явного зв'язку з міцністю коксу, регресивний аналіз ЯМР спрогнозував міцність.

При цьому міцність коксу зростала зі збільшенням вмісту аліфматичного вуглецю, який забезпечував структурну гнучкість лігніту під час гарячого брикетування.[8]

Аналіз міжнародного досвіду свідчить, що технології брикетування(зокрема японські), мають глибоке наукове значення і відкривають значні перспективи для використання низькоякісного та слабоспікливого вугілля. Проте результати кожного дослідження демонструють суперечливу думку, де кінцевий успіх повністю залежить від двох факторів. Один з них це абсолютна залежність від сировини, навіть за ідентичних умов пресування та коксування, міцність продукту з різних марок лігніту показала колосальний розкид. При

цьому може виникнути технологічна суперечка, при спробі збільшити один показник частіше всього погіршується інший або група. Наведені наукові дослідження мають високу цінність, як і суміжні подібні матеріали, але вони не дають універсального шаблону [8].

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування впровадження технології беззв'язуючого брикетування на виробництво. Фізико-хімічні властивості беззв'язуючого брикетування

Доцільність можливого впровадження саме технології брикетування беззв'язуючого на виробництво, є нестільки як потреба, а реальна можливість оптимізувати виробництво під можливі майбутні законодавчі зміни та покращити технологію саме зараз.

Комплексна доцільність починається з екологічної безпеки та суттєвого покращення санітарно-гігієнічних умов праці. Як і раніше описувалось, традиційні методи з використанням зв'язуючих речовин, що реалізується з застосуванням суворого дотримання правил безпеки на виробництві.

Натомість перехід на метод термічної пластифікації повністю виключає необхідність застосування дорогих і канцерогенних компонентів. У результаті підприємство отримує можливість випускати екологічно чисте та повністю бездимне паливо, що кардинально знижує токсичне навантаження на довкілля та гарантує безпечні умови для персоналу.

Поряд з екологічними перевагами, ця технологія дозволяє забезпечувати значний економічний ефект та дозволяє оптимізувати виробничі потужності. Відмова від закупівлі високовартісних з'єднувальних реагентів безпосередньо впливає на рентабельність, відчутно знижуючи загальну собівартість кінцевої продукції.

Проте головна фінансова вигода полягає саме у кардинальному спрощенні самої апаратурної схеми, адже виробництву більше не потрібна складна технологічна лінія для підготовки зв'язуючого матеріалу, яка зазвичай включає різноманітні ємності, нагрівальні апарати, системи перекачувальних насосів та

розгалужену мережу трубопроводів із паровими сорочками. Усунення цих інфраструктурних вузлів різко зменшує експлуатаційні витрати.

Крім того, такий підхід сприяє масштабній утилізації промислових відходів та забезпечує раціональне ресурсокористування.

Гірничо-металургійний комплекс генерує величезні обсяги побічних продуктів, зокрема високозольні шлами, які часто просто скидаються у відстійники без жодного подальшого збагачення.

Метод беззв'язуючого брикетування відкриває перспективні шляхи для ефективного перетворення цих неліквідних залишків, таких як вугільна дрібниця, шлами та антрацитові штиби, на повноцінне паливо.

Використання відходів виробництва як сировинної бази дозволяє не лише звільнити корисну площу, зайняти шламовідстійниками, але й перетворити серйозну екологічну проблему на високоприбутковий напрямок діяльності.

Усе це в комплексі призводить до суттєвого підвищення конкурентоспроможності готової продукції та розширення потенційних ринків збуту.

Брикети шихти, створені методом пластифікації, характеризуються високими споживчими якостями, що дозволяє забезпечити потреби виробництва або збуту надлишку як продукту.

Фундаментальний механізм формування монолітних паливних елементів, а саме шихти без залучення зовнішніх хімічних добавок базується на використанні природних термопластичних властивостей самої вугільної шихти. Головна перевага цього підходу полягає в тому, що структурна цілісність досягається суто фізико-механічними шляхом під впливом температур, без втручання в хімічний склад інертних компонентів суміші.

Ключовим етапом технології є контрольоване нагрівання матеріалу, оскільки доведено, що вугілля марок Г (газове) та Ж (жирне) здатне розм'якшуватися, переходячи у пластичний стан. Ця критично важлива фаза пластичності формується в температурному коридорі від 325 – 425 °С, а в міру

подальшого протікання термохімічних перетворення матеріал переходить у процес затвердіння від 397 - 475 °С.

Перебуваючи у високотемпературному розігрітому стані, частка газового або жирного марок вугілля, починає виконувати функцію вискоєфективного природного пластифікатора, який тонким шаром обволікає інертні фракції шихти, зокрема частинки антрациту, що залишаються фізично незмінними. Після цього під дією значного механічного тиску від робочих органів пресу суміш щільно злипається і формується в міцний монолітний брикет.

Згідно з дослідженнями, для забезпечення максимальної стійкості готового продукту частка вугілля-пластифікатора в загальній масі шихти має становити від 20% до 40%. Для стабільного отримання продукції високої якості вимагається дотримання робочого діапазону технологічних параметрів, де оптимальних режим передбачає рівномірне нагрівання вугільної суміші протягом 30-40 хвилин до досягнення робочої температури 400-425°C.

Пресування розігрітої маси здійснюється під постійним навантаженням, яке має варіативність в межах 177-283 кг/см².

Варто відзначити, що при адаптації технології переробки бурого вугілля технологічний тиск пресування може сягати 1000 кг/см² (або понад 100 МПа). Внаслідок інтенсивного термічного та механічного впливу фіксується незначна втрата загальної маси продукту на рівні 3-5%, що зумовлена випаровуванням води (близько 0,18-0,21%) та вивільнення летких речовин, водночас спостерігається мінімальне зростання частки золи на 0,5-1,0% порівняно з вихідною сировиною.

