

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії чорних металів
і ливарного виробництва

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної атестаційної роботи бакалавра
зі спеціальності 136 – Металургія

на тему: Підвищення ефективності агломераційного процесу за рахунок
оптимізації паливної складової шихти

Виконав:
студент групи МТ-22-1

Дмитро ГЕРАСИМЧУК

Керівник випускної роботи

Дмитро БАБОШКО

Нормоконтролер

Дмитро БАБОШКО

Т.в.о. завідувача кафедри

Дмитро БАБОШКО

Кривий Ріг
2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра: металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою

_____ Дмитро БАБОШКО

« ___ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до випускної атестаційної роботи бакалавра

ГЕРАСИМЧУКА ДМИТРА СЕРГІЙОВИЧА

1. Тема роботи: Підвищення ефективності агломераційного процесу за рахунок оптимізації паливної складової шихти.
керівник роботи: к.т.н., доцент Бабошко Д.Ю.
затверджено наказом по КНУ від «__19__»__02__2026 р. № 113с
2. Строк подання роботи студентом «__15__»__05__2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: хімічний склад та основність агломераційної шихти; фізико-хімічні властивості та гранулометричний склад твердого палива (коксовий дріб'язок, антрацит, вугілля); технологічні параметри процесу агломерації та схема підготовки паливної складової шихти
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): дослідження впливу параметрів твердого палива на показники агломераційного процесу та розробка раціональної схеми його підготовки.
5. Перелік графічного матеріалу: презентація (___ стор. формату А4)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	Оцінка альтернативних видів палива для заміни коксового дріб'язку в агломераційному процесі	січень 2026 р.
2	Методика проведення експериментальних досліджень та характеристики вихідних матеріалів	лютий 2026 р.
3	Дослідження впливу параметрів твердого палива на показники агломераційного процесу та розробка раціональної схеми його підготовки	березень 2026 р.
4	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	квітень 2026 р.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Дмитро ГЕРАСИМЧУК

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Дмитро БАБОШКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до роботи бакалавра на тему «Підвищення ефективності агломераційного процесу за рахунок оптимізації паливної складової шихти»: __78__ с., __5__ рис., __14__ табл., 17 літературних джерел.

Об'єктом дослідження є процес агломерації залізорудної шихти з використанням твердого палива.

Предметом дослідження є вплив виду, витрати, крупності та способів підготовки твердого палива на показники агломераційного процесу та якість отриманого агломерату.

У розділі 1 виконано аналіз наукових джерел щодо використання твердого палива в агломераційному процесі, його властивостей, гранулометрії та впливу на продуктивність і якість агломерату, а також сучасних підходів до раціональної підготовки палива.

У розділі 2 наведено методику експериментальних досліджень, описано підготовку шихти, порядок змішування та огрудкування, умови лабораторного спікання та методи визначення ключових технологічних показників.

У розділі 3 досліджено вплив виду, витрати та крупності палива на процес агломерації та якість агломерату, оцінено ефективність активації палива та запропоновано раціональну схему його підготовки для підвищення продуктивності та міцності продукції.

ТВЕРДЕ ПАЛИВО, АГЛОПРОЦЕС, КОКСОВИЙ ДРІБ'ЯЗОК, АНТРАЦИТ, КРУПНІСТЬ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, МІЦНІСТЬ

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.Р			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	Герасимчук				РЕФЕРАТ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Перевірив</i>	Бабошко						1	1
<i>Н. контр.</i>	Бабошко						МТ-22-1	
<i>Затвердив</i>	Бабошко							

ЗМІСТ

Вступ

1. Оцінка альтернативних видів палива для заміни коксового дріб'язку в агломераційному процесі.....	9
2. Методика проведення експериментальних досліджень та характеристики вихідних матеріалів.....	20
2.1 Методика спікання агломерату.....	20
2.2 Методика визначення металургійних властивостей агломерату.....	20
3. Дослідження впливу параметрів твердого палива на показники агломераційного процесу та розробка раціональної схеми його підготовки.....	27
3.1 Вплив фізико-хімічних властивостей палива на параметри процесу агломерації.....	27
3.2 Вплив виду твердого палива на продуктивність та якість агломерату.....	33
3.3 Вплив хімічної активації коксового дріб'язку на показники агломераційного процесу.....	38
3.4 Вплив витрати коксового дріб'язку на показники агломераційного процесу та якість агломерату.....	43
3.5 Вплив крупності твердого палива на показники агломераційного процесу та якість агломерату.....	50
3.6 Розробка та обґрунтування раціональної схеми підготовки твердого палива для агломераційного процесу.....	55
Загальні висновки.....	63
Список використаних джерел.....	65

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.3					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ЗМІСТ			<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Герасимчук</i>								1	1
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>									
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							МТ-22-1		
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>									

ВСТУП

Агломераційне виробництво є ключовою ланкою металургійного циклу України, оскільки забезпечує доменні печі окускованою сировиною, від якості якої залежать газодинаміка плавки, інтенсивність відновлення та питомі витрати коксу. Водночас стабільність процесу спікання безпосередньо визначається станом паливної складової шихти, і галузь стикається з гострим дефіцитом основного технологічного палива — коксового дріб'язку. За наявних виробничих потужностей понад 40 млн тонн агломерату на рік щорічна нестача цього ресурсу сягає до 4,0 млн тонн, що створює ризики для безперервної роботи підприємств. Додатковим ускладненням є зростання попиту на дрібні класи коксу з боку інших споживачів, що підсилює ресурсні та економічні обмеження агломераційного виробництва.

У таких умовах аглофабрики змушені вдаватися до використання економічно менш доцільних варіантів, зокрема коксового горішка (фракція +25 мм) з подальшим його дробленням або безпосереднім введенням у шихту. Це призводить до погіршення гранулометричного складу паливної складової, порушення теплового режиму спікання та зниження техніко-економічних показників процесу. Одночасно зростають питомі витрати палива, знижується продуктивність агломашин і погіршується якість готового агломерату за показниками міцності та виходу придатного продукту.

У пошуках вирішення проблеми дефіциту коксового дріб'язку металурги розглядають можливість його заміщення альтернативними видами твердого палива, зокрема антрацитовим штибом, однак обмеженість його ресурсної бази та жорсткі вимоги до фізико-хімічних характеристик ускладнюють широке впровадження. Це обумовлює необхідність дослідження інших видів палива та комплексної оцінки їх впливу на тепловий режим агломерації — температуру займання, швидкість горіння, формування зони спікання та газодинаміку шару.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.ВС			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Герасимчук</i>						1	2
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>							
						МТ-22-1		

Отже, проблема паливного забезпечення потребує не лише пошуку замітника коксу, а системної оптимізації паливної складової шихти, включаючи її гранулометричний склад, витрату та організацію розподілу палива по висоті шару для забезпечення стабільного процесу спікання та високої якості агломерату.

З огляду на викладене, пошук, наукове обґрунтування та впровадження ефективних технологічних рішень, спрямованих на зниження споживання дефіцитного коксового дріб'язку без погіршення виробничих показників, є актуальним і стратегічно важливим завданням для металургійних підприємств України.

Дана робота спрямована на розробку та дослідження підходів до підвищення ефективності агломераційного процесу за рахунок оптимізації паливної складової шихти, включаючи раціоналізацію витрати палива, удосконалення його підготовки та оцінку впливу різних варіантів організації процесу спікання на продуктивність агломашини та механічну міцність готового агломерату.

1 ОЦІНКА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА ДЛЯ ЗАМІНИ КОКСОВОГО ДРІБ'ЯЗКУ В АГЛОМЕРАЦІЙНОМУ ПРОЦЕСІ

Пошук та експериментальне обґрунтування заміників коксового дріб'язку є критично важливим завданням для забезпечення стабільності та рентабельності агломераційного виробництва. Аналіз сучасних досліджень свідчить, що ефективність інтеграції альтернативних видів твердого палива визначається їх температурою займання, реакційною здатністю, вмістом коксового залишку, гранулометричним складом і впливом на газодинаміку шару та тепловий профіль зони спікання [1–3]. Аналіз потенційних альтернатив показує, що далеко не кожен вид палива може бути технологічно доцільно використаний у процесі агломерації через жорсткі фізико-хімічні та експлуатаційні вимоги, зокрема необхідність забезпечення стабільного фронту горіння та достатнього утворення рідкої фази для формування міцної структури агломерату [2, 4].

Спроби часткової або повної заміни коксового дріб'язку газоподібним (природний газ) та рідким паливом (мазут) у практиці агломераційного виробництва не набули широкого промислового застосування. Аналіз літературних джерел показує, що основними обмежувальними факторами є як економічні, так і технологічні аспекти [1, 2]. Передусім, використання природного газу та мазуту супроводжується суттєвим зростанням собівартості агломерату через вищу ринкову вартість цих енергоносіїв порівняно з твердими видами палива [1, 5]. Крім того, специфіка агломераційного процесу передбачає формування чітко локалізованої зони горіння в шарі шихти, що досягається завдяки дисперсному розподілу твердого палива в об'ємі матеріалу. Інжекція газоподібного або розпилення рідкого палива у шар значно ускладнює формування стабільного теплового профілю та контроль швидкості переміщення фронту горіння, що негативно впливає на якість спікання [2, 3].

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.01.ОП			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Оцінка альтернативних видів палива для заміни коксового дріб'язку в агломераційному процесі	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Герасимчук</i>						1	11
<i>Перевірів</i>	<i>Бабошко</i>					МТ-22-1		
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затверди</i>	<i>Бабошко</i>							

Додатковим стримувальним чинником для використання мазуту є підвищений вміст сірки, яка під час згоряння частково фіксується в агломераті у вигляді сульфідних і сульфатних сполук, погіршуючи його металургійні властивості та підвищуючи навантаження на доменний процес у частині десульфурації [4, 6]. У сукупності зазначені фактори зумовлюють обмежену доцільність застосування газоподібних і рідких палив як повноцінної альтернативи коксовому дріб'язку в умовах класичної технології спікання.

Антрацитовий штиб у сучасних умовах розглядається як найбільш технологічно прийнятний та конкурентоспроможний заміник коксового дріб'язку в агломераційному виробництві. Його ефективність зумовлена передусім низьким вмістом летких речовин (у межах 3–5 %) та високою часткою фіксованого вуглецю, що забезпечує високу температуру займання, стабільність фронту горіння та формування концентрованої зони спікання, подібної до тієї, що характерна для коксового палива [1, 2]. За даними експериментальних досліджень, використання антрациту дозволяє підтримувати прийнятні показники продуктивності агломації та механічної міцності агломерату за умови оптимізації його гранулометричного складу та витрати [2, 3].

Водночас масштабне впровадження антрацитового штибу як повноцінної альтернативи коксу обмежується низкою об'єктивних чинників. По-перше, ресурсна база антрациту в Україні є суттєво обмеженою, що не дозволяє забезпечити стабільне покриття потреб агломераційних фабрик у промислових масштабах [7]. По-друге, антрацит має широкий спектр споживачів (енергетика, комунально-побутовий сектор, інші галузі промисловості), що формує високу конкуренцію за ресурс та підсилює його дефіцитність і цінову волатильність [5]. Таким чином, попри технологічну близькість властивостей антрациту до коксового дріб'язку, його застосування слід розглядати як частковий, але не стратегічно універсальний інструмент вирішення паливної проблеми агломераційного виробництва.

Використання вугілля «молодших» стадій метаморфізму (бурого, довгополум'яного) в агломераційному процесі пов'язане з істотними технологічними ускладненнями, обумовленими високим вмістом летких речовин (до 30–40 %) та значною часткою смолистих компонентів (до 8–10 %). Під час нагрівання шихти у зоні запалювання відбувається інтенсивне виділення летких продуктів термічного розкладання, які при подальшому охолодженні відхідних газів конденсуються у газоочисному тракті. У поєднанні з дисперсним пилом це призводить до утворення в'язких смолисто-пилових відкладень, що формують щільні нашарування в газоходах, пиловловлювачах та ексгаустерах, різко погіршуючи газодинамічні умови роботи агломашини та знижуючи її продуктивність [2, 6, 8]. Окрім експлуатаційних ризиків, надмірне виділення летких речовин дестабілізує тепловий баланс процесу, оскільки частина тепла витрачається на їх випаровування та транспортування з потоком газів [3].

На противагу цьому, худе вугілля розглядається як більш прийнятна альтернатива завдяки помірному вмісту летких речовин (9–11,5 %) та відсутності вираженого смолоутворення під час нагрівання. За даними термогравіметричних досліджень, максимум газовиділення для худого вугілля припадає на температуру близько 650–750 °С, що відповідає робочому інтервалу зони горіння в шарі шихти та забезпечує більш рівномірний розвиток процесу спікання без критичного порушення газодинаміки [2, 9]. Водночас навіть для цього виду палива характерна нижча температура займання порівняно з коксовим дріб'язком, що може призводити до «розтягування» зони горіння по висоті шару та зменшення пікових температур у фронті спікання [1, 3].

Таким чином, вибір палива-замінника повинен ґрунтуватися на комплексному аналізі його фундаментальних фізико-хімічних характеристик — вмісту летких речовин, температури займання, реакційної здатності, гранулометричного складу та характеру термічного розкладання. Саме ці параметри визначають концентрацію теплової енергії в зоні спікання, умови утворення рідкої фази та, як наслідок, якість і міцність готового агломерату [1–3].

Температура займання є критичним показником, що визначає початок активного горіння в шарі шихти. Різні види палива мають суттєво відмінні показники:

- Буровугільний напівкокс: 150–250°C
- Буре вугілля: 180°C
- Деревне вугілля: 250–270°C
- Газове вугілля: 380°C
- Жирне вугілля: 410°C
- Антрацит: 470–560°C
- Металургійний кокс: 620–650°C

Металургійний кокс має найвищу температуру займання, що забезпечує концентрацію тепла у вузькій зоні горіння, товщина якої зазвичай не перевищує 10–40 мм. Така локалізація високотемпературного фронту є критично важливою для ефективного утворення необхідної кількості розплаву, який зв'язує частки руди та формує міцну структуру агломерату. Антрацит за цим показником наближається до коксу. Важливо зазначити, що в реальних умовах аглопроцесу, де вміст кисню в газі знижений до 6–8% (порівняно з 21% у повітрі), температура займання палива зростає на 60–80°C.

Процес горіння відбувається у двох режимах:

1. Кінетичний режим (600–900°C): Швидкість процесу лімітується швидкістю хімічної реакції. Горіння відбувається по всій внутрішній поверхні частинки палива.

