

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та інноваційних технологій

«Допущено до захисту»
Гарант освітньої програми
«Металургія чорних металів»

Христина МАЛІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
за підсумками виконання освітньо-професійної програми
«Металургія чорних металів»
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Аналіз впливу характеристик шихтових матеріалів на
техніко-економічні показники процесу виробництва залізорудних
окатишів»**

Керівник роботи

Максим ЯГОЛЬНИК

Консультант від
бази практики

Ігор ГАЙДАМАКА

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Микола РОЙ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя, 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	гірничо-металургійний
Кафедра	металургії та інноваційних технологій
Ступінь вищої освіти	бакалавр
Спеціальність	136 Металургія
ОПП	Металургія чорних металів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Христина

МАЛІЙ

«10» квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Рой Миколі Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Аналіз впливу характеристик шихтових матеріалів на техніко-економічні показники процесу виробництва залізорудних окатишів

керівник роботи Ягольник Максим Вікторович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом Університету від № 41/23.02.2026 від 23.02.2026

2. Термін подання роботи 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Навчальна, методична література з спеціальних дисциплін, науково-дослідницькі роботи з тематики виробництва окатишів, науково-технічні літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПРАТ "ЦГЗК".

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. Розділ 1. Аналітична оцінка впливу характеристик шихтових матеріалів на процес виробництва залізорудних окатишів. Розділ 2. Основна частина. Статистичний аналіз даних роботи фабрики по виробництву окатишів при використанні шихтових матеріалів різної якості. Визначення взаємозв'язків впливу характеристик шихтових матеріалів на основні техніко-економічні показники процесу. Розробка пропозицій щодо покращення технології виробництва окатишів. Розділ 3. Охорона праці і екологія. Розділ 4. Розрахунки економічної доцільності запропонованих рішень. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 6 демонстраційних слайдів основної частини, 1 демонстраційний слайд економічна частина.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1, 2, 3, 4	Ягольник М.В. доцент кафедри металургії та інноваційних технологій

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Аналітична частина	11.05 – 13.06.2026
2	Основна частина	11.05 – 13.06.2026
3	Охорона праці та екологія	06 – 13.06.2026
4	Економічно-організаційна частина	06 – 13.06.2026
5	Оформлення пояснювальної записки	13 – 20.06.2026
6	Захист	за графіком

Здобувач

Микола РОЙ

Керівник роботи

Максим ЯГОЛЬНИК

АНОТАЦІЯ

Рой М.Ю. Аналіз впливу характеристик шихтових матеріалів на техніко-економічні показники процесу виробництва залізорудних окатишів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 136 Металургія, ОПП «Металургія чорних металів» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва залізорудних окатишів в умовах ПРАТ "ЦГЗК".

Предметом дослідження є характеристика шихтових матеріалів (вологість, гранулометричний склад, хімічний склад та ін.) та їх вплив на продуктивність процесу виробництва окатишів та якість готової продукції.

У першому розділі проаналізовано сучасні методи виробництва залізорудних окатишів, розглянуто основні етапи виробництва в умовах ПРАТ "ЦГЗК".

У другому розділі проведено аналіз характеристик шихтових матеріалів, які використовуються для виробництва залізорудних окатишів в умовах ПРАТ "ЦГЗК". Проведено аналіз впливу вологості, гранулометричного складу, хімічного складу матеріалів, характеристик бентоніту, основності шихти на продуктивність процесу та якість окатишів. Визначено раціональні рівні цих факторів. Запропоновано покращити технологію за рахунок введення в шихту вуглецевих матеріалів.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці та екології: аналіз небезпечних факторів, заходи щодо запобігання аварійним ситуаціям.

У четвертому розділі виконано розрахунок собівартості окатишів. Визначено економічну ефективність запропонованих заходів, таких як використання вуглецевих матеріалів з оптимальними характеристиками та оптимальною витратою.

Робота складається з: 68 сторінок, 5 ілюстрацій, 12 таблиць, 21 використаних джерел.

ЗАЛІЗОРУДНІ ОКАТИШІ, ШИХТОВІ МАТЕРІАЛИ, ВОЛОГІСТЬ ШИХТИ, ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД, КОНЦЕНТРАТ, БЕНТОНІТ, ЯКІСТЬ ОКАТИШІВ, ПРОДУКТИВНІСТЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 Аналіз технологічної схеми виробництва окатишів.....	8
1.1 Загальні положення та системний аналіз технології приготування шихти для огрудкування.....	8
1.2 Характеристика шихтових матеріалів для виробництва залізорудних окатишів	12
1.3 Фізико-хімічна та мінералогічна характеристика залізорудного концентрату.....	14
1.4 Аналіз використання вапняку як флюсуючої добавки.....	18
1.5 Роль бентоніту як зв'язуючої добавки.....	20
1.6 Вплив некондиційного повернення на технологічний процес.	22
1.7 Порівняльний аналіз хімічного складу багатокomпонентної шихти та готових обпалених окатишів	24
2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ	26
2.1 Характеристика шихтових матеріалів для виробництва окатишів	27
2.2 Аналіз впливу вологості та інших характеристик шихтових матеріалів на процес виробництва окатишів.....	29
2.3 Аналіз можливості використання твердого палива у шихті для виробництва окатишів та вплив характеристик палива на процес	41
3 ОХОРОНА ПРАЦІ І ЕКОЛОГІЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЗАЛІЗОРУДНИХ окатишів	45
3.1 Заходи безпеки при експлуатації обладнання та цивільний захист персоналу в умовах воєнного стану.....	45
3.2 Виробнича санітарія та промислова екологія.....	50
4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ технологічних рішень.....	53
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку світової та вітчизняної чорної металургії характеризується жорсткою конкуренцією на ринку металопродукції, безперервним зростанням цін на енергоносії та суворими вимогами до екологічної безпеки виробництва. У цих умовах підвищення ефективності доменного плавлення та процесів прямого відновлення заліза (DRI/HBI) безпосередньо залежить від якості вихідної залізорудної сировини, основним видом якої є високоміцні офлюсовані залізорудні окатиші.