Незважаючи на ці зміни, кінцевий продукт набуває винятково високих фізико-механічних показників: механічна міцність на стиск сягає 55-100кг/см², а міцність на скидання демонструє стійкість на рівні 81-88%. Крім, цього, брикети відзначаються чудовою водостійкістю, зберігаючи понад 47% своєї початкової міцності після впливу води. З точки зору термостійкості отримані брикети є стабільними, згорання відбувається рівномірно і поступово.[9]

2.2 Технологічна схема беззв'язуючого брикетування

Як і раніше описувалось, реалізація циклу беззв'язуючого брикетування шляхом термічної пластифікації дозволяє радикально спростити інфраструктуру підприємства, при цьому вирішується питання за рахунок також громіздких та енергоємних вузлів підготовки, резервуарів, спеціалізованих насосів та розгалуження парової системи.

Початковим технологічним ланцюгом є переведення шихти у пластичний стан, що вимагає фактичного застосування потужних нагрівальних установок.

У промислових умовах для цього використовуються трубчасті або шахтні печі безперервної дії, здатні забезпечити стабільний нагрів маси до температури діапазону 350-500 °С.

Для контролю точності термічного режиму обладнання оснащується автоматичними регуляторами температури та термопарами, які при цьому дозволяють контролювати і відстежувати стан суміші в режимі реального часу. Така точність необхідна саме для досягнення фази розм'якшення вугілля-пластифікатора та запобігання затвердінню.

Одним із найбільш критичних та технологічно важливих елементів усієї виробничої лінії є модернізований пристрій подачі вугільної шихти безпосередньо в робочу зону деформації.(рис.2.1)[10]. Цей механізм розроблений для подолання проблеми витіснення повітря, що викликає небажане псевдозрідження матеріалу.

Пристрій працює наступним чином, а саме. Формована суміш, з завантажувального бункера 1 транспортується на рештак 2, який має коробчасту форму з радіусами заокруглення, що запобігають налипанню суміші. Скребки 10 транспортують суміш у зону пресування . Встановлений наприкінці рештака ролик 3 ущільнює суміш. Ролик 3 і рештак 2 утворюють коробчастий переріз, що запобігає просипанню суміші. Під час транспортування суміш розподіляється по рештаку 2 за рахунок скребок 10 і ролика 3 та до вальців 7 і 8 надходить у вигляді

рівномірно ущільненої стрічки заданого перерізу. Ролик 3 дозволяє контролювати величину перерізу [10].

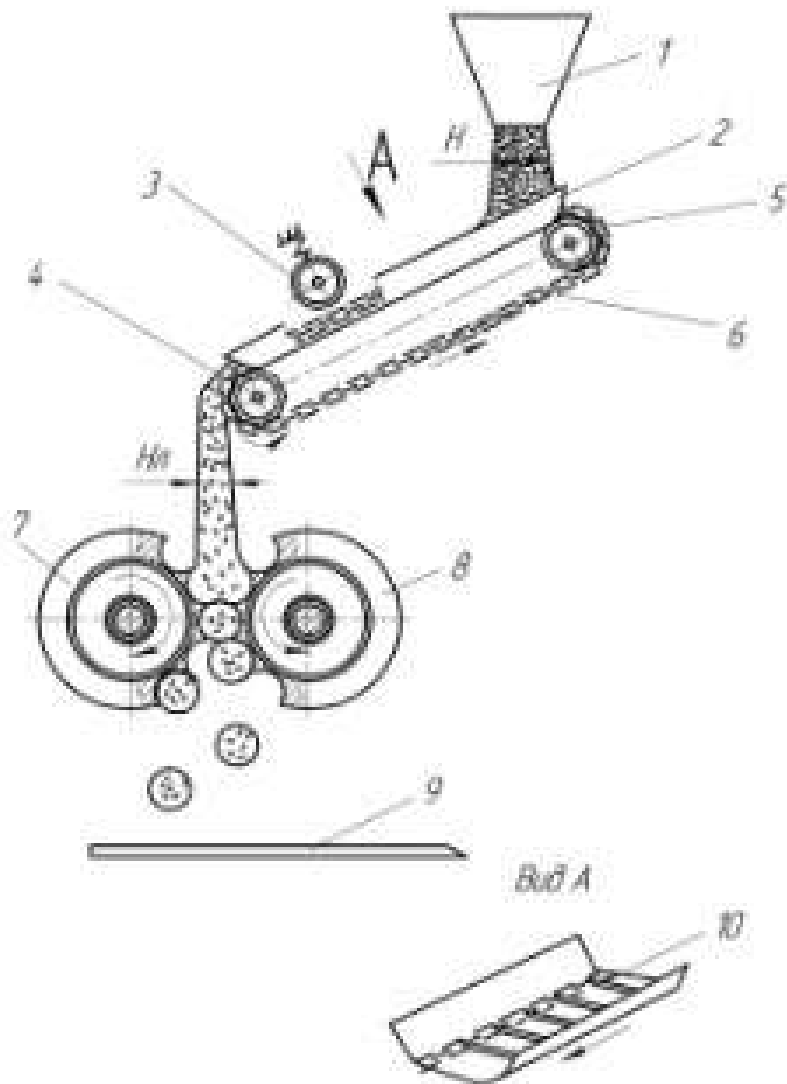


Рис. 2.1 Вальцовий брикетний прес

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням[10]

З цього виходить що до плюсів і особливостей можна віднести масивність та стійкість до вібрацій за рахунок рами, у якій на посилених підшипникових вузлах змонтовані два горизонтально розташовані валки, що приводяться в синхронне зустрічне обертання від потужного електропривода.

При цьому самі валки мають складену структуру і формуються з центральної несучої ступиці та зовнішніх робочих елементів, бандажів.

Оскільки робоча поверхня безперервно піддається інтенсивному абразивному зносу та колосальним термічним навантаженням. Використання саме знімних бандажів є оптимальним рішенням. Що дозволяє оперативно проводити технічне обслуговування та заміну без демонтажу всього агрегату.

Безпосередньо на зовнішній циліндричній поверхні бандажів у геометрично правильній послідовності розташовані спеціальні лінзоподібні слоти. Саме в цих матрицях під постійним питомим тиском пресування, який для різних складів варіюється в межах $177\text{--}283\text{ кг/см}^2$, відбувається остаточне формування надщільної монолітного брикету.