2. Дифузійний режим (>900°C): Швидкість процесу лімітується швидкістю доставки кисню до поверхні палива. Перехід у цей режим, що супроводжується самоzapалюванням, є критично важливим, оскільки він дозволяє досягти температур плавлення шихти (1200–1400°C), що необхідно для формування якісної та міцної структури агломерату.

Реакційна здатність палива характеризує його хімічну активність щодо окислювачів. Вона тісно пов'язана з пористою структурою та величиною питомої поверхні.

Таблиця 1.1 – Фізико-хімічні властивості різних видів палива

Вид палива	Щільність, г/см ³	Пористість, %	Реакційна здатність, мл/(г·с)	Питома поверхня, м ² /г
Графіт	2,231	29,0	0,22	8,5
Пековий кокс	1,980	27,8	0,34	9,4
Кокс АМКР	1,917	56,7	0,76	17,0
Газовий кокс	1,815	49,8	1,85	33,5
Нафтовий кокс	1,409	20,4	0,42	124
Антрацит	1,647	3,50	0,51	162
Напівкокс черемхівський (заводський)	1,585	54,5	6,23	182
Напівкокс черемхівський (дослідний)	1,768	15,7	12,9	278
Формований кокс	1,696	52,5	9,03	195
Деревне вугілля	1,478	79,0	11,1	243

Дослідження показують лінійну залежність між реакційною здатністю та питомою поверхнею для більшості видів палива. Антрацит є яскравим винятком: незважаючи на високу питому поверхню (162 м²/г), він має низьку реакційну здатність (0,51 мл/(г·с)). Це пояснюється тим, що частина його пор є закритою і недоступною для газоподібного окислювача.

Подрібнення палива принципово змінює співвідношення між внутрішньою (пористою) та зовнішньою поверхнею. Зменшуючи розмір частинок, ми значно збільшуємо зовнішню питому поверхню, роблячи більшу частину вуглецю доступною для окислювача і, таким чином, прямо підвищуючи його сумарну реакційну здатність.

Витрата палива є ключовим фактором, що впливає на температурний рівень процесу. Збільшення кількості палива підвищує максимальну температуру в зоні горіння. Наприклад, при спіканні магнетитових концентратів збільшення витрати коксу з 4,3% до 8,6% призвело до зростання максимальної температури в зоні горіння з 1200–1300°C до 1450–1500°C.

Однак це зростання не є безмежним. Існують обмежуючі фактори:

- Неповне згоряння: при високих витратах палива все більша його кількість згоряє не до CO_2 , а до CO , що виділяє в 3,3 раза менше тепла.
- Ендотермічні реакції: активізуються процеси відновлення оксидів заліза, які поглинають тепло.
- Тепловтрати: зростають втрати тепла з відхідними газами.

Взаємозв'язок між витратою вуглецю та міцністю агломерату (що опосередковано вимірюється виходом дріб'язку) є нелінійним. Можна виділити три характерні стани:

1. Недостатня витрата: тепла не вистачає для утворення достатньої кількості розплаву, агломерат виходить неміцним з високим виходом дріб'язку.

2. Оптимальна витрата: формується достатня кількість рідкої фази, що забезпечує міцний зв'язок між частками руди та високу якість агломерату.

3. Надлишкова витрата: утворюється дуже міцний, але низьковідновлюваний агломерат, що є небажаним для подальшого доменного процесу. Це не тільки погіршує ключову металургійну властивість агломерату (відновлюваність), але й являє собою пряме перевитрачання дорогого палива, що негативно впливає на собівартість чавуну.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.01.ОП	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		6

Окрім хімічного складу та кількості палива, його фізичний стан, а саме крупність, є вирішальним фактором, що викликає значні суперечки серед дослідників.

Гранулометричний склад палива є одним із найбільш дискусійних та багатофакторних аспектів технології агломерації. На відміну від інших параметрів, у науковій та виробничій літературі існують діаметрально протилежні дані щодо оптимальної крупності палива та її впливу на процес.

У науковій літературі відсутній однозначний консенсус щодо оптимальної крупності паливної складової та доцільності широкого застосування заміників коксового дріб'язку в агломераційному процесі. Існують дві концептуально різні позиції, що базуються на відмінностях у підходах до формування теплового профілю та механізмів структуроутворення агломерату.

Аргументи «проти» заміників та на користь більш крупного палива.

Низка дослідників вказує, що зменшення середньої крупності паливних частинок (наприклад, з 3 до 2 мм) або використання палив із підвищеною реакційною здатністю може призводити до надмірно інтенсивного та швидкого згоряння, що спричиняє «розтягування» зони горіння і зниження пікової температури у фронті спікання [2, 3]. У результаті формується недостатня кількість рідкої фази, що негативно позначається на зв'язуванні зерен та механічній міцності агломерату. Подібна позиція також поширюється на застосування антрациту як повної заміни коксу: за окремими даними, відмінності у пористості та реакційній здатності палива можуть змінювати характер тепловиділення і погіршувати якісні показники продукту за відсутності спеціальної адаптації режимів спікання [1, 10]. Таким чином, прихильники цього підходу наголошують на необхідності збереження відносно крупної фракції палива для забезпечення локалізованого високотемпературного фронту.

Аргументи «за» заміники та на користь дрібного палива.

Водночас інші дослідники демонструють можливість успішної часткової або повної заміни коксового дріб'язку антрацитом і худим вугіллям за умови

оптимізації гранулометричного складу та витрати палива [2, 9]. Згідно з їх результатами, використання більш дрібної паливної фракції (зокрема $<0,5$ мм у контрольованій кількості) сприяє кращому розподілу палива в об'ємі гранул, інтенсифікації теплопередачі та скороченню тривалості спікання, що позитивно впливає на продуктивність агломашини [3, 9]. За рахунок більш рівномірного формування рідкої фази в міжзерновому просторі може досягатися підвищення механічної міцності агломерату та стабілізація його хімічного складу. Окремі роботи також вказують, що при оптимальному співвідношенні крупних і дрібних частинок палива можливо забезпечити як високу швидкість переміщення фронту горіння, так і достатній рівень пікових температур [11].

Отже, суперечливість експериментальних даних свідчить про те, що вплив крупності палива не є лінійним або однозначним. Він визначається комплексною взаємодією гранулометричного складу палива, структури огрудкованої шихти, її газопроникності та умов тепло- і масообміну в шарі. Це обґрунтовує необхідність подальших досліджень, спрямованих на встановлення раціонального діапазону крупності паливної складової для конкретних сировинних умов.

Вплив гранулометричного складу твердого палива на перебіг агломераційного процесу має багатофакторний характер і охоплює газодинамічні, теплотехнічні та структуроутворювальні аспекти спікання. По-перше, характер розподілу палива в об'ємі шихти визначає рівномірність формування зони горіння. Дрібні частинки зазвичай більш однорідно інтегруються в структуру огрудкованих гранул, що зменшує ймовірність утворення локальних зон недоспікання та підвищує однорідність готового агломерату [3, 11]. Водночас надлишкова частка ультрадисперсної фракції ($<0,5$ мм) може погіршувати газопроникність шару та змінювати кінетику горіння.

По-друге, швидкість згоряння та характер тепловиділення безпосередньо залежать від питомої поверхні паливних частинок. Зменшення їх розміру підвищує реакційну здатність і прискорює вигорання, однак при надмірному подрібненні це може призводити до передчасного завершення процесу горіння та зниження

максимальної температури у фронті спікання, що обмежує утворення достатньої кількості рідкої фази для формування міцних міжзернових зв'язків [2, 3, 9].

По-третє, температурний режим шару істотно залежить від оптимального співвідношення крупних і дрібних фракцій. За результатами японських досліджень, максимальна температура теплової хвилі (порядку 1350–1400 °С) досягається при використанні коксового палива крупністю 1–2 мм, тоді як застосування як більших (5–6 мм), так і надмірно дрібних (<0,1 мм) фракцій супроводжується зниженням пікової температури до 1250–1260 °С через порушення балансу між швидкістю горіння та тепловіддачею шару [11, 12].

По-четверте, структурні характеристики агломерату також корелюють із дисперсністю палива. Зменшення розміру частинок у раціональних межах сприяє формуванню більш рівномірної дрібнопористої структури, що підвищує механічну міцність продукту та стабілізує його гранулометричний склад після барабанних випробувань [3, 11]. Однак надмірна кількість пилоподібної фракції здатна, навпаки, погіршувати міцність через нестачу локалізованого тепловиділення.

Таким чином, сучасні експериментальні та виробничі дані свідчать про існування вузького оптимального діапазону гранулометричного складу паливної складової. Для більшості умов агломерації раціональним вважається інтервал 3,0–0,5 мм, який забезпечує баланс між стабільністю теплового фронту, достатньою концентрацією температури в зоні спікання та формуванням міцної структури агломерату без погіршення газопроникності шару [2, 3, 11].

Існує значний потенціал для оптимізації агломераційного процесу шляхом більш ретельного керування гранулометричним складом палива. Недавні дослідження демонструють, що усунення найменшої фракції (<0,5 мм) при спіканні магнетитових концентратів дозволяє знизити витрату палива на 12–15 %, одночасно підвищуючи міцність агломерату та продуктивність агрегату [13, 14]. Також було встановлено, що раціональне співвідношення крупних та дрібних частинок у паливі сприяє більш рівномірному формуванню рідкої фази,

зменшенню дефектних зон у готовому продукті та стабілізації термічного режиму шару [15].

Передовий міжнародний досвід (Великобританія, Японія) підкреслює важливість адаптивного підходу: крупність палива слід підбирати відповідно до гранулометрії залізорудної частини шихти, оскільки невідповідність може призводити до локальних дефіцитів тепла або перенасичення зони горіння, що знижує продуктивність та міцність агломерату [16, 17].

Хоча єдиної думки щодо оптимальної крупності не існує, очевидно, що управління гранулометричним складом палива є потужним інструментом для підвищення продуктивності, зниження витрат енергії та палива та покращення якості кінцевого продукту [13–17].

Висновки

Проблема вибору оптимального палива для агломерації є складною та багатогранною, обумовленою як жорсткими економічними обмеженнями через дефіцит традиційних ресурсів, так і багатофакторністю технологічних процесів, що відбуваються в шарі шихти. Проведений аналіз дозволяє сформулювати низку ключових висновків.

1. Критичність дефіциту коксового дріб'язку. Щорічний дефіцит обсягом до 4 млн. тонн є системною проблемою для української металургії. Це не тимчасове ускладнення, а довгостроковий виклик, що вимагає стратегічного переходу на альтернативні види палива для забезпечення стабільної роботи агломераційних фабрик.

2. Обмеження альтернативних палив. Хоча антрацитовий штиб та худі вугілля є найбільш життєздатними заміниками, їх використання має свої обмеження. Антрацит сам по собі є дефіцитним ресурсом, а застосування вугілля вимагає суворого контролю за вмістом летких речовин та відсутністю смол, щоб уникнути серйозних експлуатаційних проблем.

3. Багатофакторний вплив фізико-хімічних властивостей. Ефективність палива визначається не лише його походженням, а й комплексом взаємопов'язаних

параметрів. Температура займання, реакційна здатність, пористість та питома поверхня безпосередньо впливають на термічний режим процесу, швидкість горіння та, як наслідок, на кількість та якість утворюваного розплаву, що є основою міцності агломерату.

4. Невирішене питання оптимальної крупності. Гранулометричний склад палива залишається ключовим, але найбільш суперечливим фактором. Оптимальний розмір частинок залежить від умов конкретного виробництва, зокрема від складу шихти. Управління гранскладом, зокрема усунення пилоподібної фракції (<0,5 мм) та адаптація крупності палива до крупності руди, є значним резервом для підвищення продуктивності та зниження витрат.

Успішна заміна дефіцитного коксу можлива лише за умови комплексного підходу. Цей підхід повинен враховувати не тільки вибір альтернативного виду палива, але й ретельну підготовку його гранулометричного складу відповідно до конкретних технологічних умов кожної агломераційної фабрики.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.01.ОП	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		11

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Методика спікання агломерату

2.1.1 Устаткування та вихідні матеріали

Дослідні спікання проводилися на лабораторній агломераційній установці, ключові параметри якої забезпечують моделювання промислових процесів в контрольованих умовах.

Основні характеристики установки:

- тип та діаметр агломераційної чаші: циліндрична, 300 мм
- площа спікання ($F_{\text{спік}}$) – 0,07 м²
- висота шару – 335 мм
- початкове розрідження під колосниковими ґратами – 980 мм вод. ст.

Принципова схема установки (рис. 2.1) забезпечує повний контроль над процесом спікання.

Газодувка (1) створює розрідження, відсмоктуючи гази з-під колосникових ґрат агломераційної чаші. Потік газів регулюється за допомогою вентиля (7) та регулятора (6), а його інтенсивність контролюється вимірювальною шайбою (8). Перед викидом в атмосферу відхідні гази проходять очищення у скрубєрі (2). Усі параметри процесу відстежуються та фіксуються за допомогою приладів на щиті КВП (9). Запалювання шихти здійснюється газовим пальником (5).