Технологічний процес огрудкування та високотемпературного випалу окатишів є надзвичайно чутливим до найменших коливань фізико-хімічних, гранулометричних та структурно-механічних властивостей компонентів металургійної шихти — залізорудного магнетитового концентрату, зв'язуючих добавок (бентоніту) та флюсів (вапняку). Невідповідність або нестабільність таких характеристик, як вологість, питома поверхня, мінеральний склад пустої породи та якість бентонітового порошку, призводить до перевитрат дефіцитного природного газу, зниження питомої продуктивності конвеєрних випалювальних машин, а також до погіршення металургійних властивостей готового продукту [1].

Особливої актуальності ця проблема набуває для ПРАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПРАТ «ЦГЗК»), який спеціалізується на випуску високоякісного залізорудного концентрату та окатишів, зокрема преміального сегменту для технологій бездоменної металургії. Впровадження енергозберігаючих заходів, зокрема часткова заміна дорогого природного газу шляхом введення до складу шихти дисперсного твердого палива (коксового дрібняку або антрациту), вимагає

глибокого вивчення кінетики внутрішнього горіння вуглецю та його впливу на рідкофазне спікання і формування мікроструктури окатиша.

Таким чином, системний аналіз та кількісна оцінка взаємозв'язку між характеристиками вихідних шихтових матеріалів і кінцевими техніко-економічними показниками фабрики огрудкування є науково обґрунтованим інструментом для оптимізації технологічних режимів. Це дозволяє забезпечити зниження собівартості виробництва, мінімізувати питомі витрати паливно-енергетичних ресурсів та гарантувати стабільно високу конкурентоспроможність української залізорудної сировини на світовому ринку, що підтверджує високу актуальність і практичну цінність обраного напрямку дослідження.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз впливу фізико-хімічних, гранулометричних і структурних параметрів компонентів вихідної металургійної шихти та визначення раціональних характеристик цих матеріалів з метою покращення техніко-економічної ефективності процесу виробництва залізорудних окатишів та їхніх металургійних властивостей.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- виконати аналітичний огляд сучасних методів виробництва та отримання залізорудних окатишів;
- аналіз гранулометричного, хімічного складу, вологості шихтових матеріалів які застосовуються при виробництві окатишів;
- проаналізувати виробничі показники отримання окатишів та показники роботи машин по виробництву окатишів при використанні шихтових матеріалів з різними характеристиками;
- виконати оцінку економічної ефективності запропонованих заходів та розглянути питання охорони праці та екології.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва залізорудних окатишів в умовах ПРАТ "ЦГЗК".

Предметом дослідження є характеристика шихтових матеріалів (вологість, гранулометричний склад, хімічний склад та ін.) та їх вплив на продуктивність процесу виробництва окатишів та якість готової продукції.

Методи дослідження. У роботі використано аналітичний метод (огляд літературних та нормативно-технічних джерел), порівняльний аналіз виробничих даних, розрахунки продуктивності та узагальнення результатів випробувань.

Практичне значення отриманих результатів. Сформульовані у кваліфікаційній роботі висновки, аналітичні залежності та технологічні рекомендації мають безпосередню практичну спрямованість і можуть бути використані інженерно-технічним персоналом фабрики огрудкування ПРАТ «ЦГЗК» для модернізації та оптимізації діючих технологічних інструкцій шихтопідготовки.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

1.1 Загальні положення та системний аналіз технології приготування шихти для огрудкування

Сучасний етап розвитку металургійної галузі, а також інтенсифікація доменного виробництва і технологій прямого відновлення заліза обумовлюють підвищення вимог до якості залізородної сировини. Провідною тенденцією у виробництві окускованих матеріалів є збільшення вмісту заліза, зниження концентрації шкідливих домішок, зокрема сірки та фосфору, а також забезпечення високих показників міцності продукції як під час транспортування, так і в процесі високотемпературного відновлення у металургійних агрегатах. На фабриці огрудкування ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «ЦГЗК») виготовлення залізородних окатишів здійснюється шляхом формування міцних сферичних гранул із багатокomпонентної шихти, до складу якої входять дрібнодисперсний залізородний концентрат, зв'язуючий компонент — бентонітова глина, а також флюсуюча добавка у вигляді вапняку.

Етап підготовки шихти є однією з ключових складових усього технологічного процесу виробництва готових окатишів. Усі компоненти шихти подаються на спеціалізовану дільницю, де виконуються операції дозування, ретельного змішування та регулювання вологості матеріалу. Фізико-хімічні характеристики, гранулометричний склад і мінералогічні особливості вихідної сировини безпосередньо впливають на формування технологічних властивостей шихти в процесі грудкування, зокрема на утворення капілярно-пористих зв'язків, стійкість сирих окатишів до ударних навантажень при скиданні та їх здатність протистояти

деформаціям під дією власної маси. Водночас зазначені параметри визначають і фізико-металургійні характеристики готових окатишів після високотемпературного випалу, серед яких особливе значення мають міцність на стиск, рівень пористості, відновлюваність та характер руйнування матеріалу [1].

Для забезпечення стабільності процесу огрудкування та зменшення кількості браку вся сировина, що надходить до цеху, проходить обов'язковий вхідний контроль на відповідність вимогам технічних умов і стандартів підприємства. Кожна партія матеріалів супроводжується паспортом якості, у якому наведено дані щодо хімічного складу та маси сировини. Відділ технічного контролю здійснює відбір проб і проведення випробувань відповідно до затверджених методик та карт контролю. У випадку виявлення невідповідності сировини встановленим вимогам або порушень технологічного регламенту оформлюється двосторонній акт, а результати хімічного аналізу оперативно передаються оператору дільниці приготування шихти для своєчасного коригування параметрів дозування вагових живильників.

Центральний гірничо-збагачувальний комбінат - один з найбільших виробників залізорудної продукції в Україні. Комбінат входить до складу об'єднаного ГЗК Групи Метінвест та спеціалізується на виробництві сировини для металургійної промисловості – залізорудного концентрату та окатишів.

Структура ЦГЗК включає: видобувні потужності, які є сировинною базою – родовище Артемівського кар'єру та шахта ім. Колачевського; переробні потужності - дробильна та збагачувальна фабрики; виробничі потужності – фабрика огрудкування, що є ключовою ланкою, де залізорудний концентрат перетворюється на готову продукцію – випалені окатиші, які є кінцевим продуктом для відваження зовнішньому та

внутрішньому споживачу, зручні для транспортування та використання в металургії.