Завершальну стадію виробничого процесу ефектно забезпечує приймальний транспортер, який конструктивно розташований безпосередньо під вальцовим блоком. Оскільки сформовані брикети випадають із матриць від впливом власної ваги в дуже розпеченому або гарячому стані, транспортерна стрічка обов'язково виготовляється з високоміцних термостійких матеріалів.

Швидкість руху транспортера суворо синхронізується з продуктивністю вальцового пресу для м'якого прийому та запобігання механічного пошкодження або деформації ще не остаточно затверділих паливних елементів. Надалі брикети застосовуються як однорідне паливо чи разом в суміші з шихтою для заповнення можливих пустот за потреби.

2.3 Оцінка на процес коксування і якість коксу

Впровадження технології використання брикетування шихти з беззв'язуючим методом є одним із найефективніших інструментів інтенсифікації сучасного коксохімічного виробництва, що дозволяє комплексно впливати як на динаміку термохімічних перетворень у коксових печах, так і на кінцеві експлуатаційні характеристики металургійного палива.

Як, відомо, традиційна вугільна шихта вільного засипання об'єктивно характеризується значним об'ємом міжзернових порожнин та високою макропористістю.

Такий стан завантаження вкрай негативно впливає на процес спікання, оскільки збільшена відстань між вугільними частинками перешкоджає іншому ефективному злиттю під час термічної деструкції.

Проте застосування методу беззв'язуючого брикетування докорінно змінює цю фізико-хімічну ситуацію, забезпечуючи максимальну оптимізацію насипної густини та надійну компенсацію природного дефіциту рідкої фази.

Зокрема, в існуючих умовах сучасного виробництва надмірне введення до складу шихти слабоспікливого вугілля, а саме марок Г (газове), ПС (піснувато-спікливе) або П (пісне) закономірно провокує критичний дефіцит рідкої пластичної маси під час нагрівання.

Проведення попереднього пресування заданої частки вугільної суміші за умов постійного високого тиску в діапазоні 177-283 кг/см² забезпечує максимальне просторове зближення вугільних зерен. Такий рівень інтенсивного механічного ущільнення призводить до того, що навіть незначного обсягу пластичної фази виявляється цілком достатньо для повноцінного змочування твердих частинок та утворення надійних зв'язків.

Завдяки цьому виникає технологічна можливість створення високоміцного коксового моноліту з різнорідних шихтових композицій, які від природи характеризуються слабкою здатністю до спікання.

З іншого боку, подібна структурна модифікація вугільного завантаження закономірно спричиняє кардинальні зміни теплофізичної та аеродинамічної обстановки в камерах коксування. Інтеграція 30-40% високощільних брикетів у пухке середовище базової шихти стрімко підвищує сумарну насипну масу матеріалу.

Під час ранніх стадій піролізного розкладання такий стан має яскраво виражений позитивний ефект. Зростає теплопровідність завантаження (сприяє більш швидкому та рівномірному прогріванню масиву від обігрівальних простінків углиб камери. Одна, надмірно ущільнена структура чинить значний газодинамічний опір потокам летких продуктів, які інтенсивно виділяються під час термічної деструкції вугілля. Відповідно, виникає гостра потреба у

високоточному регулюванні температурного та гідравлічного балансу батареї, оскільки надмірний тиск розпирання здатен викликати незворотні деформації та пошкодження кладки і самої батареї.

Незважаючи на експлуатаційні особливості процесу, ключова економічна перевага технології полягає безпрецедентному розширенні сировинних можливостей виробництва. Виробництво отримує змогу цілеспрямовано зменшувати у складі шихти відсоток дорогого і важкодоступного коксівного вугілля (К та КЖ).

Вивільнені обсяги ефективного заміщуються економічного вигіднішими марками (пісним чи газовим вугіллям) або інертними промисловими залишками, такими як високозольні шлами чи антрацитові штиби. Після проходження етапу термомеханічного пресування ці компоненти втрачають свої негативні властивості і починають працювати як стабілізуючі елементи, підтримуючи монолітність вугільного пирога на етапі спікання.

Аналізуючи вплив методу на кінцеву якість металургійного коксу, варто підкреслити, що паливо з частково спресованої шихти демонструє беззаперечну перевагу над традиційними аналогами за всіма критеріями. Під час високотемпературної обробки розсіяні в пухкому середовищі брикети перетворюються на своєрідні центри ущільнення.

На стадії піролізних перетворень вони безшовно зливаються з навколишнім матеріалом, генеруючи на виході структурно однорідний моноліт без виражених внутрішніх тріщин чи зон послаблення. Це призводить до різкого підвищення механічної міцності до скидання, тобто стійкості до руйнування від ударів (показник M_{25}). Водночас фіксується суттєве падіння індексу стираності (M_{10}), що відіграє першочергову роль у мінімізації утворення дрібного пилу та підтримці більш-менш ідеальної газопроникності в доменних агрегатах.[9]

Окрім, покращення показників міцності, брикетування сировинної бази позитивного впливає на характеристику післяреакційної міцності (CSR) та пропорційно знижує показник реакційної здатності (CRI).

Враховуючи, що сучасні умови доменної плавки вимагають збереження жорсткості коксового каркаса в зоні горіння фурм за критично високих температур, визначальним фактором стає максимальна щільність вуглецевої матриці. Низька пористість отриманого палива створює фізичний бар'єр для дифузії агресивних газових середовищ у тіло шматка, істотно гальмуючи перебіг взаємодії з діоксидом вуглецю (реакція Будуара).

Як наслідок. Гаряча міцність (CSR) впевнено фіксується в межах цільових 55-60%, забезпечуючи надійний захист від передчасного деградування вуглецевої основи в нижній зоні доменної печі.

При тому, також є особливістю, що введення пресованих елементів у шихту веде до глибокої стабілізації гранулометричних характеристик готового коксу. Завдяки цій методиці формується крупний і максимально однорідний за розміром продукт, де переважають фракції 45-55 мм. Разом з тим, генерація небажаного коксового дріб'язку (шматки менше 10 мм) зводиться до практичного мінімуму.