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.02.МД			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Методика проведення експериментальних досліджень та характеристики вихідних матеріалів	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Герасимчук</i>						1	8
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>					МТ-22-1		
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затвердв</i>	<i>Бабошко</i>							

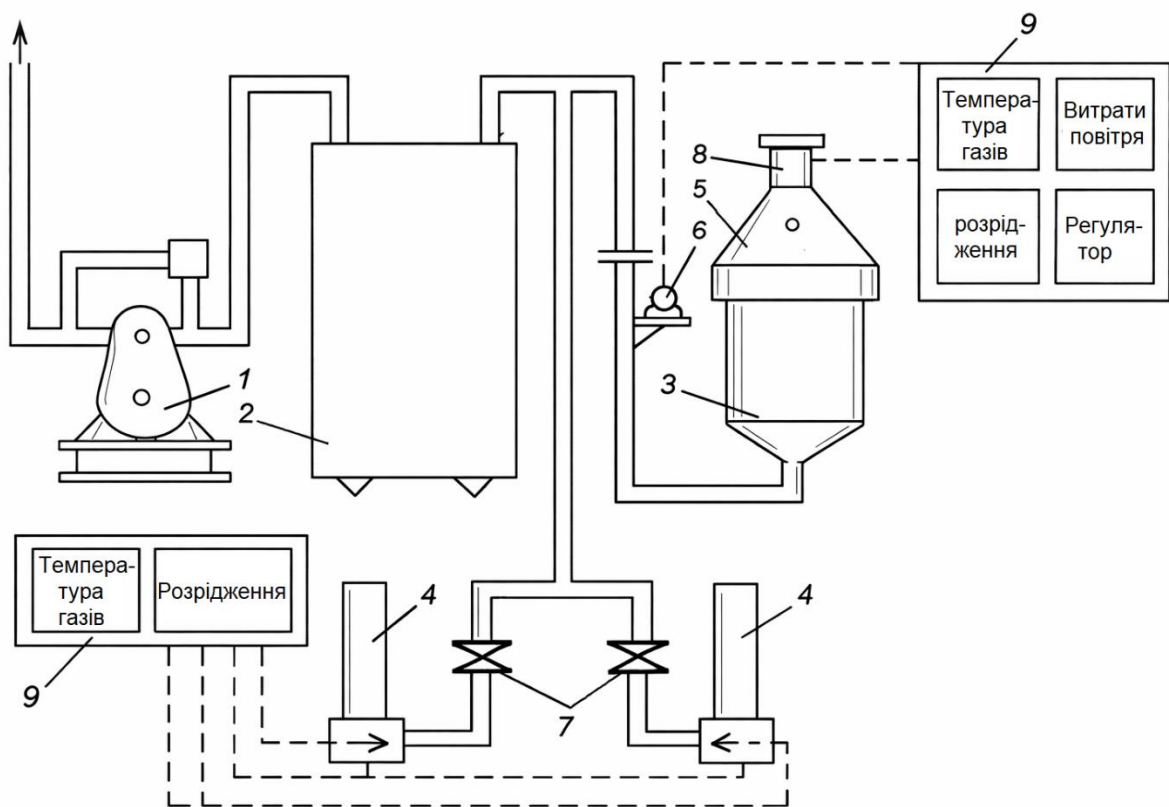


Рисунок 2.1 – Схема лабораторної агломераційної установки:

1 – газодувка; 2 – скруббер; 3 – аглочаша 0,1 м²; 4 – аглочаша; 5 – газовий пальник; 6 – регулятор; 7 – вентиль; 8 – вимірювальна шайба; 9 – щит КВП

Залізорудна частина шихти складалася з 80% магнетитового концентрату та 20% агломераційної руди. Як паливо застосовувалася суміш коксового дріб'язку та антрацитового штибу у співвідношенні 1:1. Хімічний склад вихідних матеріалів наведено у таблицях 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад компонентів агломераційної шихти

Компонент	Вміст, %									
	Fe _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P	S	ВПП
Магнетитовий концентрат	65,0	27,6	62,2	8,5	0,04	0,92	0,13	0,036	0,02	0,7
Агломераційна руда	53,0	0,7	75,0	17,0	0,70	0,30	3,80	0,050	0,046	3,4

Доломітизований вапняк	1,2	—	1,7	1,46	45,5	7,50	0,13	—	—	43,3
------------------------	-----	---	-----	------	------	------	------	---	---	------

Таблиця 2.2 – Технічний аналіз палива та хімічний склад золи

Вид палива	Вміст, %											
	W ^P	A ^c	V ^c	S ^c	C ^H	Fe _{заг}	SiO ₂	CaO	MgO,	Al ₂ O ₃	P	S
Коксовий дріб'язок	2,0	12,6	4,4	2,0	81,2	—	—	—	—	—	—	—
Зола (A ^c = 12,6%)	—	—	—	—	—	8,0	43,0	6,1	1,4	22,0	0,17	2,0
Антрацитовий штиб	4,6	17,0	3,5	2,0	77,6	—	—	—	—	—	—	—
Зола (A ^c = 17,0%)	—	—	—	—	—	6,0	49,2	3,2	1,2	22,5	0,06	2,0

Ретельна підготовка цих компонентів є наступним ключовим етапом для формування шихти з оптимальними властивостями.

2.1.2 Процедура підготовки шихти

Процедура підготовки шихти до спікання відбувалася покроково для забезпечення її гомогенності та оптимальної газопроникності. Зважені матеріали пошарово завантажували у змішувальний барабан закритого типу, де відбувалося їх сухе змішування. Після цього суміш зволожували та піддавали короткочасному огрудкуванню.

Змішування проводили у лабораторному барабані діаметром 700 мм та довжиною 1200 мм, який забезпечував однорідне перемішування компонентів. Тривалість процесу змішування становила 20 хвилин при швидкості обертання барабана 24 об/хв, що забезпечувало рівномірний розподіл дрібних і крупних фракцій палива у складі шихти.

На етапі зволоження шихта піддавалася ручному зволоженню на металевому листі для точного контролю кінцевої вологості суміші, після чого суміш ретельно перемішували до досягнення однорідності. Після цього проводилося огрудкування шихти, яке тривало 1 хвилину, що дозволяло сформувати стабільні рудо-вугільні

гранули з необхідною міцністю та гранулометричним складом, придатним для подальшого спікання.

Після завершення огрудкування готова шихта зважувалася та подавалася на завантаження в агломераційну чашу.

Такий підхід забезпечував високу відтворюваність лабораторних умов, контроль над вологістю та структурою гранул, що є критичними факторами для дослідження впливу гранулометрії та складу палива на продуктивність та якість агломерату.

2.1.3 Процес спікання та збір даних

Готову озернену шихту завантажували в агломераційну чашу на попередньо вкладений шар постілі. Постіль, що складалася з придатного агломерату крупністю 10-20 мм, мала середню висоту 15,0 мм і слугувала для захисту колосникових ґрат та рівномірного розподілу газового потоку.

Процес запалювання шихти здійснювався за допомогою пальника на природному газі протягом 1 хвилини при розрідженні під колосниковими ґратами 600 мм вод. ст. Після завершення запалювання розрідження збільшували до робочого рівня 980 мм вод. ст.

Під час експерименту ключові параметри процесу фіксувалися для подальшого аналізу. Температура газів, що відходять, під колосниковими ґратами реєструвалася автоматично за допомогою термопари та потенціометра ЕПП-09. Одночасно щохвилини фіксувалося розрідження у вакуум-камері.

Закінчення процесу спікання визначалося за моментом досягнення максимальної температури відхідних газів. Загальна тривалість процесу розраховувалася з урахуванням часу запалювання.

Після фіксації завершення спікання виконувались операції з обробки спеченого агломерату та розрахунку показників продуктивності.

2.1.4 Обробка спеку та розрахунок продуктивності

По закінченню спікання вимірювали висоту спеченого шару. Після цього гарячий пиріг агломерату вивантажували на металевий профіль, розколювали по

осі на 3-4 частини та охолоджували на повітрі в природних умовах. Тривалість охолодження складала 30 хвилин, що забезпечувало зниження температури до 100°C.

Продуктивність агломераційної установки розраховували окремо по спеку (Q_c) та по придатному агломерату (Q_p) за наступними формулами. Обидва показники вимірюються в т/(м²·год).

$$Q_c = P_c / (F \cdot \tau) \quad (2.1)$$

$$Q_p = Q_c \cdot (\beta_p / 100) \quad (2.2)$$

де P_c – вага спеку, кг

F – площа спікання, м²

τ – тривалість спікання, год

β_p – вихід придатного агломерату, %

Описана методика дозволяє отримати стандартизовані зразки агломерату, які готові для подальшого всебічного аналізу їх металургійних властивостей.

2.2 Методика визначення металургійних властивостей агломерату

Визначення металургійних властивостей агломерату має критичне значення для оцінки його якості як сировини для доменного процесу. Міцність, як одна з ключових властивостей, безпосередньо впливає на газодинамічні умови в доменній печі. Низька міцність призводить до утворення дріб'язку, що погіршує газопроникність стовпа шихти, порушує стабільність ходу печі та знижує її продуктивність.

Міцність агломерату оцінюється за двома ключовими показниками: холодною та гарячою міцністю, які характеризують його поведінку на різних етапах металургійного переділу.

Холодна міцність — це здатність шматків агломерату протистояти руйнівним навантаженням під час транспортування, перевантажень та завантаження у скіпи

доменної печі. Висока холодна міцність мінімізує утворення дріб'язку ще до потрапляння сировини в піч.

Гаряча міцність — це властивість шматків агломерату зберігати цілісність в умовах нагрівання, відновлення та тиску вищерозміщених шарів шихти безпосередньо в доменній печі. Руйнування матеріалу всередині печі є особливо шкідливим, оскільки утворений дріб'язок неможливо відсіяти, і він суттєво погіршує газодинаміку процесу.

Для забезпечення стабільної роботи доменних печей оптимальна крупність залізородної сировини (включно з агломератом) становить 10–40 мм. Вміст дріб'язку (фракції менше 5 мм) у шихті, що завантажується, не повинен перевищувати 3,0–5,0% за масою. Далі розглянуто стандартні методики визначення цих показників міцності.

2.2.1 Оцінка холодної міцності

Холодна міцність агломерату оцінюється двома основними методами: за допомогою стандартного барабанного випробування та в барабані конструкції П.Г. Рубіна. Порівняльний аналіз параметрів цих методів наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри випробувань холодної міцності агломерату

Параметр	Стандартне барабанне випробування	Випробування в барабані Рубіна
Маса проби	15,0 кг	20 кг
Крупність фракції проби	5 – 40 мм	25 – 100 мм
Діаметр барабана	1000 мм	1000 мм
Ширина барабана	500 мм	600 мм
Внутрішня конструкція	Два сталеві куточки (50x50x5 мм)	Три полиці під кутом 120°
Швидкість обертання	25 об/хв	25 об/хв
Тривалість випробування	8 хвилин (200 обертів)	4 хвилини

Основний показник міцності	Вихід фракції >5,0 мм	Вихід фракції <5,0 мм
----------------------------	-----------------------	-----------------------

Ключова відмінність між методами полягає у вихідних показниках. У стандартному барабанному випробуванні оцінюється вихід міцної фракції (>5,0 мм), що характеризує власне міцність, та вихід фракції (<5,0 мм), що характеризує стирання. У методі Рубіна єдиним показником міцності є вихід дріб'язку (<5,0 мм), тобто кількість матеріалу, що зруйнувався.

Від випробувань за стандартної температури логічно перейти до оцінки властивостей агломерату в умовах, що імітують середовище доменної печі.

2.2.2 Оцінка «гарячої» міцності

Визначення «гарячої» міцності агломерату проводилось із моделюванням фізико-хімічних умов, характерних для верхніх зон доменної печі, з використанням обертового барабана в відновлювальній газовій атмосфері. Газове середовище складалося з 32–34% CO, 62–63% N₂ та 3–5% CO₂, подача суміші здійснювалась зі швидкістю 15 л/хв.

Нагрівання здійснювалося у два етапи: спочатку температура підвищувалась до 600 °C протягом 40 хвилин зі швидкістю ~15 °C/хв, після чого температура піднімалася до 800 °C протягом 2 годин 20 хвилин (~1,43 °C/хв), що забезпечувало імітацію поступового нагрівання шихти у печі. Для проведення досліду використовувався барабан діаметром 145 мм і довжиною 500 мм з чотирма внутрішніми полицями висотою 20 мм. Початкова проба мала масу 500 г і крупність 10–15 мм. Під час нагрівання барабан обертася зі швидкістю 10 об/хв протягом 185 хвилин, створюючи динамічні умови подібні до реального переміщення гранул у зоні горіння.

Охолодження проводилося протягом останніх 5 хвилин експерименту: електропіч вимикалася, а вміст барабана охолоджувався газом до температури 400–500 °C. Після завершення випробування та розсіву проби визначали комплексні показники: гарячу міцність — за виходом фракції >10 мм, руйнування — за

виходом фракції 0,5–5,0 мм та стиранисть — за виходом фракції <0,5 мм, що дозволяло оцінити поведінку агломерату при нагріванні та його здатність протистояти термічним та механічним впливам.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.02.МД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		8

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТВЕРДОГО ПАЛИВА НА ПОКАЗНИКИ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ТА РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЙОГО ПІДГОТОВКИ

3.1 Вплив фізико-хімічних властивостей палива на параметри процесу агломерації

Стратегічна важливість вибору оптимального твердого палива для процесу агломерації залізорудної сировини не може бути переоцінена. Основна функція палива полягає у забезпеченні необхідного температурно-теплового режиму спікання, що є ключовою умовою для отримання якісного, високоміцного агломерату з заданими металургійними властивостями. Від характеристик палива залежать не тільки енергетичний баланс процесу, але й динаміка фізико-хімічних перетворень у шарі шихти, структура та міцність кінцевого продукту.

Зважаючи на ці обставини виникає необхідність комплексного аналізу фізико-хімічних властивостей, теплотворної та реакційної здатності різних видів твердого палива, на основі якого будуть сформульовані обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації процесу спікання шляхом раціонального вибору та підготовки паливних компонентів.

Для досягнення цієї мети необхідно детально розглянути ключові властивості палива, що визначають його поведінку в умовах агломераційного процесу.

Аналіз фізико-хімічних властивостей є першочерговим кроком для розуміння поведінки палива в агломераційній шихті. Такі параметри, як вміст коксового залишку, кількість летких речовин, температура запалення та теплотворна здатність, безпосередньо впливають на тепловий баланс процесу, швидкість спікання та, в кінцевому підсумку, на якість готового агломерату.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.03.ДВП			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТВЕРДОГО ПАЛИВА НА ПОКАЗНИКИ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Герасимчук</i>						1	36
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>					МТ-22-1		
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>							

Фундаментальна різниця між компонентами органічної маси палива — коксовим залишком та леткими речовинами — визначає його ефективність в агломерації. Саме коксовий залишок є основним джерелом корисного тепла, що виділяється безпосередньо в зоні спікання і забезпечує необхідні температури для формування рідкої фази та структури агломерату.

Навпаки, леткі речовини мають переважно негативний вплив на процес. Їх виділення відбувається при відносно низьких температурах (110–400°C), задовго до запалення основної маси палива. У процесі виділення вони створюють газову оболонку навколо твердих часток, що блокує доступ кисню і має два ключові негативні наслідки:

1) "розмивання" зони горіння – процес горіння розтягується по висоті шару, що знижує концентрацію тепла.

2) зниження максимальної температури – недостатній температурно-тепловий рівень унеможливорює повноцінний розвиток рідкофазних процесів, що є критичним для отримання міцного, якісного агломерату.