Фабрика огрудкування заснована у серпні 1967 року. До її складу входять три основні технологічні ділянки: ділянка підготовки сировини і складування готової продукції, ділянка виготовлення шихти і огрудкування і ділянка обпалення залізородних окатишів.

Для виготовлення продукції потрібні домішки вапняку, бентоніту в залізородний концентрат, які приймаються та зберігаються на ділянці підготовки сировини й складування. Даний склад є відкритим і не має вагоноскиду. Сировинні матеріали прибувають у вагонах, розвантажуються у спеціальні резервуари після проходження перевірки фахівцями відділу техконтролю.

На етапі створення суміші здійснюється подрібнення вапняку, бентоніту та некондиційних відходів виробництва обпалених окатишів (повернення) у трьох кульових млинах Ш-50. Далі компоненти дозуються та поєднуються у барабанному змішувачі або агрегаті інтенсивної дії «EIRICH».

Готова шихта системою конвеєрів прямує на ділянку огрудкування і завантажується в бункери. З шести бункерів кожного сектору за допомогою стрічкових дозаторів шихта подається в чашові огрудкувачі, кожен з яких має діаметр 7,5 м та продуктивність – 90-120 т/год.

Після огрудкування сирі окатиші подаються на ділянку випалювання складальним конвеєром за допомогою човникового укладальника, проміжного конвеєра і роликового трьохпродуктового укладальника. Їхній діаметр має бути 10-14 мм.

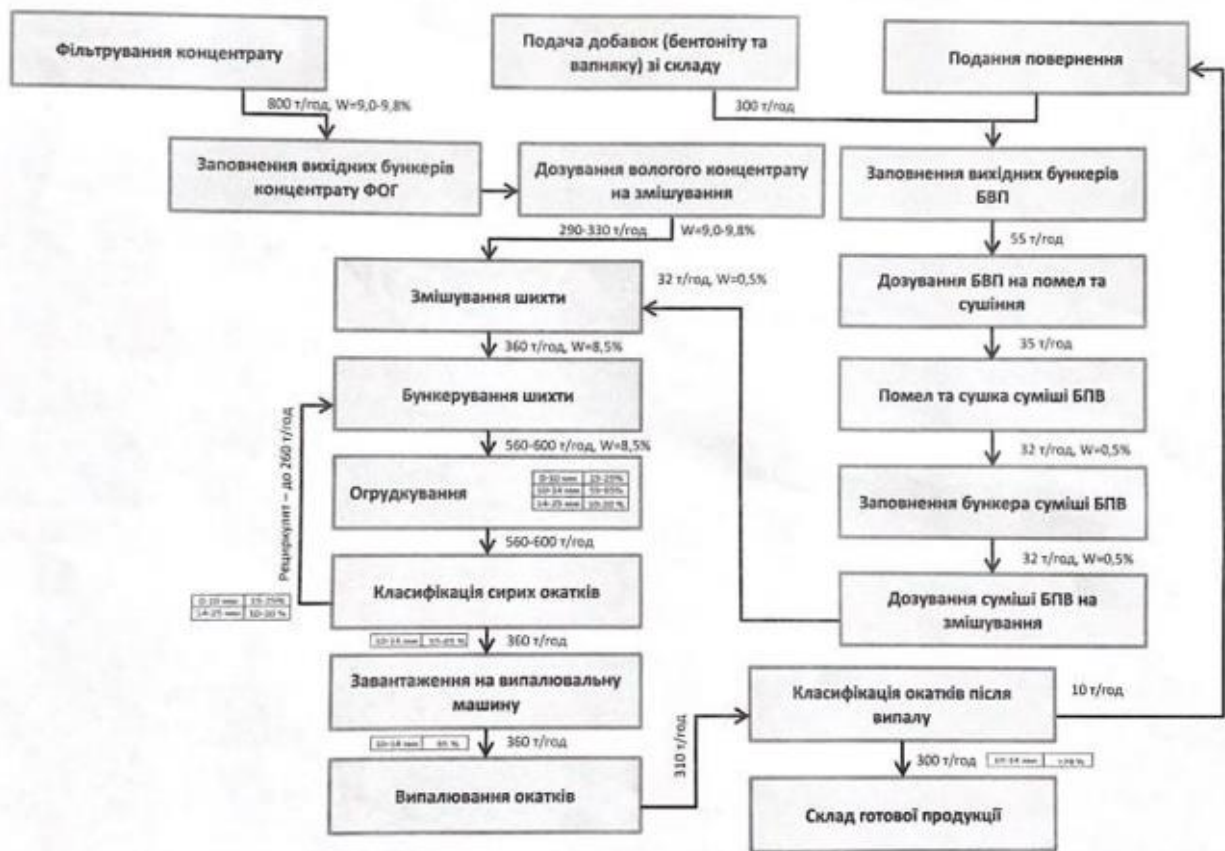


Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва окатишів

Наступний етап - завантаження в обпалювальну машину ОК-324, в якій відбувається ряд фізико-хімічних перетворень (видалення вологи, розкладання карбонатів, десульфуратія, окиснення магнетиту, твердофазні реакції, утворення рідкої фази, рекристалізація рудної фази, утворення кінцевої структури). Температурний фактор є основним параметром випалу шару окатишів на випалювальній машині. У зоні сушки температура підтримується на рівні 250-600 °С. У зоні нагрівання відбувається поступовий підйом температури від 700 до 1200 °С. У зоні випалу температура контролюється залежно від типу концентрату та офлюсування окатишів 1200-1350 °С [2].

Далі окатиші прямують в бункер вирівнювання температури і на самобалансні грохоти типу ГСТ-81 для грохочення. Там вони розділяються на три частини (в залежності від готовності). Перші системою конвеєрів подаються на склад готової продукції, де за допомогою штабелеукладальника укладаються в штабель. Другі укладаються в якості донної та бортової постілі на обпалювальну машину. Треті повертаються на ділянку виготовлення шихти і огрудкування в якості сухої добавки.

З штабелю вже готові окатиші завантажуються двома екскаваторами у вагони і відправляються на металургійні заводи.