Як і раніше зазначалось, міжнародні дослідження визначили певне покращення брикетування. При нагріванні вугілля до полімерних температур від 150-250°C під дією високого тиску пресування від 25 до 120 МПа і більше – руйнується жорстка просторова структура вугільних мікрочастинок. Вони зазнають пластичної деформації, максимального ущільнення та витісняючи капілярну вологу і защемлені гази.

Зближення частинок на відстані молекулярної взаємодії призводить до формування міцних міжмолекулярних зв'язків між функціональними групами, самі компоненти починають діяти як зв'язуюче. Отримані сирі брикет мають високу початкову щільність. Під час подальшої високотемпературного коксування, відбувається інтенсивне виділення летких речовин, що супроводжується колосальною усадкою брикету на рівні 40-45%. Ця усадка не руйнує матеріал, а навпаки, зміцнює його. Перетворюючи брикет на надміцний вуглецевий моноліт. Технологічний вплив різних параметрів на якість коксу можна візуалізувати, для цього, до прикладу можна взяти три типи

вугільної шихти: лігніт (рис.2.2), слабоспільне вугілля (рис.2.3), антрацитовий дріб'язок (рис.2.4). Для більш рівномірного розуміння, будуть взяти однакові технологічні показники: тиску 120 МПа, температура 200°C.