Фізико-хімічні властивості різних видів палива суттєво відрізняються, що наочно демонструють дані, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізико-хімічні властивості різних видів твердого палива

Вид палива	Температура видалення летких, °C	Температура загорання, °C	Нижча теплота згорання, ккал/кг	Коксовий залишок, %	Відносна теплота згорання коксового залишку, °C
Антрацит	400	560	7950	96,5	95,0
Худе вугілля	390	470	8260	88,0	83,5
Газове вугілля	280	390	7710	61,0	60,5
Довгополум'яне	170	340	7290	57,0	59,5
Буре вугілля	150	240	6290	55,0	66,0

Торф	120	220	5240	30,0	40,5
Дрова	110	250	4500	15,0	20,0
Металургійний кокс	600	650	8400	98,0	98,0

На основі цих даних палива можна умовно згрупувати:

- високоякісні (пріоритетні): металургійний кокс, антрацит та худе вугілля.

Вони характеризуються не тільки найвищим вмістом коксового залишку (88-98%), але й максимальною низькою теплотою згорання.

- низькоякісні («молоді»): буре вугілля, торф, дрова. Ці види палива мають низький вміст коксового залишку (15-55%) та, відповідно, значно меншу теплотворну здатність.

З цього випливає ключовий технологічний висновок: при заміні високоякісного палива на «молоді» види, їх витрата повинна бути щонайменше вдвічі вищою. Порівняння металургійного коксу (98% коксового залишку) з бурим вугіллям (55%) або торфом (30%) наочно демонструє, чому для досягнення еквівалентного теплового ефекту витрата низькоякісного палива має бути настільки збільшена. Такий крок призводить до низки негативних наслідків, зокрема до зниження насипної маси шихти та падіння максимальної температури в зоні горіння, що погіршує показники процесу.

Температура запалення є ще одним ключовим показником ефективності палива. Низька температура запалення (менше 600°C), характерна для «молодого» вугілля, призводить до передчасного початку горіння у верхніх, менш прогрітих шарах шихти, що рухаються назустріч гарячому газовому потоку. Це розтягує процес горіння по висоті шару з оптимальних 10–20 мм до 30–40 мм.

Наслідком такого розширення є зниження концентрації тепла в шарі, що спікається. Це, у свою чергу, веде до падіння загального температурного рівня процесу та, як результат, до погіршення фізико-механічних властивостей агломерату (зниження міцності, збільшення вмісту дріб'язку).

Згідно з табличними даними, найбільш сприятливі показники мають палива з найвищою температурою запалення. Лідерами тут є металургійний кокс (650°C) та антрацит (560°C), використання яких забезпечує максимально концентроване виділення тепла та стабільність процесу спікання.

Розуміння цих статичних властивостей підводить до необхідності аналізу динаміки самого процесу горіння палива в шарі агломераційної шихти.

Процес горіння палива в агломераційному шарі є надзвичайно складним. Це не просто реакція окислення, а комплекс гетерогенних реакцій, що відбуваються в рухомій зоні високих температур. Він супроводжується численними супутніми фізико-хімічними явищами: мінералоутворенням, плавленням шихти, кристалізацією розплаву та формуванням пористої структури агломерату.

У загальному вигляді горіння вуглецю палива описується наступними основними хімічними схемами:

При надлишку кисню:



При надлишку вуглецю:



Залежно від умов (газопроникності шару, властивостей палива, швидкості повітря) взаємодія вуглецю з киснем може протікати в одному з трьох режимів:

1. Кінетичний режим. Спостерігається при гарній газопроникності шару та використанні палива з низькою хімічною активністю (кокс, антрацит). У цьому випадку швидкість процесу лімітується швидкістю самої хімічної реакції на поверхні частки палива, оскільки кисень надходить у надлишку.

2. Дифузійний режим. Переважає при поганій газопроникності, недостатній подачі повітря та використанні палива з високою хімічною активністю (наприклад, буре вугілля). Швидкість процесу лімітується швидкістю доставки кисню до поверхні паливної частки.

3. Перехідний режим. Є типовим для реальних умов агломераційного процесу. Цей режим є комбінацією кінетичного та дифузійного, що створює можливості для активного керування процесом спікання та його оптимізації.

Процес горіння окремої частки палива в шарі шихти проходить кілька етапів.

Спочатку, при температурах 600–700°C, горіння починається в кінетичному режимі. На цій стадії швидкість хімічної реакції відносно низька, а кисень легко досягає всієї поверхні частки.

Однак екзотермічна реакція окислення вуглецю призводить до виділення великої кількості тепла і швидкого локального нагрівання. Оскільки тепловтрати в щільному шарі шихти мінімальні, температура навколо частки стрімко зростає до 800–900°C і вище. При цих температурах відбувається samozапалювання палива, швидкість реакції зростає стрибкоподібно, і процес переходить у дифузійний режим. Температура в мікрооб'ємі зони горіння досягає 1300–1500°C, що ініціює плавлення компонентів шихти, формування розплаву та, зрештою, міцної структури агломерату.

Тривалість горіння та інтенсивність тепловиділення безпосередньо залежать від реакційної здатності палива, яка потребує детального аналізу.

Реакційна здатність є критичним параметром, що визначає швидкість горіння палива. Ця характеристика впливає на тривалість перебування матеріалу в зоні високих температур, а отже, на повноту протікання фізико-хімічних перетворень та формування кінцевої структури агломерату.

Для кількісної оцінки реакційної здатності різних видів палива було проведено серію експериментів. Зразки палива спалювалися при температурі 800°C в умовах, що забезпечували кінетичний режим горіння.

За еталонний показник було обрано час горіння частки коксу розміром 2,2 мм, що становить 80 секунд. Цей час вважається оптимальним для досягнення завершеності фізико-хімічних перетворень та отримання якісного агломерату.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.03.ДВП	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		5

Основний висновок експерименту полягає в тому, що для підтримки оптимального часу горіння (80 с) при заміні стандартного палива необхідно коригувати його крупність. Було встановлено наступне правило:

1) Для палива з високою реакційною здатністю (напівкокс, газове та буре вугілля) крупність необхідно збільшувати.

2) Для палива з низькою реакційною здатністю (антрацит, нафтовий кокс) крупність необхідно зменшувати.

Аналіз показав тісний взаємозв'язок між крупністю, пористістю та реакційною здатністю палива. Для дуже дрібних часток (фракція 0-0,5 мм) домінуючим фактором стає зовнішня питома поверхня, що практично нівелює відмінності в реакційній здатності між різними видами палива.

Однак для більших часток (>1,0 мм) критичним фактором стає внутрішня пористість. Це пояснює, чому криві швидкості горіння для різних палив розходяться зі збільшенням їхньої крупності. Розвинена внутрішня пориста структура палива, як-от металургійний кокс (пористість 55%), забезпечує значно більшу поверхню для хімічної реакції порівняно з менш пористими аналогами, такими як нафтовий кокс (21,0%). Експериментально встановлено, що дрібні частки коксу (55%), бурого вугілля (52,5%), напівкоксу (40%) та нафтового коксу (21,0%) згоряють з приблизно однаковою швидкістю саме через домінування фактору зовнішньої поверхні.

Таким чином, стає очевидним, що ефективне управління процесом агломерації вимагає не лише вибору палива з оптимальними статичними властивостями, але й тонкого налаштування його гранулометричного складу для контролю динаміки горіння, що є основою для практичних рекомендацій.

Проведений аналіз демонструє комплексний характер впливу твердого палива на агломераційний процес. Паливо виступає не лише як джерело тепла, але і як важливий зернистий компонент шихти, що впливає на її гранулометричний склад, газопроникність та умови огрудкування. На основі викладеного матеріалу можна сформулювати наступні ключові висновки та рекомендації.

1. Пріоритетність палива з високим вмістом коксового залишку. Найбільш ефективними видами палива для агломерації є металургійний кокс, антрацит та худе вугілля. Завдяки високому вмісту коксового залишку (>88%) та мінімальній кількості шкідливих летких речовин, вони забезпечують максимальну теплотворну здатність безпосередньо в зоні спікання.

2. Важливість високої температури запалення. Палива з температурою запалення вище 600°C (кокс, антрацит) забезпечують кращу концентрацію тепла у вузькій зоні горіння. Це сприяє досягненню необхідних температур для формування рідкої фази та, як наслідок, отримання міцного агломерату.

3. Необхідність корекції крупності при заміні палива. При переході з одного виду палива на інший для збереження оптимального часу горіння (близько 80 с) необхідно керуватися наступним правилом: при використанні більш реактивного палива (буре, газове вугілля) його крупність слід збільшувати, а при переході на менш реактивне (антрацит) — зменшувати.

4. Врахування реальних умов процесу. Важливо зазначити, що лабораторні дані не можна переносити на реальний процес однозначно. В умовах агломераційної машини, через нижчу концентрацію кисню в зоні горіння (на 8–10% менше, ніж у повітрі), температура запалення палива буде на 100–150°C вищою, а час горіння — на 20–30 секунд довшим. Цей фактор необхідно враховувати при розрахунку та коригуванні технологічних параметрів.

3.2 Вплив виду твердого палива на продуктивність та якість агломерату

Метою цього дослідження є надання вичерпного аналізу та порівняння ефективності чотирьох видів твердого палива — коксового дріб'язку, антрацитового штибу, кам'яного вугілля та напівкоксу — у процесі агломерації залізорудної сировини. Аналіз ґрунтується на результатах серії дослідних спікань, які проводилися за стандартизованих умов: використовувалася типова шихта

аглофабрики, крупність усіх видів палива становила 3-0 мм, а його витрата в шихті була зафіксована на рівні 5,0%.

Стратегічна важливість фізико-хімічних властивостей палива для агломераційного процесу є беззаперечною. Такі ключові параметри, як пористість, вміст вуглецю, вихід летких речовин та температура запалення, безпосередньо визначають тепловий баланс процесу, динаміку горіння та газопроникність шару шихти. Оптимальне поєднання цих характеристик забезпечує високу швидкість спікання, мінімізує витрати палива та, як наслідок, підвищує загальну технологічну й економічну ефективність виробництва агломерату.

Технічний аналіз палив, що використовувались у дослідах, представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічний аналіз досліджуваних видів палива

Тверде паливо	Зольність (A ^p), %	Вуглець (C ^p), %	Леткі речовини (LP ^p), %	Сірка (S ^p), %	Волога (W ^p), %	Пористість, %
Коксовий дріб'язок	11,6	84,3	3,6	0,5	2,4	51,2
Антрацитовий штиб	9,4	83,6	6,57	0,43	1,9	24,2
Кам'яне вугілля	8,6	74,6	16,42	0,38	3,2	26,8
Напівкокс	10,6	88,12	6,8	0,48	2,2	40,4

Аналіз даних, представлених у таблиці 3.2, виявляє суттєві відмінності між досліджуваними видами палива. Насамперед, виділяється висока пористість коксового дріб'язку (51,2%) та напівкоксу (40,4%), що сприяє кращому доступу окисника до поверхні частинок і, відповідно, інтенсифікує процес горіння. На противагу їм, антрацитовий штиб має значно щільнішу структуру з пористістю всього 24,2%. За вмістом вуглецю (C^p), що є основним теплотворним компонентом, лідирує напівкокс (88,12%). Кам'яне вугілля характеризується найвищим вмістом летких речовин (LP^p) — 16,42%, що свідчить про його легке займання, але може ускладнювати стабільність теплового режиму в шарі.

Реакційна здатність палива, яка визначає швидкість його взаємодії з киснем, є ще одним критичним фактором. Згідно з проведеними дослідженнями, паливо можна ранжувати за цим показником у такій послідовності (від найкращого до гіршого): кам'яне вугілля, коксовий дріб'язок, антрацит. Це підтверджується їхніми температурами запалення: 390°C для кам'яного вугілля, 400°C для коксового дріб'язку та 600°C для антрациту. Нижча температура запалення свідчить про вищу реакційну здатність палива.

Таким чином, унікальне поєднання фізико-хімічних властивостей кожного виду палива створює передумови для їхнього різного впливу на виробничі показники агломераційного процесу.

Аналіз ключових виробничих показників, таких як питома продуктивність агломераційної машини, вертикальна швидкість спікання та механічна міцність готового агломерату, є вирішальним для оцінки ефективності використання того чи іншого виду палива. Ці показники служать прямими індикаторами, що відображають як економічну доцільність, так і технологічну стабільність процесу.

Зведені результати експериментальних спікань, що показують вплив кожного виду палива на процес та якість агломерату, наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Вплив виду палива на показники агломераційного процесу

Показники	Коксовий дріб'язок	Кам'яне вугілля	Антрацитовий штиб	Напівкокс
Витрата палива, %	5,0	5,0	5,0	5,0
Насипна маса, кг/м ³	2124	2140	2180	2130
Швидкість спікання, мм/хв	16,4	12,6	14,3	17,1
Висота зони горіння, мм	3,48	3,54	3,58	3,34
Питома продуктивність, т/м ² ·год	1,62	1,38	1,48	1,76
Вихід класу -5 мм після барабана, %	22,4	23,8	21,8	20,4
Вихід придатного агломерату, %	78,4	76,3	77,6	79,8
Вміст Fe в агломераті, %	58,4	59,2	59,0	58,3

Дані з таблиці 3.3 чітко демонструють, що напівкокс є абсолютним лідером за показниками продуктивності. При його використанні досягається найвища швидкість спікання (17,1 мм/хв) та, відповідно, максимальна питома продуктивність (1,76 т/м²·год). Цей результат безпосередньо пов'язаний з його унікальними властивостями: висока пористість та реакційна здатність забезпечують інтенсивне горіння, що призводить до формування найменшої висоти зони горіння (3,34 мм). Це, своєю чергою, сприяє високій концентрації тепла та кращій газопроникності шару, що прискорює процес.

Стандартне паливо — коксовий дріб'язок — демонструє стабільно високу продуктивність (1,62 т/м²·год). Його потенційні замітники, антрацит та кам'яне вугілля, показують дещо нижчі результати: 1,48 т/м²·год та 1,38 т/м²·год відповідно. Це пояснюється їхньою меншою пористістю (24,2% та 26,8% відповідно), що погіршує газопроникність шару, та, у випадку антрациту, значно вищою температурою запалення (600°C), що уповільнює процес.