1.2 Характеристика шихтових матеріалів для виробництва залізорудних окатишів

На ділянку приготування шихти надходять всі складові компоненти. Виробництво залізорудних окатишів базується на створенні міцних сферичних гранул із концентрату, зв'язуючої добавки (бентоніту) та флюсу (вапняку). Фізико-хімічні властивості цих компонентів визначають якість «сирих» окатишів (міцність при скиданні, вологість) та фізико-металургійні властивості обпалених окатишів (міцність на стиск, пористість, відновлюваність). ЦГЗК виготовляє високоякісні окатиші з вмістом заліза – 67,5%. Тому матеріали, що поступають в цех повинні відповідати за якістю технічним умовам, мати паспорти з зазначенням якості і ваги кожної партії. Для встановлення контролю за якістю сировини, відділ технічного контролю зобов'язаний піддавати випробуванню кожну партію згідно карти випробування. При отриманні некондиційної сировини складається акт. Хімічні аналізи складових шихти передаються оператору ділянки, це є підставою для коригування дозування компонентів.

Залізорудний концентрат

Залізорудний концентрат (англ. – iron ore concentrate) - основний залізоносний компонент, що формує каркас окатиша. Дрібнодисперсний продукт, хімічний та мінералогічний склад якого відповідає вимогам подальшого металургійного перероблення. Це товарний продукт, який ще не підходить для безпосереднього використання у доменній печі чи агрегатах прямого відновлення, але використовується як напівфабрикат для виробництва доменних окатків та окатків під металізацію.

Вапняк

Вапняк у шихті виконує роль флюсу. Його головне завдання - регулювання лужності майбутнього шлаку. Високий вміст кальциту (CaCO_3) свідчить, що це високоякісний флюс. У чистому мінералі вміст CaO становить 56%, отже, має мінімальну кількість домішок. Для виробництва окатишів подрібнюють до стану пудри (фракція 0–0,074 мм повинна складати понад 90%). Це забезпечує максимальну площу контакту з зернами концентрату для швидкої хімічної реакції при випалі.

Бентоніт

Бентоніт — це природна глина, що має високу здатність до набухання та зв'язування частинок. Виконує роль сполучної добавки. Незважаючи на те, що він дещо «засмічує» шихту кремнеземом (SiO_2), його використання є технологічно необхідним для забезпечення механічної міцності окатишів.

Некондиційні відходи виробництва (повернення)

Повернення є невід'ємною частиною технології огрудкування. Некондиція - дріб'язок (менше 8-10 мм): недосформовані окатиші («зародки»), або занадто великі окатиші (понад 16-18 мм) та зростки кількох штук.

Дрібні недогрудковані частки, повертаючись у чашу, слугують «зародками», навколо яких швидше наростають нові шари шихти. Без них

процес формування нових окатишів йшов би набагато повільніше. Проблеми виникають тоді, коли повернення стає забагато (вище норми, яка зазвичай становить 15–25%). Кожна тонна - це енергія, витрачена даремно. Її подрібнили, змішали, нагріли у випалювальній машині, а потім знову відсіяли та відправили на початок. Це прямі збитки на електроенергію та газ. Якщо циркуляційного навантаження 30%, це означає, що потужність цеху впала на ці ж 30%, один і той самий матеріал крутиться по колу замість випуску готової продукції [3, 4].

1.3 Фізико-хімічна та мінералогічна характеристика залізорудного концентрату

Концентрат – основна складова частина шихти, подається системою конвеєрів з ділянки фільтрації або зі складу збагачувальної фабрики в витратні бункери обсягом 100 м³ (кожен) на ділянку приготування шихти. Забір зі складу повинен проводитися відповідно до стандарту підприємства СПТ ЦГЗК-11-2019 «Концентрат для фабрики огрудкування та постачання споживачам. Технічні вимоги». Якість концентрату задається технологічною картою і СТП. Залізорудний концентрат ЦГЗК характеризується високим вмістом загального заліза (68,24%), що відносить його до категорії високоякісної сировини. Низький вміст діоксиду кремнію (SiO₂ — 4,36%) свідчить про глибоке збагачення руди, що дозволяє отримувати окатиші з малою кількістю шлакової фази.

Особливу увагу слід звернути на вкрай низький вміст шкідливих домішок: сірка (S): 0,09% — відповідає вимогам для виробництва якісної сталі; фосфор (P): 0,002% — робить цей концентрат ідеальним для отримання металізованої сировини.

За хімічним складом концентрат марки А-1 забезпечує високу міцність майбутніх окатишів на стадії випалу. Завдяки вмісту Fe_2O_3 на рівні 64,36%, матеріал має стабільні хімічні властивості. Висока концентрація магнетиту та гематиту забезпечує високий вихід металу. Тобто, чим його менше, тим менше флюсів (вапняку) потрібно додавати в шихту і тим менше шлаку утвориться в печі.

Вміст води (<10%) є оптимальним для процесу огрудкування: такої вологості достатньо для формування міцних «сирих» окатишів у чашових або барабанних огрудкувачах без надмірного злипання матеріалу в бункерах дозування. Якщо концентрат буде занадто сухим, окатиші не сформується якщо занадто вологим — вони будуть деформуватися під власною вагою.

Низький вміст Al_2O_3 (0,04%) та MgO (0,10%) вказує на те, що концентрат майже не містить пустої породи, яка б ускладнювала процес плавлення.

Залізорудний концентрат виступає основним залізоносним компонентом шихти, що формує структурний каркас майбутнього окатиша. Це товарний дрібнодисперсний продукт глибокого збагачення залізистих кварцитів, мінералогічний склад якого визначає металургійну цінність готових окатишів [5, 6]. На фабрику огрудкування концентрат транспортується системою стрічкових конвеєрів безпосередньо з ділянки фільтрації або зі складу збагачувальної фабрики у витратні бункери об'ємом 100 м³ кожен. Забір сировини регламентується стандартом підприємства СТП ЦГЗК-11-2019 «Концентрат для фабрики огрудкування та постачання споживачам. Технічні вимоги». Залізорудний концентрат марки А-1 виробництва ПрАТ «ЦГЗК» є високоякісною металургійною сировиною. В таблиці 1.1 наведено детальний хімічний склад концентрату.