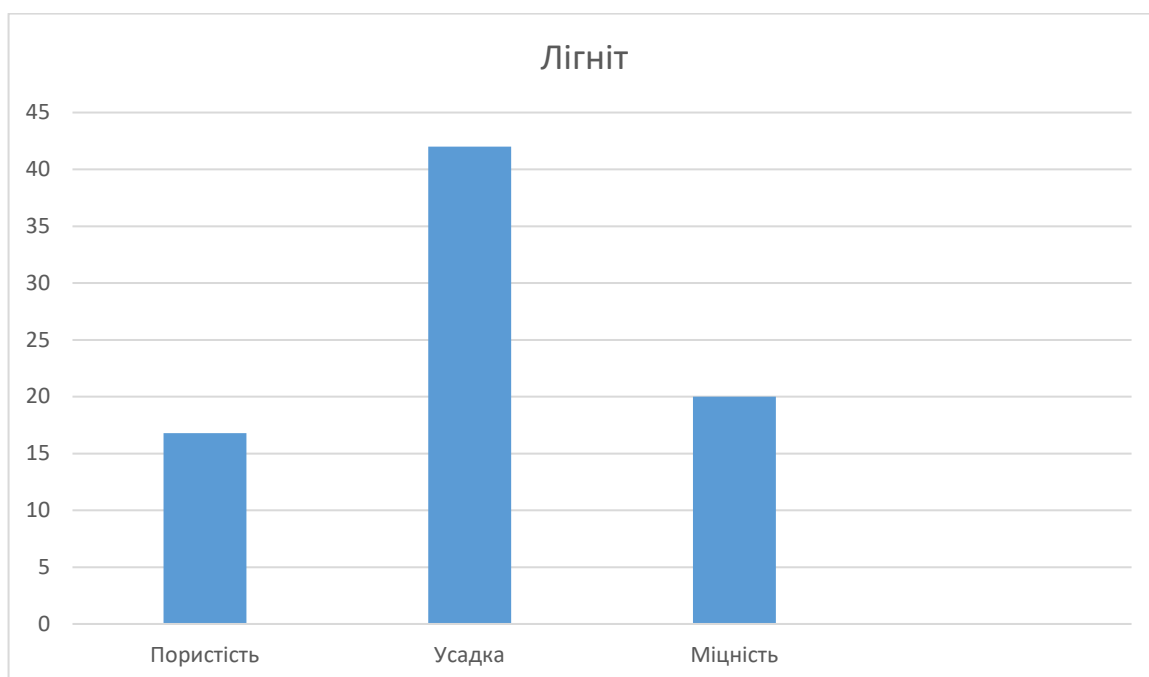


Рис.2.2 Лігніт

Примітка. Джерело: Розроблено автором

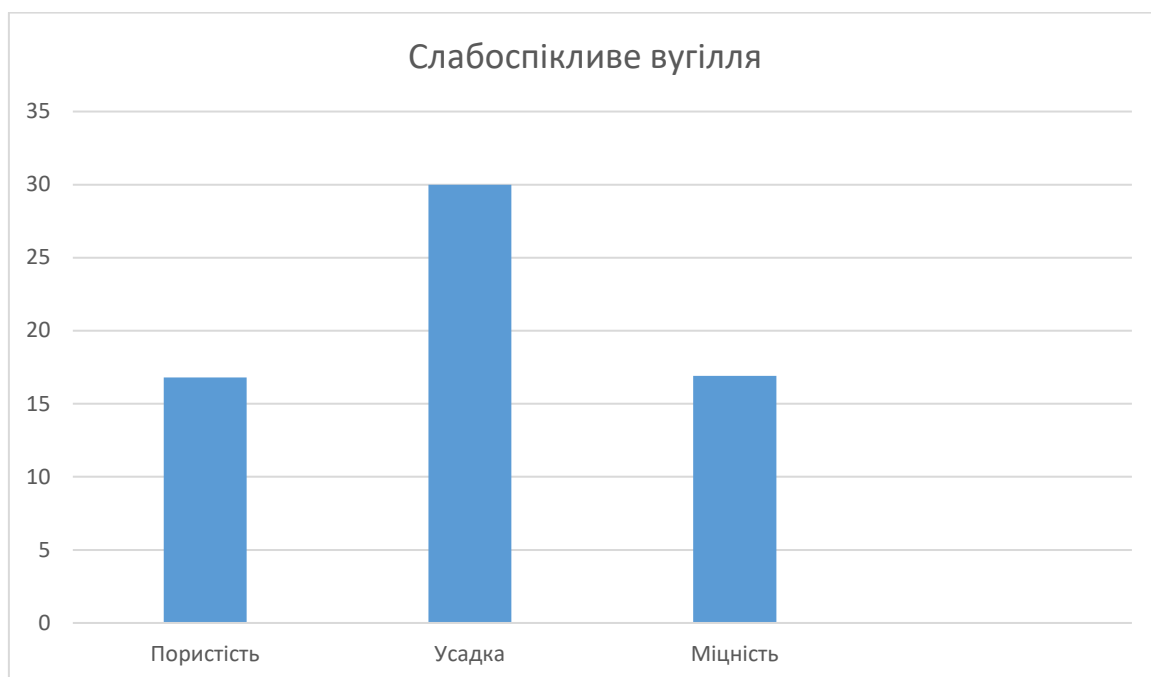


Рис.2.3 Слабоспільне вугілля

Примітка. Джерело: Розроблено автором

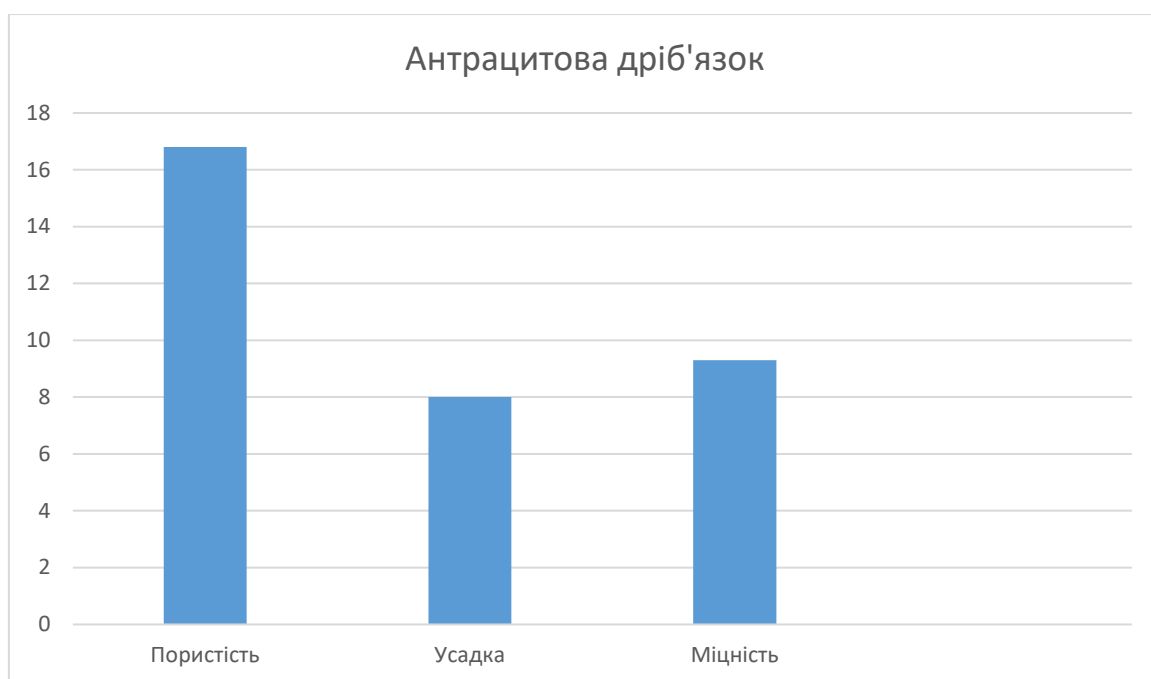


Рис.2.4 Антрацитовий дріб'язок

Примітка. Джерело: Розроблено автором

Розглядаючи ці діаграми, можна помітити тенденцію при котрій, не лише умовний технологічний показник впливає на якість брикетування, а і вхідна сировина (Табл. 2.1)

Таблиця 2.1

Порівнювальна характеристика

№	Назва	Пористість	Усадка	Міцність
1	Лігніт	16,9	41,8	20,0
2	Слабоспілкове вугілля	16,9	29,9	16,7
3	Антрацитовий дріб'язок	16,9	8,0	9,2

Джерело. Примітка: Розроблено автором

Аналіз даних таблиці дозволяє оглядово виявити фізико-хімічну закономірність, попри однакові початкові значення загальної пористості сирих

брикетів(16,9%), кінцева механічна міцність карбонізованого коксу демонструє суттєву залежність від генетичного типу вугілля та його термохімічних властивостей.

У випадку лігніту, висока міцність(20 МПа) досягається за рахунок того, що беззв'язкове гаряче брикетування, ефективно ліквідує найбільш небезпечні дефекти структури, а саме макропори. Які зазвичай є основоположниками майбутнього поганої механічної міцності. Натомість для антрацитового дріб'язку, який термічно інертним матеріалом і не переходить у пластичний стан, пориста структура після випалу характеризується наявністю великої кількості міжзернових порожнин. При цьому усадка складає всього 8% не забезпечуючи належне зближення вуглецевих атомів, через що показник міцності залишається на критичному низькому рівні 9,2 МПа. З цього виникає, що зв'язок між характером термічної трансформації брикету та підвищення насипної густини шихти є ключовим фактором, що описує важливість безпеки впровадження цієї технології.

Традиційне підвищення насипної густини(наприклад, трамбування всієї вугільної маси) закономірно призводить до небезпечного зростання внутрішнього тиску розпирання на динасові стінки коксових печей, що обмежує інтенсифікацію виробництва. Проте, впровадження технології беззв'язуючого брикетування з частковим наповненням пісчаною шихтою, дозволяє обійти це. Висока об'ємна усадка брикетів із низькоранговим виділенням летких речовин, виступає як інструмент зменшення тиску розпирання. У той час як загальна насипна густина завантаженої шихти зростає(що забезпечує стандартизовано продуктивність камери), локальне стиснення та зменшення об'єму самих брикетів усередині пластичного шару компенсує термічне розширення навколишньої пухкої порошкоподібної маси. Це гарантує збереження гідравлічного балансу батареї та виключає ризик деформації кладки, навіть при максимальних показниках ущільнення. Та все одно не всі теоретичні дані можуть бути актуальними, враховуючи особливість кожної сировинної бази або технологічного обладнання, споруд. Для більш ілюстративного розуміння,

прикладом є блок-схема брикетування молодого бурого вугілля зі своїми особливостями[11](Рис. 2.5).