Аналіз якості кінцевого продукту показує, що найкращу механічну міцність агломерату забезпечує також напівкокс. Показник виходу дрібної фракції (-5 мм) після випробування в барабані для нього є найнижчим і становить 20,4%. Найменш міцним виявився агломерат, отриманий з використанням кам'яного вугілля (23,8%). Важливо зазначити, що агломерат, виготовлений з антрацитовим штибом (21,8%), має вищу міцність, ніж агломерат на базі традиційного коксового дріб'язку (22,4%).

Вихід придатного агломерату для всіх видів палива знаходиться приблизно на одному рівні — в діапазоні 76-79%. Незначна перевага знову спостерігається у напівкоксу, де цей показник сягає 79,8%. Крім того, заслуговує на увагу факт, що застосування малозольних антрациту та кам'яного вугілля (з зольністю 9,4% та 8,6% відповідно) дозволяє отримати агломерат з дещо підвищеним вмістом заліза: 59,0% та 59,2% порівняно з 58,4% при використанні коксового дріб'язку.

Комплексний аналіз показників продуктивності та якості дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо доцільності використання кожного з досліджуваних видів палива в промислових умовах:

- Напівкокс. З технологічної точки зору, напівкокс є найкращим видом палива для агломерації. Він забезпечує найвищу питому продуктивність (1,76 т/м²·год) та максимальну механічну міцність агломерату завдяки оптимальному поєднанню високої пористості (40,4%) та відмінної реакційної здатності. Однак його ключовим обмеженням є складність промислового отримання, що обмежує широке використання.

- Антрацит та кам'яне вугілля. Дослідження підтвердили, що заміна коксового дріб'язку еквівалентною кількістю антрациту або кам'яного вугілля (за вмістом нелеткого вуглецю) не погіршує якість агломерату. Більше того, в окремих аспектах спостерігається покращення: використання антрациту підвищує міцність, а застосування обох заміників збільшує вміст заліза в готовому продукті. Це позиціонує їх як повноцінні та ефективні заміники дефіцитного коксового дріб'язку.

- Коксовий дріб'язок. Виступаючи як базове паливо для порівняння, коксовий дріб'язок демонструє стабільні, але не найкращі показники продуктивності та міцності, поступаючись у цьому напівкоксу та частково антрациту (за міцністю).

- Екологічний аспект. Низький вміст летких речовин в антрациті робить його безпечним заміником. На відміну від кам'яного вугілля, його застосування не викликає утворення смоляних відкладень у газовому тракті агломераційної машини, що спрощує експлуатацію обладнання.

На завершення можна констатувати, що хоча напівкокс є ідеальним паливом з технологічної точки зору, його практичне застосування обмежене. Водночас антрацитовий штиб та кам'яне вугілля є ефективними та економічно доцільними альтернативами коксовому дріб'язку, які здатні не лише підтримувати, але й у деяких аспектах покращувати якість агломерату в промислових умовах.

3.3 Вплив хімічної активації коксового дріб'язку на показники агломераційного процесу

Оптимізація витрат твердого палива є стратегічним завданням у виробництві агломерату. З огляду на об'єктивні складнощі з пошуком та обґрунтуванням повноцінних заміників коксового дріб'язку, ключовим напрямком підвищення ефективності стає розробка методів зниження його питомої витрати. Саме тому було ініційовано дослідження, мета якого — вивчити вплив попередньої активації коксового дріб'язку на ключові техніко-економічні показники агломераційного процесу.

Для забезпечення відтворюваності та достовірності результатів було проведено серію лабораторних спікань за чітко визначених та контрольованих умов. Експерименти були сплановані таким чином, щоб ізолювати вплив активованого палива на процес, зберігаючи інші параметри шихти та спікання стабільними.

Ключові параметри та матеріали, що використовувались у дослідах, були наступними:

- Активаційні реагенти: для підвищення реакційної здатності коксового дріб'язку використовувалися водяні розчини гумама, гідроксиду натрію (NaOH) та карбонату натрію (Na_2CO_3).
- Характеристики палива: активований кокс вводився в агломераційну шихту у вигляді дріб'язку крупністю 3-0 мм.
- Склад агломераційної шихти: досліди проводились на шихті зі співвідношенням магнетитового концентрату до рудного дріб'язку 4:1.
- Стабілізовані параметри процесу: протягом усіх експериментів вміст вологи у шихті підтримувався на рівні 8,8%, а витрата твердого палива – 5,2%. Ці значення є оптимальними для даного складу шихти.

Результати експериментальних спікань з використанням різних активаторів у порівнянні з базовим варіантом (типова шихта) представлені в таблиці 3.4

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.03.ДВП	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		13

Аналіз даних таблиці 3.4 демонструє позитивний ефект від активації палива. Порівняно з типовою шихтою, усі варіанти з активованим коксом показали покращені результати.

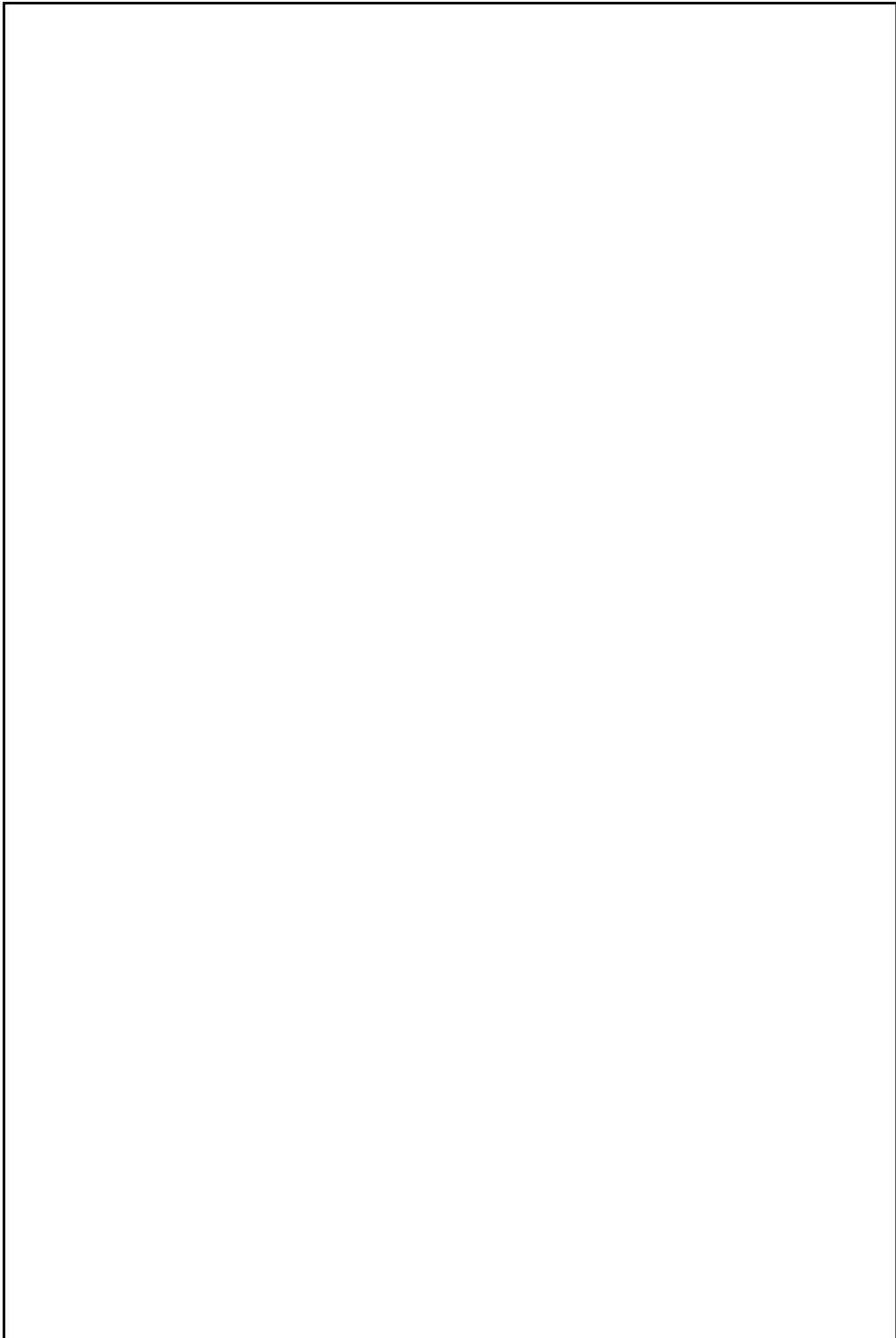
Особливо виділяються результати при використанні гідроксиду натрію (NaOH) як активатора. У цьому випадку було зафіксовано:

- істотне зростання реакційної здатності палива — майже у 3 рази (з 1,7 до 4,8 мл/гс).
- збільшення питомої продуктивності аглоустановки з 1,21 до 1,37 т/м²год. У вихідному дослідженні цей приріст оцінюється в межах 7-12%, що підкреслює суттєву інтенсифікацію процесу.
- значне поліпшення якості агломерату, що підтверджується як зростанням виходу придатного продукту на 8,2 процентних пункти (з 74,6% до 82,8%), так і зниженням крихкості.

Застосування усіх досліджених активаторів позитивно вплинуло як на вертикальну швидкість спікання, так і на механічну міцність агломерату. Це підтверджується суттєвим підвищенням механічної міцності: вихід дріб'язку класу 5-0 мм після випробувань у барабані, який є показником крихкості, був стабільно нижчим у всіх випадках використання активованого палива (18,5-19,2% проти 21,8% у базовому варіанті). Особливої уваги заслуговує ефект від активації реагентом на основі кальцію, що підтверджує відомий каталітичний вплив кальцію на процес горіння твердого вуглецю і його потенціал як ефективного активатора.

Ключовим аспектом дослідження була оцінка можливості зниження питомої витрати палива без погіршення показників процесу. Для цього було проведено додаткове спікання з використанням активованого палива при зниженій витраті. Результати порівняння наведені в таблиці 3.5.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.03.ДВП	арк.
	Арк.	№ док.м.	підпис	дата		14



					КНУ.РБ.136.26.113с-04.03.ДВП	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		15

Порівняння третього рядка (активований кокс при витраті 4,6%) з першим (типова шихта при витраті 5,2%) дозволяє зробити ключовий висновок. Застосування активованого палива дозволяє досягти або навіть перевищити базові показники процесу агломерації та якості агломерату при зниженні витрати коксового дріб'язку приблизно на 10 %. Зокрема, при меншій витраті палива питома продуктивність (1,24 т/м²год) та вихід придатного агломерату (82,1 %) залишаються вищими за базові показники.

Таким чином, експериментально доведено, що активація палива є не тільки інструментом інтенсифікації процесу, але й ефективним важелем для досягнення прямої економії паливних ресурсів.

На основі проведеного аналізу результатів експериментальних досліджень можна сформулювати наступні висновки:

1. Активація коксового дріб'язку за допомогою водяних розчинів лужних реагентів є дієвим та ефективним методом інтенсифікації агломераційного процесу.

2. Застосування технології дозволяє досягти комплексного покращення показників: істотне зростання реакційної здатності палива, збільшення продуктивності аглоустановки (на 7-12 %), підвищення виходу придатного агломерату та його механічної міцності.

3. Найважливішим результатом є експериментально доведена можливість досягнення базових показників процесу та якості продукції при зниженні витрати коксового дріб'язку приблизно на 10,0 %.

Враховуючи отримані результати, метод активації твердого палива перед його введенням в аглошихту можна охарактеризувати як досить перспективний для впровадження в промислових умовах. Його застосування дозволить суттєво підвищити техніко-економічні показники виробництва агломерату за рахунок інтенсифікації процесу та прямої економії дефіцитного коксового палива.

3.4 Вплив витрати коксового дріб'язку на показники агломераційного процесу та якість агломерату

Метою цього дослідження є детальний аналіз впливу зміни витрати твердого палива, зокрема коксового дріб'язку, на ключові технологічні показники процесу агломерації та якісні характеристики кінцевого продукту. Оптимізація витрати палива є стратегічно важливим завданням, оскільки вона безпосередньо визначає тепловий баланс процесу, що, у свою чергу, впливає на швидкість спікання, питому продуктивність установки та, найголовніше, на механічну міцність агломерату. Правильно підібрана кількість палива дозволяє досягти максимальної ефективності виробництва при одночасному забезпеченні високих стандартів якості продукції.

Дослідження проводилося на базі типової аглошихти з основністю 1,25. Експериментальний аналіз охоплював діапазон витрати палива від 4,0 % до 6,0 %, що дозволило системно оцінити наслідки як недостатньої, так і надлишкової кількості вуглецю в шихті.

Експериментальні умови були розроблені для моделювання реальних виробничих процесів та виявлення оптимальних параметрів. Вибір діапазону витрати палива від 4,0 % до 6,0 % не є випадковим. Він базується на встановленому факті, що для умов більшості агломераційних фабрик оптимальні показники продуктивності та міцності досягаються при вмісті вуглецю в шихті на рівні 4,8-5,5 %. Обраний діапазон дозволяє дослідити поведінку системи як в оптимальній зоні, так і за її межами.

Ключові вихідні параметри дослідження були наступними:

- Базова шихта – типова агломераційна шихта.
- Основність шихти – 1,25.
- Досліджуваний діапазон витрати палива: від 4,0 % до 6,0 %.
- Відповідний вміст твердого вуглецю: від 3,4 % до 5,1 %.

Аналіз даних, отриманих у ході п'яти експериментальних спікань, дозволяє сформулювати чітке уявлення про залежності між кількістю палива та кінцевими

показниками процесу. У дослідях послідовно змінювалася витрата коксового дріб'язку, що дозволило зафіксувати відповідні зміни в газодинаміці шару, швидкості процесу, а також у виході та якості готового агломерату. Аналіз цих даних виявляє ключові закономірності та допомагає визначити оптимальні умови для досягнення найкращих виробничих результатів (рис. 3.1, 3.2). Результати експериментальних спікань зведені в таблицю 3.6 для наочного порівняння ключових показників.