Таблиця 1.1 – Характеристика залізорудного концентрату

Елемент	Вміст, %	Технологічне значення параметра
Fe (загальне)	68,24	Висока концентрація заліза; забезпечує отримання високоякісних доменних і металізованих окатишів.
Fe ₂ O ₃	64,36	Характеризує високу частку окисненого заліза (гематитова фаза), забезпечує стабільність при випалі.
SiO ₂	4,36	Низький вміст діоксиду кремнію; свідчить про глибоке збагачення та низьку частку порожньої породи.
Al ₂ O ₃	0,04	Ультранизький вміст глинозему, що позитивно впливає на в'язкість доменних шлаків.
CaO	0,04	Первинна низька основність, що потребує обов'язкового введення флюсу (вапняку).
MgO	0,10	Низький вміст оксиду магнію, що свідчить про чисту залізорудну матрицю.
S (Сірка)	0,09	Шкідлива домішка. Знаходиться в межах норми, легко видаляється при десульфурації під час випалу.
P (Фосфор)	0,002	Шкідлива домішка. Екстремально низький вміст, що робить концентрат ідеальним для отримання сталей високої якості.
Волога (H ₂ O)	< 10,0	Оптимальний діапазон для забезпечення адгезійних властивостей при грудкуванні.

Аналіз хімічного складу показує, що високий вміст загального заліза дозволяє випускати окатиші з вмістом заліза на рівні 66,85–67,5%, що є конкурентною перевагою на світовому ринку залізородної сировини. Низька концентрація кислого оксиду (4,36%) мінімізує об'єм утворення шлакової фази при подальшому переплаві окатишів у споживача, що суттєво знижує витрати палива (коксу, природного газу) в доменних печах та агрегатах прямого відновлення. Вкрай низькі показники вмісту шкідливих домішок — сірки (0,09%) та фосфору (0,002%) — виключають ризики холодноламкості та червоноламкості майбутнього металу.

З технологічної точки зору, важливе значення має дисперсність (питома поверхня) концентрату. Для успішного проходження процесу капілярного зчеплення часток при огрудкуванні, концентрат повинен мати питому поверхню в межах 2500–3000 см²/г за приладом Блейна, при цьому вміст контрольного класу крупності мінус 0,074 мм має становити не менше 90–92%. Висока дисперсність забезпечує розвинену контактну поверхню часток, що підвищує кінетику хімічних реакцій та дифузійних процесів під час випалу. Проте високий вміст твердої магнетитової фази зумовлює високу абразивність концентрату, що призводить до інтенсивного механічного зносу робочих поверхонь змішувального обладнання, перевантажувальних лотків та конвеєрних стрічок [6].

Оскільки концентрат є вологим матеріалом із низькою сипучістю, для його первинного дозування застосовують об'ємне регулювання за допомогою тарілчастих живильників із приводом від електродвигунів постійного струму. Транспортна система подає концентрат у корпус приготування шихти, де він завантажується у вихідні бункери млинів для сушіння. Як сушильний агент використовуються продукти згоряння природного газу з температурою 400–500 °С. Висушений концентрат надходить у витратні бункери. Рівень заповнення цих бункерів

контролюється автоматизованою системою і за допомогою реверсивних пересувних конвеєрів Ш-3 та Ш-4 підтримується на рівні не нижче 30% від максимальної висоти для запобігання утворенню динамічних ударів та склепінь матеріалу.

1.4 Аналіз використання вапняку як флюсуючої добавки

Вапняк у складі багатокомпонентної шихти залізорудних окатишів виконує функцію флюсуючої добавки. Його впровадження в технологічний процес обумовлене необхідністю зв'язування кислих оксидів () порожньої породи концентрату і золи палива, а також регулювання заданого модуля основності готової продукції:

Раніше у виробництві ПрАТ «ЦГЗК» переважно використовувалися високоякісні вапняки з родовищ, розташованих у регіонах, які на даний час перебувають під тимчасовою окупацією або мають втрачений транспортний зв'язок через пошкодження логістичної інфраструктури внаслідок воєнних дій. У зв'язку з цим підприємство було змушене оперативно шукати альтернативні джерела сировини для забезпечення стабільної роботи фабрики огрудкування.

У межах адаптації виробництва до умов воєнного стану було прийнято рішення перейти на постачання флюсового вапняку з кар'єрів Івано-Франківської області. Незважаючи на значне збільшення відстані перевезень та складніші умови залізничної логістики, нова сировина показала достатньо високі фізико-хімічні характеристики. Проведений контроль якості підтвердив, що івано-франківські вапняки відповідають вимогам технологічного регламенту фабрики та можуть використовуватись у процесі виробництва залізорудних окатишів без погіршення основних технологічних показників.

Згідно з даними хімічного аналізу, вапняк характеризується високим вмістом активного оксиду кальцію, що свідчить про високу чистоту карбонатної сировини (вміст мінералу кальциту наближається до теоретичного максимуму). Вміст шкідливих та баластних оксидів є мінімальним: діоксид кремнію становить 1,7%, а оксид магнію — 1,26%. Таке співвідношення запобігає небажаній доломітизації флюсу та стабілізує в'язкість первинних розплавів.

Важливим параметром є показник втрат при прожарюванні (П.П.П.), який для досліджуваного вапняку становить 34,98%. Цей показник майже повністю обумовлений проходженням ендотермічної реакції термічної дисоціації (декарбонізації) кальциту:



Дана реакція протікає з поглинанням значної кількості теплової енергії, що накладає додаткові вимоги до розрахунку теплового балансу випалювальної машини. Передчасне або запізнILE розкладання карбонатів у шарі окатишів може призвести до деструкції структури гранул через інтенсивне виділення діоксиду вуглецю. Після видалення газу частинки вапняку набувають високої пористості, що інтенсифікує процеси твердофазової дифузії. Вільний оксид кальцію вступає в хімічну взаємодію з та концентрату, утворюючи низькоплавкі сполуки — ферити кальцію та силікати (наприклад, воластоніт), які зміцнюють структуру окатиша рідкофазовим спіканням за нижчих температур.

Технологічний ланцюг підготовки вапняку на ПрАТ «ЦГЗК» включає доставку партій об'ємом до 4000 тонн на залізничну естакаду складу сирих матеріалів, формування штабелів грейферними кранами та двостадійне подрібнення:

- **Перша стадія.** Дроблення у молоткових дробарках від вихідної крупності 50–0 мм до проміжної фракції 20–0 мм.