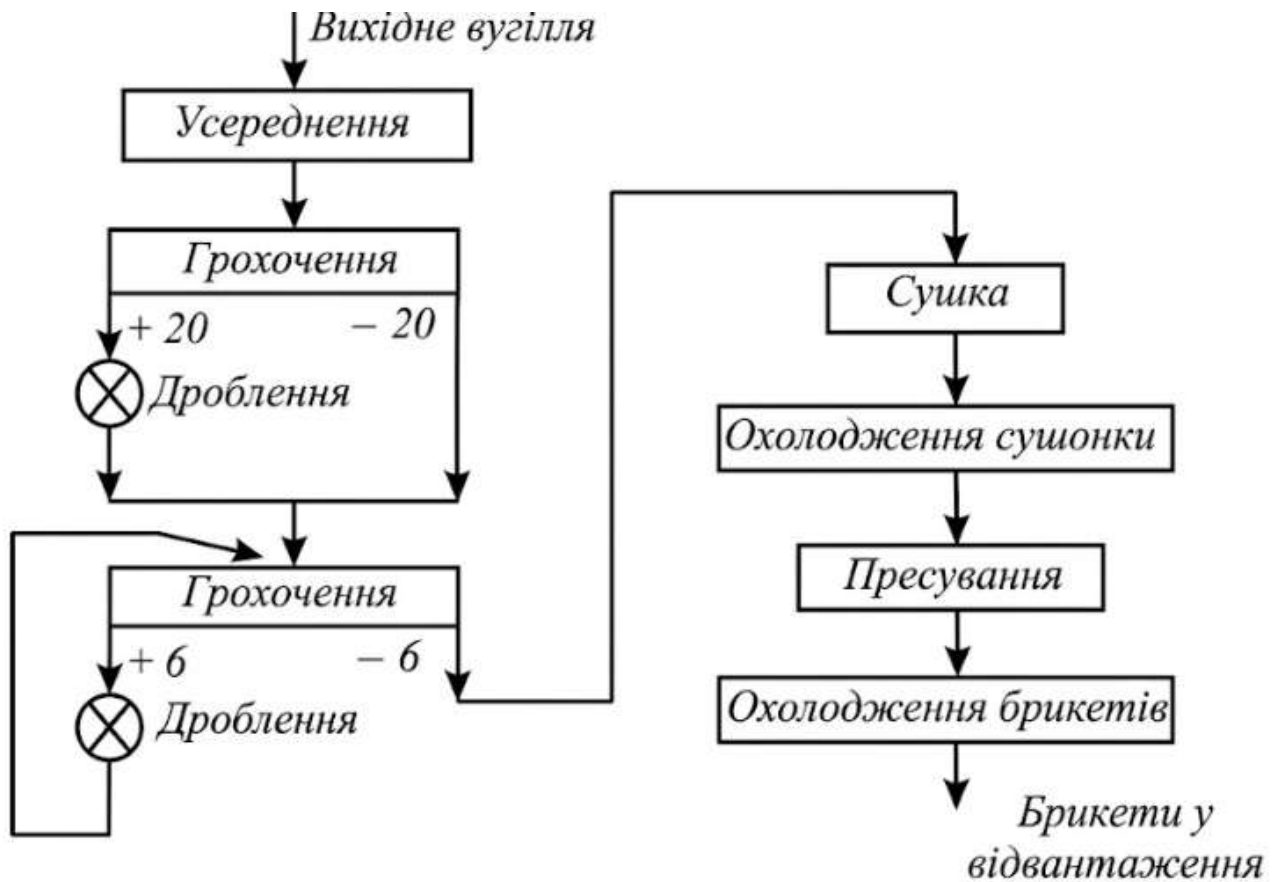


Рис. 2.5 – Схема брикетування молодого бурого вугілля

Джерело. Примітка: Розроблено з виконанням[11]

2.4 Охорона праці та захист навколишнього середовища

Створення стандартних можливих умов на виробництві виступає не тільки як гарантія технологічного процесу перетворення сировини в готовий продукт для реалізації. При цьому охорона праці регламентується законодавчими ініціативами, наприклад «Державні санітарні правила для підприємства порошкової металургії» [12].

Інтеграція технології беззв'язуючого брикетування вугільної шихти розглядається не виключно як засіб оптимізації техніко-економічних показників, а як один із можливих фундаментальних варіантів для формування екологічно безпечного металургійного комплексу.

Традиційні методи до підготовки шахтових матеріалів та підвищення насипної густини історично супроводжуються значним техногенним навантаженням на біосферу.

Натомість інноваційний метод термічної пластифікації пропонує принципово інший підхід, котрий дозволяє звести до мінімуму вплив на навколишнє природне середовище.

Основною екологічною перевагою та ключовим фактором зниження токсичності виробництва при переході на беззв'язуюче брикетування є абсолютна відмова від використання будь-яких додаткових реагентів котрі виконують роль клею.

Як раніше і описувалось, класичні методики брикетування з використанням зв'язуючим пов'язані найчастіше з кам'яновугільним пеком, різноманітними органічними смолами, бітумом або технічним лігносульфонатом.

Процеси термічної підготовки, змішування, пресування із залучення таких компонентів ініціюють інтенсивне виділення канцерогенних речовин та летких органічних сполук у атмосферне повітря. Використання ж внутрішнього можливого потенціалу, зокрема марок Г(газове) та Ж(жирне) переходити у пластичний стан і виконувати роль природного пластифікатора – повністю надає можливість локалізувати це потужне джерело промислових викидів.

В самому результаті цих дій, виробництво отримує можливість генерувати екологічно чисте, бездимне паливо, що відповідає екологічним нормам. При цьому, враховується, що екологічні норми найчастіше всього мають доволі жорсткі рамки і потрібно розробляти технологію згідно того, щоб була проміжна зона екологічності, котра дасть виробництву можливість для корегування виробничих потужностей згідно майбутнього чи чинного законодавства.

Окрім, зниження атмосферних викидів, подібна технологія слугує високоефективним механізмом раціонального природовикористання та глибокої переробки промислових відходів гірничо-металургійного сектору.

Подібний метод дозволяє безперешкодно від умов виробництва, інтегрувати у виробничий цикл вторинні матеріали, які раніше вважалися неліквідними залишками (дрібнодисперсні фракції та антрацитові штиби).