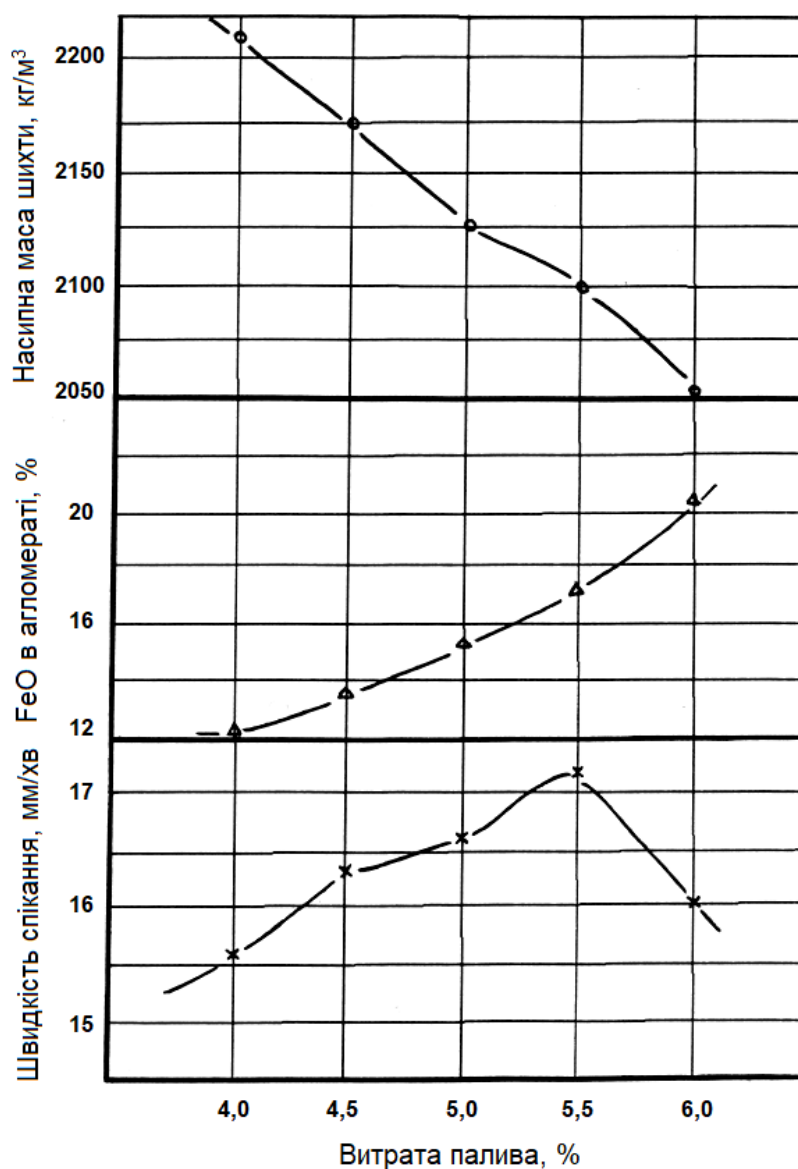


Рисунок 3.1 – Вплив витрат палива на:

а – насипну масу шихти; б – вміст FeO в агломераті; в – швидкість спікання

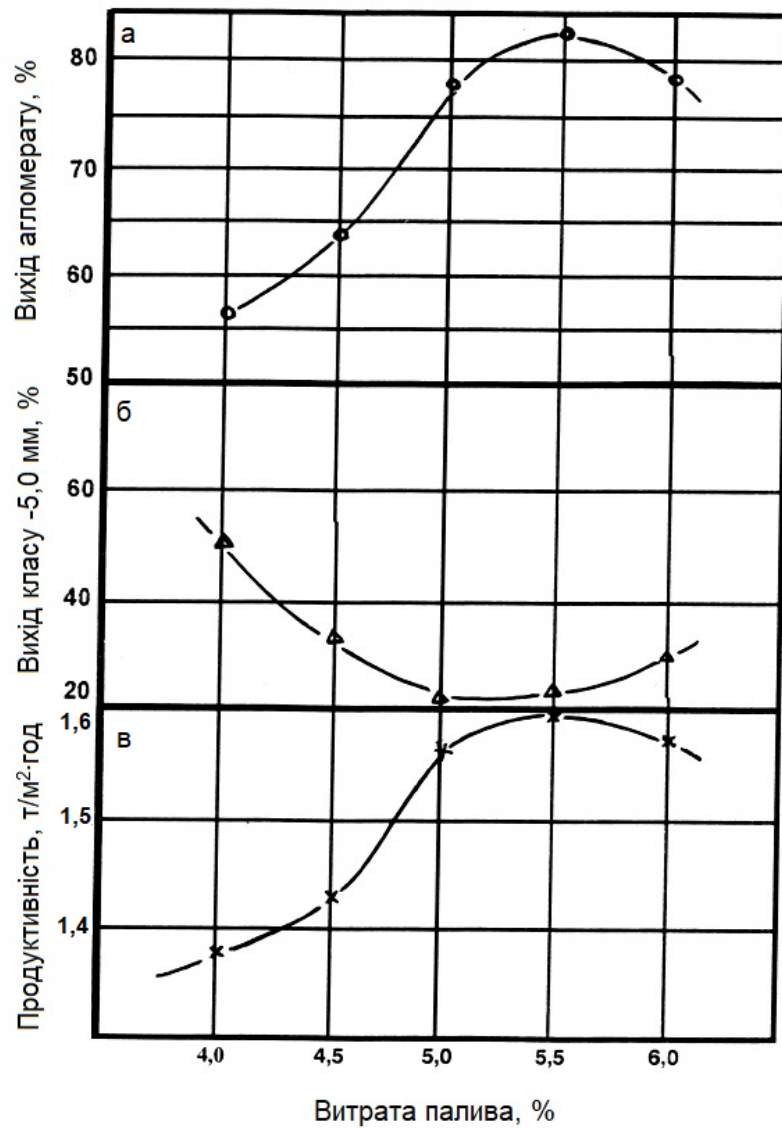


Рисунок 3.2 – Вплив витрат палива на:

а – вихід придатного агломерату; б – міцність агломерату в обертовому барабані; в – питому продуктивність аглоустановки

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.03.ДВП	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		20

Зі збільшенням частки коксового дріб'язку в шихті з 4,0% до 6,0% спостерігається закономірне зменшення насипної маси шихти з 2220 до 2054 кг/м³. Це пояснюється тим, що кокс має значно меншу щільність порівняно із залізородними компонентами.

Зменшення насипної маси має важливий позитивний наслідок для газодинаміки процесу: воно покращує газопроникність шару шихти. Експериментальні дані підтверджують, що початкова швидкість фільтрації повітря через шар зростає на 30% — з 0,362 м/с при 4,0% палива до 0,472 м/с при 6,0%. Таке зростання забезпечує достатню кількість кисню, необхідного для повноцінного горіння вуглецю в зоні спікання, що є фундаментальною умовою для формування якісного агломерату.

Аналіз даних показує, що залежність продуктивності та міцності від витрати палива має чітко виражений екстремум. Найкращі показники питомої продуктивності (1,64 т/(м²·год)) та виходу придатного агломерату (80,6%) досягаються при витраті палива на рівні 5,5%. Як зменшення, так і подальше збільшення кількості палива призводять до погіршення цих ключових виробничих показників.

Показник механічної міцності агломерату, що оцінюється за "виходом класу - 5 мм після барабану" (чим менше значення, тим вища міцність), демонструє аналогічну тенденцію. Найвища міцність, що відповідає найнижчому виходу дріб'язку (21,6%), також фіксується при витраті палива 5,5%. Для порівняння:

- При 4,0% палива міцність є вкрай низькою (вихід дріб'язку становить 48,4%).
- При 6,0% палива міцність знову погіршується (вихід дріб'язку зростає до 24,8%).

Таким чином, експериментальні дані однозначно свідчать про існування оптимальної точки витрати палива, відхилення від якої в будь-який бік призводить до погіршення як продуктивності, так і якості продукту.

Спостережувані в експериментах залежності мають глибоке фізико-хімічне підґрунтя. Кількість палива безпосередньо визначає кількість тепла, що виділяється в зоні горіння, максимальну температуру процесу та об'єм рідкої фази (розплаву). Саме ці фактори керують хімічними реакціями, фазовими перетвореннями та, зрештою, формуванням кінцевої структури і властивостей агломерату.

Низька якість агломерату при витраті палива 4,0% пояснюється недостатнім теплоутворенням. Логіка процесу виглядає наступним чином:

1. Недостатнє виділення тепла: Частки палива в шихті знаходяться на великій відстані одна від одної. Тепла, що виділяється при їх горінні, недостатньо для повноцінного прогріву всього об'єму матеріалу.

2. Низька температура спікання: Шихта не досягає температур, необхідних для розм'якшення та плавлення її компонентів.

3. Мінімальне утворення розплаву: Утворюється незначна кількість рідкої фази, яка не здатна ефективно зцементувати та зміцнити всю масу шихтових матеріалів.

В результаті кінцевий продукт є сукупністю "слабоспечених шматочків вихідних шихтових матеріалів". Це повністю корелює з експериментальними даними: низьким виходом придатного агломерату (56,0%) та вкрай низькою механічною міцністю (вихід класу -5 мм становить 48,4%).

На перший погляд парадоксально, але надлишкова кількість палива (6,0%) також призводить до зниження міцності агломерату. Механізм цього явища значно складніший і пов'язаний з надлишковим теплоутворенням та зміною хімічних процесів у розплаві.

- Утворення надлишкового розплаву: Надлишок палива розширює зону горіння і призводить до утворення великої кількості рідкої фази. Цей надлишковий розплав заповнює пори, ускладнюючи доступ кисню до часток палива, що ще не згоріли.

- Відновлення заліза: Дефіцит кисню в умовах високих температур сприяє інтенсивному відновленню оксидів заліза до металевого стану. Це пояснює аномально високий вміст металевого заліза (Fe) у структурі агломерату — 20,4%.

- Формування ларніту: Ключовою причиною руйнування є утворення підвищеної кількості двокальцієвого силікату (Ca_2SiO_4), відомого як ларніт. У великому об'ємі розплаву вапно (CaO) переважно реагує з кремнеземом (SiO_2) замість оксидів заліза.

- Поліморфне перетворення: Високі температури, спричинені надлишком палива, призводять до розкладання Fe_2O_3 , який діє як стабілізатор структури. За відсутності стабілізатора при охолодженні агломерату нижче 675°C відбувається поліморфне перетворення $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ в $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$.

- Руйнування структури: Це перетворення супроводжується збільшенням об'єму приблизно на 11%. Таке різке розширення створює величезні внутрішні напруження, які призводять до саморуйнування шматків агломерату або до значного зниження їхньої механічної міцності.

Аналіз недоліків крайніх режимів дозволяє сформулювати умови оптимального процесу. Хоча в загальній практиці оптимальною вважається витрата в діапазоні 4-5%, за якої температура спікання є відносно нижчою (близько $1400\text{-}1420^\circ\text{C}$), дані поточного експерименту показують, що пік продуктивності та міцності досягається при вищих значеннях, а саме 5,0-5,5%. Це створює ідеальний баланс: тепла достатньо для утворення необхідної кількості розплаву для міцного зчеплення частинок, але недостатньо для запуску руйнівних процесів.

За цих умов у структурі агломерату зберігається достатня кількість оксиду заліза (Fe_2O_3), який діє як стабілізатор і ефективно перешкоджає поліморфному перетворенню двокальцієвого силікату. Завдяки цьому агломерат після охолодження зберігає цілісність та демонструє високу механічну міцність.

Проведений аналіз впливу витрати коксового дріб'язку на процес спікання дозволяє зробити низку обґрунтованих висновків, що мають важливе практичне значення для оптимізації виробництва агломерату.

1. Витрата палива є критичним фактором, який комплексно визначає газодинаміку процесу, його продуктивність та якість кінцевого продукту. Збільшення частки палива покращує газопроникність шихти, але водночас запускає складні фізико-хімічні процеси, що впливають на міцність.

2. Недостатня витрата палива (4,0%) призводить до неповного спікання через дефіцит тепла. Результатом є низький вихід придатного продукту (56,0%) та вкрай низька механічна міцність (48,4% класу -5 мм).

3. Надлишкова витрата палива (6,0%) також призводить до зниження міцності (24,8% класу -5 мм). Однак механізм деградації інший: утворення надлишкового розплаву, відновлення заліза та, головне, руйнівне поліморфне перетворення двокальцієвого силікату ($\beta \rightarrow \gamma \text{Ca}_2\text{SiO}_4$) через нестачу стабілізатора Fe_2O_3 .

4. Результати експерименту показують, що для умов шихти з основністю 1,25 оптимальна витрата твердого палива, яка забезпечує найкращий баланс між продуктивністю та міцністю, знаходиться в діапазоні 5,0-5,5%. Цей діапазон дозволяє досягти питомої продуктивності до 1,64 т/(м²·год) та максимальної механічної міцності (вихід класу -5 мм становить 21,6%), що уточнює загальноприйняті оптимальні значення для даних умов.

3.5 Вплив крупності твердого палива на показники агломераційного процесу та якість агломерату

Оптимізація гранулометричного складу твердого палива, зокрема коксового дріб'язку, є стратегічно важливим і загальновизнаним чинником, що прямо впливає на ефективність агломераційного процесу. Від крупності палива залежить його питома витрата, ключові показники продуктивності установки та фінальна якість виробленого агломерату.

Ключовим параметром є однорідність крупності палива. Частки різного розміру характеризуються різною швидкістю згоряння. Неоднорідний

гранулометричний склад призводить до нерівномірного виділення тепла по висоті та об'єму шару агломераційної шихти. Це створює значні локальні перепади температур, які, згідно з дослідженнями, можуть досягати 200-300°C між сусідніми точками на відстані всього 10 см.

Така теплова неоднорідність є вкрай небажаною. Вона призводить до утворення нерівномірної структури агломерату, де одні ділянки перегріті, а інші – недостатньо пропечені, що залишає обсяги неспеченої шихти. Навпаки, більш однорідний розподіл палива сприяє зниженню цієї неоднорідності, забезпечує стабільну зону горіння та, як наслідок, сприяє формуванню агломерату з вищою та більш стабільною механічною міцністю. Аналіз експериментальних даних для різних видів палива дозволяє кількісно оцінити ці залежності.

Дослідження, проведені в лабораторних умовах, наочно демонструють вплив крупності коксового дріб'язку на процес спікання. Зміна гранулометричного складу палива в діапазоні від 0,5-0 мм до 5-0 мм призводить до різких коливань як у ході процесу, так і в якості кінцевого продукту. Ці дані є фундаментальними для розуміння шляхів оптимізації процесу.