- **Друга стадія.** Тонкий помел у млинах суміщено із сушінням продуктами згоряння газу (температура носія 400–500 °С) до досягнення високодисперсного стану пудри (вміст фракції мінус 0,056 мм повинен перевищувати 90%).

Готовий флюсовий порошок пневмотранспортом подається у відповідні бункери дозування шихтового відділення.

1.5 Роль бентоніту як зв'язуючої добавки

Бентонітовий концентрат (глина) є критично важливою зв'язуючою добавкою, введення якої в кількості 0,5–1,0% від маси шихти забезпечує утворення міцних сирих гранул. Основним мінералом бентоніту є монморилоніт (вміст не менше 70%), який визначає унікальні колоїдно-хімічні властивості добавки. Хімічний склад бентоніту, що використовується на підприємстві, характеризується високим вмістом діоксиду кремнію, оксиду алюмінію та оксиду магнію. Показник П.П.П. становить 13,10% і відображає видалення кристалізаційної та конституційної вологи з решітки глинистих мінералів під час нагрівання [3].

Головною технологічною характеристикою бентоніту є його висока гідрофільність та монморилонітовий показник. Бентонітова глина здатна адсорбувати об'єм води, який у 8–15 разів перевищує її власну суху масу, і при цьому збільшуватися в об'ємі (набухати) до 30 разів. При змішуванні з вологим залізорудним концентратом високодисперсні частинки бентоніту рівномірно розподіляються по поверхні зерен магнетиту, утворюючи пластичну гелеподібну матрицю.

Вплив бентоніту на процес структуроутворення сирих окатишів полягає в наступному:

- **Стабілізація вологи.** Завдяки високій поглинальній здатності, бентоніт зв'язує надлишкову вільну вологість шихти, перетворюючи її в плівкову та капілярну форму. Це запобігає перезволоженню поверхні окатишів та їхньому злипанню в бункерах та на конвеєрах.

- **Формування «містків» зчеплення.** При скочуванні шихти в огрудкувачах бентонітовий гель утворює колоїдні містки між зернами концентрату, забезпечуючи високу динамічну міцність сирих окатишів на удар (опір руйнуванню при скиданні з конвеєра на конвеєр) та на статичний стиск.

- **Підвищення теплової стійкості (шокової температури).** На початкових стадіях термообробки (зона сушіння випалювальної машини) бентонітова матриця утримує цілісність каркаса окатиша при інтенсивному випаровуванні капілярної вологи, запобігаючи розтріскуванню та депітації (луценню) гранул під дією тиску водяної пари. Вона утримує структуру до моменту утворення міцних керамічних містків спікання.

Підготовка бентоніту на ЦГЗК реалізується у спеціалізованому комплексі, що включає відкритий склад приймання сировини, корпус сушіння та закритий склад сухого високодисперсного бентоніту, звідки матеріал дозується в загальний потік шихти.

Високий вміст SiO_2 (46,0%) засвідчує, що це основний каркас глинистих мінералів. Хоча кремнезем вважається шкідливою домішкою для заліза, у бентоніті він є частиною структури, яка забезпечує в'язкість. Вміст оксидів алюмінію, заліза та магнію (16,04%) та (4,0%) визначає хімічну стійкість бентоніту. Втрати при прожарюванні - 13,10%. Для бентоніту цей показник в основному складається з кристалізаційної

(зв'язаної) вологи, яка видаляється лише при високих температурах, призводячи до незворотної втрати пластичних властивостей.

Вагони з бентонітом на складі сирих матеріалів розвантажуються аналогічно вапняку. Якість визначається технічними умовами або сертифікатом та перевіряється відділом технічного контролю. До складу комплексу підготовки бентоніту входить: відкритий склад, корпус сушки і закритий склад сухого бентоніту.

1.6 Вплив некондиційного повернення на технологічний процес

Технологічний процес огрудкування супроводжується утворенням певної кількості некондиційного матеріалу (повернення), до якого належать недогрудковані дрібні фракції (менше 8–10 мм), занадто великі перерощені окатиші (понад 16–18 мм), а також зростки кількох гранул. Циркуляційне навантаження є нормативним елементом процесу, якщо його частка знаходиться в межах 15–25% від загальної продуктивності. Дрібне кондиційне повернення виконує позитивну роль «зародків» (центрів грануляції) у чаші огрудкувача, навколо яких відбувається інтенсивне налипання свіжих шарів дисперсної шихти, що суттєво прискорює кінетику росту окатишів.

Проте перевищення оптимального рівня повернення (понад 25–30%) свідчить про розбалансування процесу і веде до негативних техніко-економічних наслідків. Кожна тонна надлишкового повернення є джерелом прямих енергетичних збитків: матеріал проходить повний цикл підготовки, дозування, змішування та підігріву на машині, але відсіюється і повертається в голову процесу, знижуючи корисну продуктивність випалювальної машини на аналогічну величину (до 30%).

Основним драйвером процесу огрудкування та фактором керування якістю сирих окатишів є вологість шихти. Вплив вологості має екстремальний характер:

- **Знижена вологість (нижче оптимальної).** Призводить до зменшення капілярних сил зчеплення. Шихта погано огрудковується, процес вимагає зниження питомого навантаження та збільшення часу перебування матеріалу в чаші. Виникає брак у вигляді дрібних окатишів та сухої «підшихтовки» (неогрудкованого пилу), що погіршує газовідвідні властивості шару на випалювальній машині. Для компенсації дефіциту вологи форсунки дрібнодисперсного розпилення подають воду безпосередньо в чашу нижче точки завантаження матеріалу.

- **Оптимальна вологість (для умов ЦГЗК становить 8,5–8,7%).** Забезпечує максимальну кінетику росту гранул з отриманням найбільш високих показників міцності та виходу цільової фракції окатишів розміром 10–14,7 мм.

- **Надлишкова вологість (вище оптимальної).** На поверхні часток утворюється надлишкова вільна вода, капілярні містки руйнуються, переход у суспензійний стан. Огрудкувач починає безконтрольно видавати великі грудки та зростки, середній розмір гранул різко зростає, а їхня механічна стійкість до деформації падає — окатиші пливуть і розплющуються під власною вагою.