Систематична переробка та раціональне використання, сприяє масштабному вивільненню земельних ресурсів, що знаходяться на полігонах або ж збереження початково ресурсу в довкіллі.

Не менш важливим, окрім безпеки самого виробничого процесу, є працівники виробництва, котрі виконують загалом оперативну роль у виробництві.

Технологічна модернізація виробничих потужностей шляхом виведення додаткових вузлів, котрі були описані раніше (трубопроводи, резервуари, змішувачі, подрібнювачі, дозатори), створює безпосередній вплив на якісне поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці робітників від вуглепідготовчого цеху та і до загальної якості повітря на території виробництва.

Це також гарантує відсутність контакту обслуговуючого персоналу з агресивними випарами, що суттєво знижує ризик розвитку професійних захворювань і зменшень виплат виробникам, що гарно впливає на економічний фактор також.

Проте, зважаючи на специфіку інноваційного технологічного методу, експлуатація беззв'язного брикетування супроводжується появою нових виробничих чинників, котрі потребують розробки нових стандартизованих операційних процесів і їх суворого виконання для забезпечення охорони праці.

Оскільки виробничий алгоритм процесу передбачає переведення вугільної шихти у пластичний стан, пріоритетним завданням постає повне нівелювання ризиків ураження працівників тепловим випромінюванням та запобігання термічним опікам різних рівнів.

Для досягнення цієї мети всі без винятку нагрівальні агрегати, робочі зони, а також конвеєрні лінії, що транспортують розпечений брикет, в обов'язковому порядку обладнуються багатошаровою теплоізоляцією підвищеної ефективності.

Задача цього кожуху це захист працівників та збереження температурного рівня під час всіх процесів. Не менш важливим існуючим аспектом є безпека при роботі з обладнанням котре нагнітає і має високий тиск.

Сам процес консолідації та остаточного формування вугільного моноліту в робочих матрицях вальцових або інших пресах відбувається під великим тиском, котрий в межах від 177-283 кг/см², а в окремих випадках може бути й значно вищим.

Безпечна експлуатація таких потужних систем вимагає не лише бездоганного дотримання регламентів плавно-попереджувальних ремонтів, але й застосування жорстких конструктивних розроблених заходів.

При цьому, обов'язковою умовою є встановлення глухи захисних кожухів на всіх рухомих елементах приводу, включаючи бандажі та синхронізуючі механізми. Виробнича лінія оснащується чутливими датчиками тензометрії та сучасними автоматичними блокіраторами, які здатні миттєво зупинити роботу агрегату у разі виявлення надмірних перевантажень або потрапляння сторонніх твердих предметів у міжвалковий простір.

Це загалом зменшує вплив людини на процес і створює умови при котрих робітник мінімально взаємодіє і лише за потреби. Не менш важливим є базове розуміння розмежування зон взаємодії та створення контрольних точок безпеки де стабільно працівник може бути в безпеці.

Загалом, до базових безпекових умов можна віднести. Створення розгалуженої системи тушіння залежно від обладнання використовують певну субстанцію, максимально можливе освітлення на небезпечних і прохідних ділянках. Створення вентиляційної системи з контролюючими елементами. Контроль базових показників вологи і температури, а також встановлення статистичних газоаналізаторів за межами обладнання.

ВИСНОВКИ

В умовах дефіциту високоякісного коксівного вугілля та виснаження традиційних родовищ, використання слабоспівливого вугілля або антрацитових штибів та вторинних відходів вуглезбагачення є критичною необхідністю в майбутньому, враховуючи можливу кризу видобування копалин. При цьому аналіз існуючих сучасних методів підвищення насипної густини, такі як трамбування, пресування чи брикетування. Показали свої технологічні плюси та можливі проблеми, при цьому подібні методики не є рішенням в загальному рівні для виробництва. Проте, спираючись на емпіричні дослідження як за межами України так і в самій країні. Було визначено, що найбільш оптимальним і екологічним методом є брикетування беззв'язуючим методом, а саме методу термічної деструкції, коли сама сировина виступає зв'язуючим матеріалом. Цей метод дозволяє повністю відмовитись від використання високовартісних і токсичних хімічних зв'язуючих речовин (пеків, бітумів, смол), використовуючи природну властивість термопластичних властивостей вугілля, шляхом контрольованого нагрівання до потрібних технологічних температур та подальшого пресування за зазначеним тиском. При цих встановлених умовах, технологічно отримується високоефективний брикет. Інтеграція таких брикетів у базову шихту, дозволяє ефективно компенсувати природний дефіцит рідкої фази під час коксування слабоспівливих сумішей. Як наслідок, утворюється металургійний кокс із суттєво покращеними експлуатаційними показниками: збільшення механічної міцності на руйнування та критично знижується стиранність. Низька пористість отриманого палива створює бар'єр, що гарантує високу гарячу міцність та мінімальну реакційну здатність. Вкрай важливим технологічним аспектом, є значна об'ємна усадка таких брикетів під час карбонізації ефективно компенсує небезпечний тиск розпирання, гарантуючи збереженості цілісності кладки коксових батарей. При цьому, впровадження даної технології має також вагомий економічний, технологічний, екологічний ефект. Хоча технологія брикетування

є доволі різноманітною і особливою у використанні, але не є однорідним рішенням загальному для кожного виробництва враховуючи різні фактори.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3472:2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація»
2. Збиковський Є. І. Хімічна технологія твердих горючих копалин: навчальний посібник / Є. І. Збиковський. – Покровськ: ДонНТУ, 2019 с.285
3. Конспект лекцій «Система технологій» «ДонДУУ» розділ 6.1 с.22
URL: <https://lnk.ua/j91VkMnem>
4. Мірошніченко Д.В., Соловйов Є.Л. Брикетування частини вугільної шихти або її компонентів. Матеріали МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ ІНТЕРНЕТ-КОНФЕРЕНЦІЇ «Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій» Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» URL: <https://lnk.ua/CJuQxAxto>
5. Сергєєв П. В., Білецький В. С. Дослідження брикетування антрацитових штибів // Збагачення корисних копалин. 2012. - Вип. 50 (91). - С.1-3.
6. Брикетування//Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Брикетування>
7. Панченко В. С. Звіт з переддипломної практики: звіт з практики на базі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
8. Nomura S. Effect of Coal Briquette Size on Coke Quality and Coal Bulk Density in Coke Oven. ISIJ International. 2019. Vol. 59, No. 8. P. 1512–1518.
URL/DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-704>
9. Characteristic Properties of Lignite To Be Converted to High-Strength Coke by Hot Briquetting and Carbonization/ Energy Fuels 2018, 32, 4, 4364–4371.
URL/DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03155>
10. Скляр П. Т., Филиппенко Ю. Н., Моисеенко О. В. Получение топливных брикетов из угольной и антрацитовой мелочи методом пластификации. Збагачення корисних копалин. 2012.