Таблиця 3.7 – Показники процесу спікання при використанні коксового дріб'язку різної крупності

Крупність палива, мм	Вертикальна швидкість спікання, мм/хв	Вихід придатного агломерату, %	Питома продуктивність, т/м ² ·год	Барабанна проба 5-0 мм, %
0,5-0	7,4	70,4	0,74	28,4
1,0-0	10,6	75,3	0,96	24,6
3-0	12,2	78,5	1,08	22,6
5-0	13,4	74,3	1,16	24,8

Аналіз даних показує, що зі збільшенням крупності палива закономірно зростає питома продуктивність та вертикальна швидкість спікання. Однак цей ефект значно послаблюється в міру подальшого збільшення розміру часток. Так,

при переході з крупності 0,5-0 мм на 1-0 мм продуктивність зростає на 29,7%, тоді як при переході з крупності 3-0 мм на 5-0 мм приріст становить лише 7,4%.

Механізм цього явища пов'язаний з осередковим характером горіння великих часток палива. Більші частки створюють зони локального перегріву руди, що призводить до утворення більш крупнопористого агломерату. Це, у свою чергу, різко знижує гідравлічний опір шару вже сформованого агломерату, покращуючи газопроникність і збільшуючи швидкість процесу. Однак це досягається ціною якості: дані з таблиці 3.7 чітко демонструють, що збільшення крупності палива призводить до погіршення механічної міцності агломерату. Таким чином, існує прямий компроміс між продуктивністю та якістю кінцевого продукту. Аналогічні залежності спостерігаються і при використанні альтернативних видів палива, таких як напівкокс.

Крупність напівкоксу, як і коксового дріб'язку, має значний вплив на процес спікання та якість агломерату. Розуміння цих залежностей є важливим при розгляді можливості використання заміників традиційного палива.

Таблиця 3.8 – Показники процесу спікання при використанні напівкоксу різної крупності

Крупність палива, мм	Вертикальна швидкість спікання, мм/хв	Вихід придатного агломерату, %	Питома продуктивність, т/м ² ·год	Барабанна проба 5-0 мм, %
1-0	11,6	69,2	1,31	30,4
3-0	13,8	77,4	1,44	23,2

Аналіз даних свідчить про виражений негативний ефект використання надто дрібного напівкоксу. Шихта з паливом крупністю 1-0 мм спікалася погано, оскільки дрібні частки, загорнуті в огрудковану шихту, вигорали дуже повільно. Це призвело до низької швидкості спікання (11,6 мм/хв) та низької якості агломерату.

Згідно з дослідженням, оптимальні показники були досягнуті при використанні напівкоксу крупністю 3-0 мм. Саме за таких умов було отримано агломерат з найкращими характеристиками:

- Механічна міцність: 23,2% класу 5-0 мм після випробування в барабані.
- Вертикальна швидкість спікання: 13,8 мм/хв.
- Вихід придатного агломерату: 77,4%.
- Питома продуктивність: 1,44 т/м²/год.

Подальше збільшення крупності напівкоксу, згідно з даними дослідження, призводить до істотного погіршення параметрів спікання та якості агломерату, що підтверджує наявність чітко вираженого оптимального діапазону. Таким чином, ключовою проблемою для обох видів палива є наявність найдрібніших фракцій, вплив яких вимагає окремого детального розгляду.

Критичний негативний вплив на ефективність агломерації чинить фракція палива крупністю 0-0,5 мм. Її наявність у шихті суттєво погіршує техніко-економічні показники, тому видалення або мінімізація цієї фракції є пріоритетним завданням для оптимізації процесу.

Фізичні причини низької ефективності полягають у поведінці цих найдрібніших часток під час огрудкування шихти. Вони переважно заковчуються всередину грудок, що значно ускладнює дифузію кисню до їх поверхні та уповільнює процес горіння. Це, в свою чергу, призводить до погіршення газопроникності шихти та розтягування зони горіння по висоті шару. Ефективність цього підходу підтверджується порівняльним аналізом (табл. 3.9), де показники вихідного палива (серія 1), що містить 33,5% фракції 0-0,5 мм, зіставляються з показниками палива після відсівання цієї фракції (серії 2-5).

Таблиця 3.9 – Зміна показників аглопроцесу при відсіванні класу 0,5-0 мм з коксового дріб'язку

Серія дослідів	Витрата вуглецю, %	Вихід придатного, %	Питома продуктивність, т/м ² ·год	Міцність агломерату, вихід фракції <0,5мм, %
1	3,95	79	1,60	23
2	3,95	81	1,52	32
3	3,75	80,5	1,71	25
4	3,35	82,0	1,80	18
5	3,05	81	1,65	21

Аналіз даних з таблиці 3.9 дозволяє виділити ключові переваги відсівання фракції 0-0,5 мм:

- Ефективніше використання вуглецю: видалення дрібної фракції дозволяє скоротити оптимальну витрату вуглецю на спікання (з 3,95% до 3,35% у 4-й серії дослідів).

- Підвищення температурно-теплових умов: незважаючи на зниження вмісту вуглецю, у 4-й серії дослідів було зафіксовано підвищення температури у верхній частині шару на 250°C, що свідчить про більш концентроване та ефективне горіння.

- Зростання виходу придатного агломерату та питомої продуктивності: обидва показники демонструють стійку тенденцію до покращення.

- Покращення міцності агломерату: зменшення виходу дріб'язку (<0,5 мм) після випробування в барабані (з 23% до 18%) свідчить про зростання міцності.

Згідно з вихідними даними, у розглянутому прикладі оптимальним є паливо крупністю 1-2,0 мм. Це вказує на доцільність технологічних заходів, спрямованих на підготовку палива.

Проведений аналіз підтверджує, що крупність твердого палива є вирішальним фактором, який визначає техніко-економічні показники

агломераційного процесу. Виключення з палива найдрібнішої фракції (0-0,5 мм) дозволяє значно покращити газодинаміку шару, підвищити температурно-тепловий рівень процесу та, як наслідок, досягти суттєвого зростання продуктивності та якості агломерату.

Оптимальна ефективність агломераційного процесу досягається шляхом мінімізації або повного виключення фракції палива крупністю менше 0,5 мм.

Для досягнення цієї мети в промислових умовах рекомендується впровадження наступних технологічних заходів:

1. Запобігання переподрібненню палива:

- Застосування більш досконалих та правильно налаштованих дробильних установок, що мінімізують утворення пилоподібних фракцій.

- Впровадження вибіркового дроблення. Цей підхід передбачає попереднє просіювання палива перед дробарками з метою виділення готової фракції (наприклад, 0-3,0 мм). Ця фракція направляється безпосередньо в шихтове відділення, минаючи дробарки. На дроблення надходить лише клас $>3,0$ мм, що знижує навантаження на обладнання та підвищує якість дроблення.

2. Відсівання небажаної фракції:

- Організація відсівання класу $<0,5$ мм з палива вже після його дроблення, безпосередньо перед подачею до бункерів шихтового відділення аглофабрики.

Впровадження цих заходів є ефективним інструментом для підвищення стабільності та продуктивності агломераційних установок. Вони дозволять суттєво покращити техніко-економічні показники процесу, незалежно від того, чи використовується традиційний коксовий дріб'язок, чи його замітники.

3.6 Розробка та обґрунтування раціональної схеми підготовки твердого палива для агломераційного процесу

Якість та фракційний склад палива безпосередньо впливають на газопроникність шару, швидкість процесу та, зрештою, на якість і вартість

кінцевого продукту — агломерату. Основна проблема полягає в тому, що наявність як надмірно дрібних (менше 0,5 мм), так і великих (більше 3 мм) фракцій палива негативно позначається на ключових техніко-економічних показниках виробництва. В умовах дефіциту та постійного зростання вартості якісного коксового дріб'язку, з якими стикаються агломераційні фабрики України, питання оптимізації підготовки та використання палива набуває виняткової актуальності. Це змушує шукати нові, більш ефективні технологічні підходи до управління гранулометричним складом паливного компонента шихти.

Для розуміння шляхів модернізації агломераційного виробництва стратегічно важливо проаналізувати обмеження стандартних технологій підготовки палива. Традиційні схеми не дозволяють повною мірою контролювати фракційний склад палива, що призводить до низки технологічних проблем.

Використання палива з неоптимальним гранулометричним складом має комплексний негативний вплив на процес спікання:

Надмірно дрібні фракції (<0,5 мм) погіршують процес огрудкування шихти, знижують газопроникність шару та інтенсивність горіння. Їхня присутність призводить до нестабільності теплового режиму та зниження як продуктивності агломації, так і міцності агломерату.

Великі фракції (>3,0 мм) палива згоряють не повністю, що веде до його нерациональної витрати. Крім того, вони створюють локальні зони перегріву, що негативно впливає на структуру та металургійні властивості кінцевого продукту.

Стандартне обладнання, зокрема поширені чотирьохвалкові дробарки, хоча й вирішує завдання подрібнення крупних класів, часто призводить до супутньої проблеми — переподрібнення палива та надлишкового утворення шкідливої фракції -0,5 мм.

Прості рішення, як-от відсівання дрібних класів за допомогою грохочення чи повітряної класифікації, не знайшли широкого застосування. По-перше, це вимагає значної реконструкції дробильних відділень, а по-друге, в сучасних умовах дефіциту коксового дріб'язку та вимушеного використання палив-сурогатів

(антрацитовий штиб, худе вугілля) відсівання та утилізація частини палива є економічно недоцільним. Таким чином, існує гостра потреба у пошуку більш комплексних та ефективних технологічних рішень, які дозволять не просто видалити шкідливі фракції, а раціонально їх використати в процесі.

Вивчення передового світового та вітчизняного досвіду є основою для впровадження інновацій. Перспективним напрямком оптимізації є концепція роздільної підготовки та подачі палива, яка передбачає введення частини палива на фінальній стадії огрудкування шихти. Такий підхід покращує умови грануляції та горіння, забезпечуючи вищу температуру рідких фаз і, як наслідок, покращуючи газопроникність високотемпературної зони спікання.

Результати впровадження технології "накочування" палива на огрудковану шихту на провідних металургійних підприємствах демонструють її високу ефективність. Особливо показовою є японська технологія, що використовує два послідовно встановлених барабани-огрудкувачі. Частина палива подається в перший барабан разом з основними компонентами шихти, а решта (переважно крупнозернистий коксик) — у другий. Це дозволяє зменшити частку палива, вкритого рудною дрібницею, що покращує умови його згоряння, та водночас підвищити міцність гранул. Завдяки цьому підходу питома продуктивність агломашини зросла з 32,2 до 56,3 т/(м²·добу), а вихід міцного агломерату класу +50 мм після барабана — з 82,3 до 86,9%.

Таким чином, світова практика однозначно підтверджує, що принцип роздільної подачі палива дозволяє досягти значних покращень ключових показників аглопроцесу, що обґрунтовує доцільність розробки нової, більш комплексної технологічної схеми.

Як комплексне вирішення вищеописаних проблем пропонується інноваційна схема підготовки шихти (рис. 3.3, 3.4). Вона поєднує принципи класифікації палива, оптимізації дроблення та роздільного введення компонентів на агломашину.