Додатковим технологічним чинником є стан донного та бортового гарнісажу чаші огрудкувача, товщина якого має суворо витримуватися в межах 15–25 мм. Локальний зрив гарнісажу оголює метал чаші, викликає налипання великих мас шихти з наступним їх зривом у вигляді безформних грудок, що повністю дестабілізує ситовий склад. Оператор зобов'язаний постійно контролювати стан та геометричні параметри ножів-очисників та здійснювати своєчасний ремонт днища агрегата.

1.7 Порівняльний аналіз хімічного складу багатокomпонентної шихти та готових обпалених окатишів

Високотемпературний випал у випалювальних машинах конвеєрного типу є завершальним етапом формування заданих фізико-хімічних та металургійних властивостей залізородних окатишів. Процес випалу супроводжується глибокими фазовими перетвореннями, декарбонізацією флюсів та повним окисненням магнетиту до гематиту.

Для оцінки ефективності та повноти проходження термохімічних реакцій у таблиці 1.2 наведено порівняльний аналіз хімічного складу вихідної шихти та готового обпаленого окатиша ПрАТ «ЦГЗК».

Головним критерієм кондиційності обпалених окатишів є падіння вмісту з 28,08% до 0,50%. Екзотермічний ефект від окиснення магнетиту до гематиту виділяє додаткове тепло всередині шару окатишів, що дозволяє суттєво знизити питому витрату зовнішнього палива (природного газу) на пальниках випалювальної машини. Перекристалізація та утворення гематитових зростків забезпечують високу механічну міцність окатишів на стиск (понад 250–300 кг/окатиш), що мінімізує їхнє руйнування при транспортуванні та перевантаженні.

Таблиця 1.2 – Порівняння хімічного складу вихідної шихти та продукції

Параметр	Вміст у вихідній шихті, %	Вміст у готовому окатиші, %	Аналітичний коментар та характер фазових перетворень
Fe (загальне)	68,5	66,85	Це обумовлено введенням у шихту не залізовмісних добавок — вапняку та бентоніту, які дещо розбавляють загальну масу.

FeO (Оксид заліза II)	28,08	0,50	Практично повне зникнення закису заліза свідчить про високу інтенсивність та завершеність процесу окиснення магнетиту за екзотермічною реакцією: .
Fe ₂ O ₃ (Оксид заліза III)	66,45	94,76	Перекристалізація магнетиту в гематит призводить до утворення міцних керамічних містків зчеплення, що забезпечує кінцеву міцність окатиша на стиск.
SiO ₂	3,5	3,4	Діоксид кремнію бере участь у формуванні силікатної зв'язки (шлакової фази), взаємодіючи з доданим вапняку.
CaO	0,39	0,39	Рівень оксиду кальцію стабільний, фіксує задану технологічним регламентом основність окатиша.
MgO	0,14	0,14	Показник стабільний, входить до складу силікатних розплавів без негативного впливу на в'язкість.
Втрати при прожарюванні (П.П.П.)	0,79	0,18	Це підтверджує повне видалення летких речовин, діоксиду вуглецю та повної елімінації вологи бентоніту.

2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

Сучасний розвиток чорної металургії характеризується безперервним підвищенням вимог до якості залізорудної сировини, яка направляється до доменного плавлення або безпосереднього одержання заліза. Окатиші залізорудні є одним із основних компонентів металургійної шихти. Техніко-економічна ефективність їх виробництва та подальшого використання суттєво залежить від фізико-хімічних, структурно-механічних та гранулометричних властивостей вихідних шихтових матеріалів. У даному розділі проведено детальний аналіз впливу характеристик компонентів шихти на показники грудкування та випалу окатишів у специфічних умовах виробництва ПРАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПРАТ «ЦГЗК»).

Технологічна схема фабрики угрудкування ПРАТ «ЦГЗК» орієнтована на переробку високоякісних магнетитових концентратів із отриманням як доменних окатишів, так і окатишів для прямого відновлення заліза (DRI). Стабільність роботи випалювальних машин, питома продуктивність обладнання, витрати паливно-енергетичних ресурсів та міцнісні характеристики готової продукції безпосередньо визначаються якісними параметрами концентрату, бентоніту, вапняку та твердого палива, що вводиться до складу шихти.

2.1 Характеристика шихтових матеріалів для виробництва окатишів

Шихтовий комплекс сучасного залізорудного виробництва базується на трьох основних китах: залізовмісній основі (концентрат), зв'язуючих мінеральних добавках (бентоніт) та флюсуючих компонентах (вапняк або доломіт). Для умов ЦГЗК специфіка визначається високим ступенем розкриття залізовмісних мінералів під час подрібнення, що вимагає специфічного підходу до технологічних режимів.

Магнетитовий концентрат ЦГЗК є основним компонентом (понад 95-97 % сухої маси шихти). Його мінералогічна основа представлена магнетитом (Fe_3O_4) з незначними домішками гематиту (Fe_2O_3) та мартиту. Пуста порода переважно складається з кварцу, залізистих силікатів (кумінгтоніту, актиноліту) та незначної кількості карбонатів. Дисперсність концентрату є найважливішим фактором його грудкування. Питома поверхня матеріалу безпосередньо впливає на товщину гідратних оболонок навколо частинок та величину капілярних сил.

Бентонітовий глинопорошок додається в кількості від 0,5 до 1,2 % і виступає головним регулятором реологічних властивостей шихти. Основним мінералом бентоніту є монтморилоніт, тришаровий силікат, здатний до значного внутрішньокристалічного набухання при контакті з водою. Флюсуючий вапняк використовується у вигляді тонкодисперсного порошку. Його хімічна функція — нейтралізація надлишкового SiO_2 та формування низькоплавких силікатних і феритових систем при випалюванні, що забезпечує міцнісний каркас готового окатиша [7].

Основним компонентом шихти для виробництва окатишів на ПРАТ «ЦГЗК» є залізорудний магнетитовий концентрат, отриманий в результаті глибокого збагачення залізистих кварцитів Глеюватського, Петрівського та

Артемівського родовищ. Концентрат характеризується високим вмістом заліза загального ($Fe_{\text{заг}}$) та відносно низьким вмістом діоксиду кремнію (SiO_2), що забезпечує одержання кондиційного металургійного продукту.