11. Зиборов К. А., Ванжа Г. К., Максименко Е. В., Прокопенко А. И. Устройство для предварительного уплотнения при брикетировании в вальцовых прессах. Збагачення корисних копалин. 2011. Вип. 46 (87).
12. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина III. Заклучні процеси. – Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2019. – 232 с.
13. Про затвердження Державних санітарних правил для підприємств порошкової металургії : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 18.12.1995 № 235. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0354-96>

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА
про підготовку здобувача

Панченко Володимир Сергійович
(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 Впровадження технології брикетування без зв'язуючого для підвищення насипної густини в камері коксування

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

Оцінки по розділах роботи

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

Зав. кафедри _____

(підпис)

К.О. Шмельцер

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

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

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

бакалавра

Здобувача Панченко Володимира Сергійовича

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-23ск

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра

Впровадження технології брикетування без зв'язуючого для підвищення
насипної густини в камері коксування

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	62;
таблиць	12;
схем і рисунків	9;
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	-.

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи бакалавра

Робота присвячена актуальній проблемі сучасної коксохімічної є промисловості – раціональному використанню вугільних ресурсів в умовах дефіциту високоякісного коксівного вугілля та необхідності залучення до виробництва слабоспівного вугілля, антрацитових штибів і відходів вуглезбагачення.

Враховуючи сучасні тенденції виснаження якісної сировинної бази, обрана тема своєчасною та має важливе практичне значення.

У роботі проведено аналіз сучасних методів підвищення насипної густини вугільних шихт, зокрема трамбування, пресування та брикетування.

Автором розглянуто їхні технологічні переваги та обмеження, а також обґрунтовано доцільність використання беззв'язуючого брикетування на основі термічної деструкції вугілля. Особливу увагу приділено механізму формування брикетів без застосування додаткових хімічних зв'язуючих речовин та впливу таких брикетів на процес коксування.

Практичне значення роботи полягає у можливості розширення сировинної бази коксування за рахунок використання низькосортної вугільної сировини та відходів вуглезбагачення, що сприяє підвищенню ефективності виробництва і зменшенню негативного впливу на довкілля.

Недоліки кваліфікаційної роботи бакалавра

(бакалавра, магістра)

У роботі доцільним було б розширити аналіз впливу складу брикетів на показники гарячої міцності коксу та його реакційну здатність; недостатньо детально розглянуто можливі технологічні труднощі масштабування процесу беззв'язуючого брикетування у промислових умовах.

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

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

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

Можливість використання кваліфікаційної роботи бакалавра

Розроблені рішення та рекомендації по брикетуванню вугільних шихт без зв'язуючого можуть бути впровадженні на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавра

Керівник Десна Наталя Анатоліївна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Доцент, к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

« ____ » _____ 20__ р.

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

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

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

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

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

12.06.2026

Д О В І Д К А

про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):

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

Впровадження технології брикетування без зв'язуючого для підвищення насипної густини в камері коксування

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

ПАНЧЕНКО Володимир Сергійович

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії,

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 62 сторінок друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 0,72 %.

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 Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

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

Керівник підрозділу _____

(підпис)

К. Шмельцер

Дата «12» червня 2026 р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Хімічних технологій та інженерії

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

(бакалавра, магістра)

Здобувача Панченко Володимира Сергійовича

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи ХТ-23ск
Тема кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> (бакалавра, магістра)
Впровадження технології брикетування без зв'язуючого для підвищення насипної густини в камері коксування
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> (бакалавра, магістра)
Дослідження можливостей використання технологій брикетування для розширення сировинної бази коксування та покращення якості металургійного коксу
Переваги кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> (бакалавра, магістра)
У роботі проведено аналіз сучасних технологій ущільнення вугільних шихт, зокрема трамбування, пресування та брикетування. Автором виконано оцінку переваг і обмежень кожного з методів та обгрунтовано доцільність застосування беззв'язуючого брикетування на основі термічної підготовки вугілля. Показано, що використання власних термопластичних властивостей сировини дозволяє отримувати міцні брикети без додавання сторонніх зв'язуючих компонентів. Позитивними сторонами роботи є ґрунтовний аналіз науково-технічних джерел, логічна структура дослідження, належне обґрунтування технологічних переваг беззв'язуючого брикетування та розгляд можливостей його практичного застосування в коксохімічному виробництві. Важливим є висвітлення впливу брикетів на формування коксової структури, підвищення механічної міцності коксу, зниження його стиранності та покращення експлуатаційних характеристик.
Недоліки кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> (бакалавра, магістра)
Разом із тим робота містить окремі недоліки. Зокрема, наведені висновки переважно базуються на результатах аналізу літературних джерел та даних інших дослідників, тоді як обсяг власних експериментальних досліджень є обмеженим. Крім того, доцільним було б доповнити роботу детальнішими техніко-економічними розрахунками ефективності впровадження запропонованої технології та розглянути питання її масштабування в умовах діючих коксохімічних підприємств.
Рекомендації: У цілому бакалаврська кваліфікаційна робота виконана на належному теоретичному та практичному рівні, відповідає вимогам, що висуваються до робіт освітнього ступеня «бакалавр», а її автор заслуговує на присвоєння відповідної кваліфікації. Робота може бути рекомендована до захисту.
Рецензент

(прізвище, ім'я та по-батькові)

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)