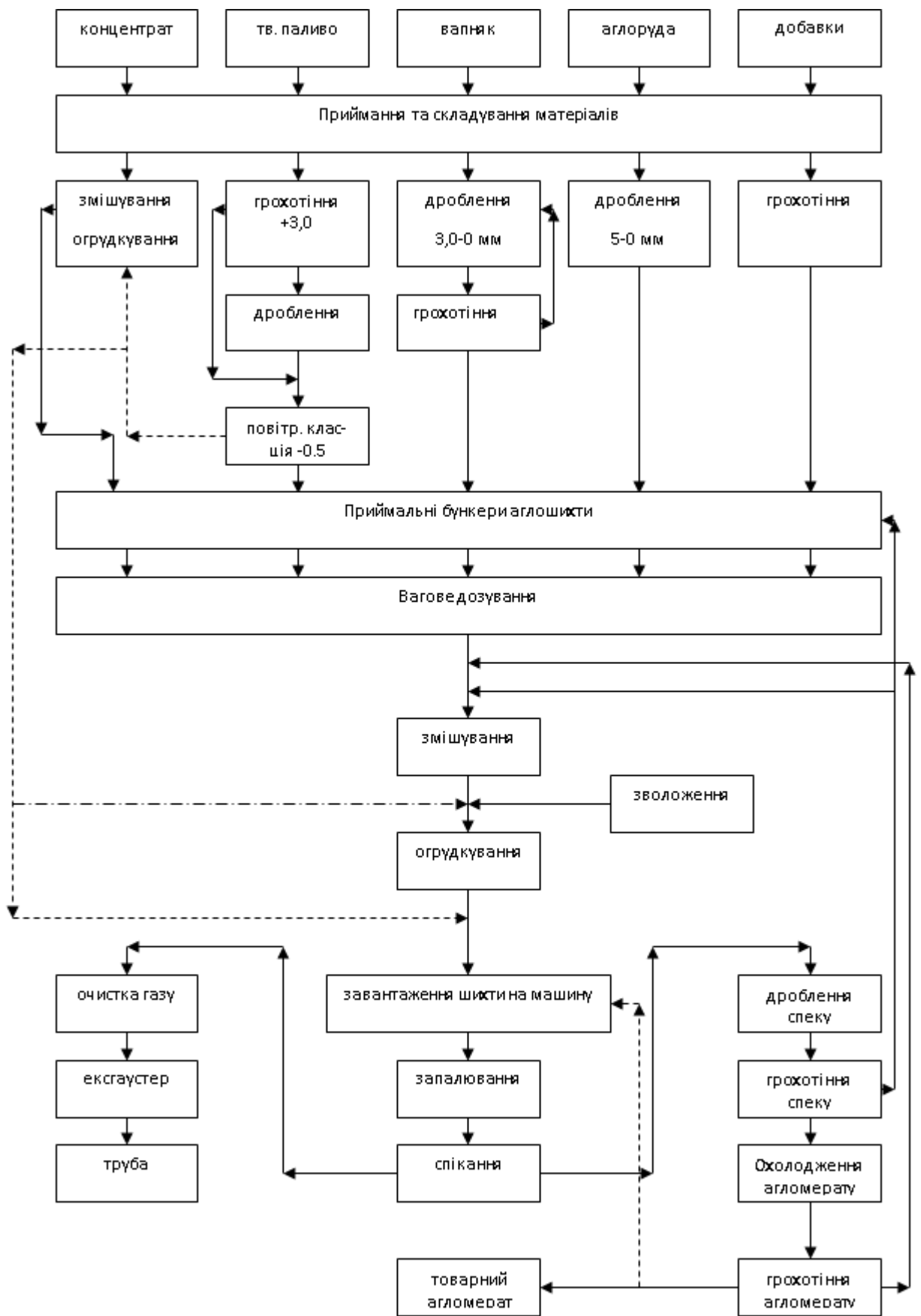


Рисунок 3.3 – Технологічна схема аглопроцесу

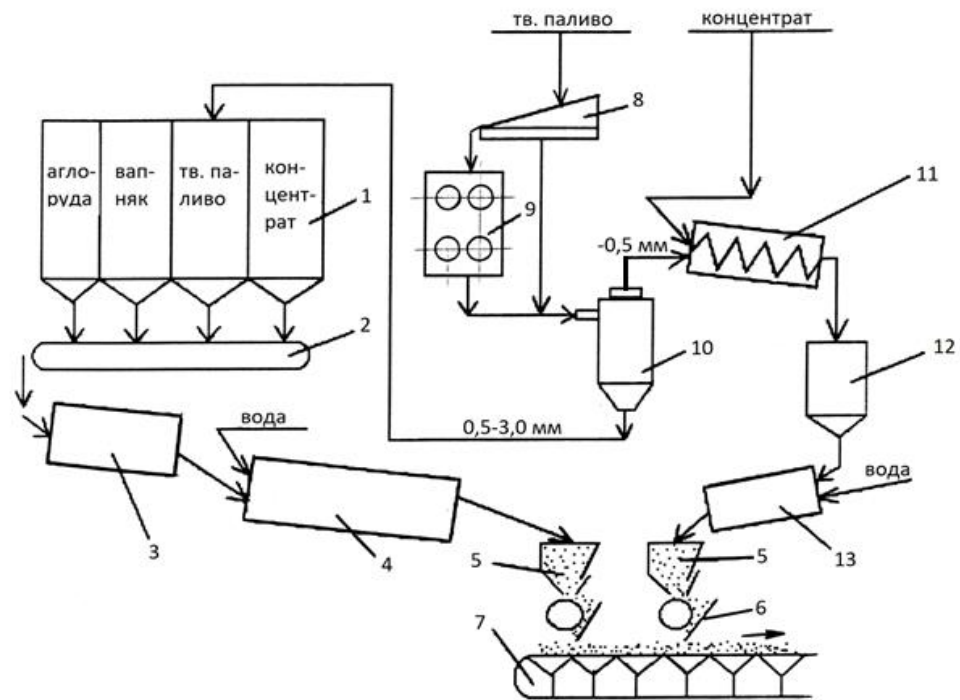


Рисунок 3.4 – Схема ланцюга апаратів підготовки твердого палива та аглошихти: 1 – бункери шихтових матеріалів; 2 – збірний конвейєр аглошихти; 3 – змішувач; 4 – огрудкувач; 5 – барабанний живильник; 6 – лотковий відбивач; 7 – агломашина; 8 – грохот; 9 – чотиривалкова дробарка; 10 – циклон; 11 – шнековий змішувач; 12 – накопичувальний бункер; 13 – огрудкувач рудовугільної суміші

Рекомендована технологічна схема включає наступні послідовні етапи:

1. Попереднє просівання: вихідна суміш твердого палива просівається на грохотах для розділення за класом крупності 3,0 мм. Фракція 3-0 мм, що вже відповідає вимогам, направляється в обхід дробарки.

2. Оптимізоване дроблення: крупна фракція (+3,0 мм) подається у чотирьохвалкову дробарку, валкам якої задаються різні швидкості обертання. Такий режим покращує якість мелення, що дозволяє зменшити утворення шкідливого класу -0,5 мм на 6-10% абс., а ступінь переподрібнення знижується приблизно на 30% відн.

3. Пневматична класифікація: подрібнений продукт змішується з фракцією 3-0 мм, що оминула дробарку, і вся маса палива подається на повітряну

класифікацію в циклони. Тут відбувається розділення на дві цільові фракції: крупну (3,0-0,5 мм) та дрібну (-0,5 мм).

4. Утилізація дрібної фракції: шкідлива фракція -0,5 мм не видаляється з процесу, а раціонально використовується. Її змішують з вологим залізородним концентратом у співвідношенні 1:2 та огрудковують, отримуючи стабільні рудо-вугільні гранули.

5. Двошарове завантаження: на агломераційну машину спочатку укладається основна маса підготовленої шихти (з паливом фракції 3,0-0,5 мм), а поверх неї завантажується шар рудо-вугільних гранул, отриманих на попередньому етапі.

Експериментальні дослідження, що моделювали різні режими шихтопідготовки, є ключовим доказом переваг запропонованої технології. Метою дослідів було порівняння показників агломераційного процесу при використанні традиційної (базової) та інноваційної схем підготовки шихти. Результати ключових серій спікань наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Вплив способу підготовки палива на показники аглопроцесу

Показник	Серія I (Типова шихта)	Серія VII (Інноваційна схема)	Серія VIII (Інноваційна схема, витрата С -15%)
Витрата вуглецю, %	3,95	3,95	3,40
Вихід придатного, %	79,0	86,2	80,1
Питома продуктивність, т/м ² ·год	1,60	1,71	1,62
Міцність (вихід класу 0-5 мм), %	23,0	16,2	21,4
Міцність (вихід класу -0,5 мм), %	8,0	4,8	7,8
Швидкість спікання, мм/хв	22,4	22,3	23,7

Примітка: Серія I - базовий варіант; Серія VII - дріб'язок палива (-0,5 мм) огрудковано з концентратом 1:2 і подано зверху шару шихти; Серія VIII - аналогічно Серії VII, але зі зменшеною на 15% витратою палива.

Аналіз представлених даних чітко демонструє переваги інноваційної схеми. При порівнянні результатів Серії VII з базовою Серією I, при однаковій витраті палива, спостерігаються значні покращення: вихід придатного агломерату зріс на 7,2%, а питома продуктивність — на 0,11 т/м²·год. Міцність агломерату значно покращилась: показник барабанного випробування зріс на 4,6%, а вихід руйнівного класу 0-5 мм знизився на 6,8% абс.

Особливої уваги заслуговують результати Серії VIII. Вони доводять, що навіть зі зниженням питомої витрати палива на 15% інноваційна схема дозволяє досягти показників виходу придатного, продуктивності та міцності, які перевищують базовий варіант з повною витратою палива. Це відкриває значний потенціал для економії дорогого коксового дріб'язку. Такі значні покращення мають чітке технологічне обґрунтування.

Представлені експериментальні дані підтверджують високу ефективність запропонованої схеми, яка базується на фундаментальних фізико-хімічних процесах, що протікають у шарі шихти. Успішність технології пояснюється двома ключовими факторами:

1. Покращення газодинаміки: виведення дрібної фракції палива (-0,5 мм) з основної маси шихти та її подальше окомкування в складі рудо-вугільних гранул значно покращує загальний гранулометричний склад шихти. Це призводить до підвищення газопроникності шару, що забезпечує більш рівномірну фільтрацію повітря та стабільність процесу спікання.

2. Оптимізація термічного режиму: двошарове завантаження створює ідеальні умови для формування міцної структури агломерату. Концентрована подача палива у верхньому, найменш теплонапруженому шарі (у складі рудо-вугільних гранул) забезпечує утворення достатньої кількості розплаву на основі

фаяліту. Водночас у нижніх шарах, де основність шихти вища, навіть при меншій кількості палива утворюється необхідна кількість розплаву на основі залізокальцієвих олівінів. Така комбінація розплавів по висоті шару забезпечує високу підсумкову механічну міцність агломерату.

На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Традиційні методи підготовки палива, що базуються на простому дробленні, є неефективними через проблему переподрібнення та неконтрольований фракційний склад, що негативно впливає на всі ключові показники процесу.

2. Практика роздільного введення палива, реалізована на багатьох підприємствах, доводить свою високу ефективність, дозволяючи значно покращити продуктивність агломашин та якість агломерату при одночасному зниженні витрати палива.

3. Запропонована інноваційна схема, що поєднує класифікацію палива, оптимізоване дроблення та двошарове завантаження шихти, є найбільш досконалим та обґрунтованим рішенням. Вона дозволяє не тільки максимізувати вихід і міцність продукту, але й суттєво знизити питому витрату дефіцитного твердого палива, що має виняткове значення для підвищення конкурентоспроможності виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Антрацитовий штиб і худе вугілля виявилися найбільш технологічно прийнятними заміниками коксу, проте їх застосування обмежене дефіцитністю та жорсткими вимогами до леткості, щоб уникнути утворення смол, які забивають газовідвідний тракт. Напівкокс показав найкращі технологічні результати — питома продуктивність 1,76 т/м²·год та вихід дріб'язку <5 мм лише 20,4%, однак його промислове застосування ускладнене технологічно.

2. Висока температура займання (кокс 620–650 °С, антрацит 560 °С) і вміст коксового залишку >88% забезпечують локалізацію тепла у зоні горіння та максимальну теплову ефективність. Паливо з низькою температурою займання «розтягує» процес горіння, знижує пікову температуру та перешкоджає формуванню міцної структури. Молоді вугілля з низьким коксовим залишком потребують щонайменше подвійної витрати, що економічно не вигідно.

3. Продуктивність і міцність агломерату мають чіткий екстремум. Недостатня витрата (4,0%) викликає неповне спікання та вихід дріб'язку 48,4%, надлишкова (6,0%) — підвищує вихід дріб'язку до 24,8% через розкладання Fe₂O₃ і поліморфне перетворення β→γ Ca₂SiO₄. Оптимальна витрата 5,0–5,5% забезпечує продуктивність 1,64 т/м²·год та вихід дріб'язку 21,6%.

4. Дрібні частки обмежують доступ кисню і сповільнюють горіння. Усунення цієї фракції підвищує продуктивність до 1,80 т/м²·год, знижує вихід руйнівної фракції <0,5 мм з 23% до 18% та зменшує питому витрату вуглецю на 15%.

5. Обробка коксового дріб'язку водними розчинами NaOH та Na₂CO₃ підвищує реакційну здатність палива майже у 3 рази, збільшує продуктивність на 7–12% (базово 1,21 т/м²·год) і покращує механічну міцність. Це дозволяє досягти базових показників при зниженні витрати коксу на ~10%, забезпечуючи економію ресурсів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.В			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	Герасимчук				ВИСНОВКИ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Перевірив</i>	Бабошко						1	2
<i>Н. контр.</i>	Бабошко						МТ-22-1	
<i>Затверди</i>	Бабошко							

6. Класифікація та дроблення палива з огрудкуванням фракції <0,5 мм у стабільні рудо-вугільні гранули та двошарове завантаження шихти підвищують газодинаміку шару і оптимізують термічний профіль. Вихід придатного агломерату зріс на 7,2%, вихід руйнівного класу 0–5 мм знизився з 23% до 16,2%, а питома витрата палива зменшилася на 15% при покращенні продуктивності та міцності.

7. Успішне подолання дефіциту коксу досягається комплексним системним підходом до управління паливною базою та процесом спікання. Рекомендовано впровадження технології комплексної підготовки з двошаровим завантаженням шихти та подальші дослідження щодо адаптації до різних альтернативних палив, зокрема худого вугілля, та оптимізації складу рудо-вугільних гранул для стійкої паливної стратегії аглофабрик України.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.В	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		2

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Babich A., Senk D., Gudenau H. W. *Ironmaking*. Aachen : RWTH Aachen University, 2016. 402 p.
2. Yang W., Zhu D., Pan J., Zhao Y. Influence of fuel characteristics on sintering performance and sinter quality // *Ironmaking & Steelmaking*. 2014. Vol. 41, No. 1. P. 14–21.
3. Zhang Y., Zhou M., Liu X. Effects of fuel size distribution on combustion behavior and productivity in iron ore sintering // *Powder Technology*. 2018. Vol. 326. P. 80–88.
4. Півняк Г. Г., Темченко В. О., Пілов П. І. Технологічні аспекти використання альтернативних палив в агломераційному виробництві // *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2012. № 5. С. 34–39.
5. Remus R., Aguado Monsonet M. A., Roudier S., Delgado Sancho L. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. 617 p.
6. Hu Y., Jiang T., Xue X., Zhang Y. Sulfur migration behavior during iron ore sintering process // *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, No. 3. P. 552–559.
7. Амоша О. І., Булеєв І. П., Земляний М. Г. Стан та перспективи розвитку вугільної промисловості України // *Економіка промисловості*. 2017. № 3. С. 5–18.
8. Kasai E., Kitaguchi H., Nakano M. Formation behavior of tar and its influence on off-gas system during iron ore sintering // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50, No. 7. P. 1006–1013.
9. Li Q., Jiang T., Xue X. Combustion characteristics of lean coal for iron ore sintering // *Fuel Processing Technology*. 2012. Vol. 96. P. 1–7.
10. Huo X., Jiang T., Xue X., Zhang Y. Influence of anthracite replacing coke breeze on sintering performance // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51, No. 6. P. 939–945.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.СВД					
					СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Герасимчук</i>								1	2
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>							МТ-22-1		
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>									
<i>Затверди</i>	<i>Бабошко</i>									

11. Gan M., Fan X., Chen X., Yu Z. Optimization of coke breeze particle size distribution for improving sinter strength // *Ironmaking & Steelmaking*. 2017. Vol. 44, No. 5. P. 350–357.

12. Kasai E., Nakano M., Kitaguchi H. Influence of coke particle size on temperature profile and sinter quality // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50, No. 7. P. 1014–1021.

13. Li H., Zhao S., Zhang C. Effect of fine fuel removal on sinter quality and fuel consumption // *Ironmaking & Steelmaking*. 2020. Vol. 47, No. 6. P. 555–563.

14. Kumar A., Singh R., Verma P. Optimization of coke breeze size distribution for improved sinter properties // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, No. 3. P. 3031–3040.

15. Park J., Lee K., Kim H. Influence of fuel granularity on sinter microstructure and mechanical strength // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021. Vol. 52, No. 4. P. 1734–1745.

16. Roberts S., Johnson P. Adaptive fuel sizing for efficient iron ore sintering // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58, No. 9. P. 1685–1693.

17. Nakamura T., Saito M., Fujimoto K. Effect of fuel particle size and distribution on sintering performance in Japanese ironworks // *Ironmaking & Steelmaking*. 2017. Vol. 44, No. 7. P. 603–610.

					КНУ.РБ.136.26.113с-04.СВД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		2