Для забезпечення необхідної міцності сирих окатишів під час транспортування та висушування до шихти обов'язково вводиться зв'язуюча добавка — бентонітова глина (бентоніт). ПРАТ «ЦГЗК» використовує бентонітові порошки вітчизняних родовищ (зокрема, Черкаського родовища) або імпорتنі аналоги, що мають високу колоїдність та здатність до набухання. Бентоніт діє як пластифікатор, утримуючи вологу та формуючи міцні коагуляційні структури між частинками магнетиту.

З метою отримання офлюсованих окатишів, які мають вищі металургійні властивості у доменній печі (зокрема, кращу розм'якшуваність та відновлюваність), до шихти вводиться флюсуюча добавка — тонкозмелений вапняк або доломітизований вапняк. Вапняк забезпечує необхідне співвідношення CaO/SiO_2 (модуль основності), що впливає на формування рідких фаз при випалюванні сирих окатишів на конвеєрній машині.

У таблиці 2.1 наведено типовий усереднений хімічний та мінералогічний склад основних компонентів шихти, що використовуються у технологічних потоках фабрики огрудкування ПРАТ «ЦГЗК».

Важливе місце у структурі матеріального балансу займають також оборотні матеріали, до яких відносяться відсів сирих та обпалених окатишів, уловлений пил з аспіраційних та газоочисних установок. Повернення оборотних матеріалів у технологічний процес дозволяє мінімізувати втрати залізовмісної сировини, проте вимагає суворого контролю їх кількості та крупності, оскільки надмірне накопичення пилу в шихті погіршує показники огрудкування.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад шихтових матеріалів

Компонент шихти	Fe, %	SiO ₂ , %	CaO, %	MgO, %	Al ₂ O ₃ , %	ППП, %
Магнетитовий концентрат	65.5–68.2	4.2–5.5	0.25–0.40	0.30–0.50	0.15–0.30	—
Бентонітовий порошок	1.2–2.5	56.0–62.0	1.5–3.2	2.0–4.1	14.5–18.2	6.5–9.0
Вапняк флюсуючий	0.3–0.8	1.0–2.5	51.0–54.5	0.8–2.2	0.4–0.9	41.5–43.2

2.2 Аналіз впливу вологості та інших характеристик шихтових матеріалів на процес виробництва окатишів

Процес огрудкування дисперсних матеріалів є надзвичайно чутливим до фізико-хімічних властивостей компонентів шихти. Серед них визначальними є вологість, гранулометричний склад (питома поверхня) та хімічний склад, які задають характер капілярних та молекулярних взаємодій між частинками під час формування зародків та росту окатишів.

Вологість шихти є критичним параметром. Вода у процесі огрудкування виконує роль сполучної ланки. При оптимальній вологості рідка фаза повністю заповнює міжчастинковий простір, створюючи максимальний капілярний тиск, що стягує тверді частинки магнетиту. Для умов ПРАТ «ЦГЗК» оптимальний діапазон вологості шихти перед дисковими чи барабанними огрудкувачами становить 8.4–8.8 %. Відхилення від цього діапазону призводить до наступних негативних наслідків:

1. Зниження вологості менше 8.2 % обумовлює дефіцит капілярної вологи. Капілярні сили стають недостатніми для утримання частинок,

швидкість росту окатишів різко падає, збільшується вихід дрібних фракцій (відсіву <10 мм), а отримані сирі окатиші мають низьку міцність на удар та стиснення.

2. Перезволоження шихти (більше 9.0 %) викликає появу вільної вологи на поверхні окатишів. Це призводить до інтенсивного неконтрольованого росту гранул, утворення конгломератів (так званих «інакших» зліпків) та різкого зниження пористості. Такі окатиші мають низьку термічну міцність і при кулінарному нагріванні на випалювальній машині руйнуються внаслідок інтенсивного внутрішнього пароутворення («ефект вибуху»).

Волога в процесі грудкування є не просто розчинником або змочувальною рідиною, а безпосереднім структурним елементом капілярної системи сирого окатиша. Залежно від кількості вологи в системі виділяють кілька станів зволоження: гігроскопічний, плівковий, капілярний та каплеподібний. Максимальна міцність сирих гранул досягається при переході від плівкового до капілярного стану, коли вільний міжчастинковий простір майже повністю заповнений водою, а увігнуті меніски рідини створюють негативний капілярний тиск, який стискає мінеральні зерна магнетиту [8].

Для умов ПРАТ «ЦГЗК» оптимальна технологічна вологість залізорудного концентрату на виході з ділянки вакуум-фільтрації та перед подачею на дискові грудкувачі становить 8,4–8,8 % див. табл. 2.2. Зниження або перевищення цього інтервалу дестабілізує весь технологічний потік випалювальної машини. При зниженні вологості менше 8,0 % швидкість зародкоутворення різко знижується, процес грудкування переходить у режим сухого стирання, що призводить до високого виходу циркуляційного навантаження (дрібною фракції <10 мм).

Таблиця 2.2 - Залежність показників огрудкування та якості сирих окатишів від вологості шихти

Вологість шихти, %	Міцність на стиснення сирих, кг/ок	Міцність на удар (кількість скидань)	Питома продуктивність, т/(м ² *год)	Вихід фракції 10-14 мм, %
7.8	0.4	1.5	0.45	45.0
8.0	0.7	2.2	0.62	60.0
8.2	1.1	3.5	0.80	78.0
8.4 (Опт)	1.5	4.8	0.98	91.0
8.6 (Опт)	1.6	5.2	1.05	94.0
8.8 (Опт)	1.4	4.5	1.01	90.0
9.0	0.9	3.1	0.75	72.0
9.2	0.5	1.8	0.50	48.0

Графічне відображення залежності міцності сирих окатишів та питомої продуктивності грудкувача від вологості шихти на рисунку 2.1 показує екстремальний (параболічний) характер.

Аналіз наведених даних чітко вказує на те, що перезволоження понад 9,0 % призводить до катастрофічного зниження міцності на удар та стиснення. Вільна волога виходить на поверхню гранул, змащує пластичні контакти, перетворюючи окатиш на текучу систему. Окрім того, надлишок внутрішньої капілярної вологи створює високу загрозу руйнування окатишів у зоні сушки випалювальної машини. При швидкому нагріванні вище 100 °С вода всередині окатиша перетворюється на пару, тиск якої перевищує механічний опір стінок гранули, викликаючи термічне тріскання (депітацію), що різко погіршує газопроникність шару окатишів на решітці.

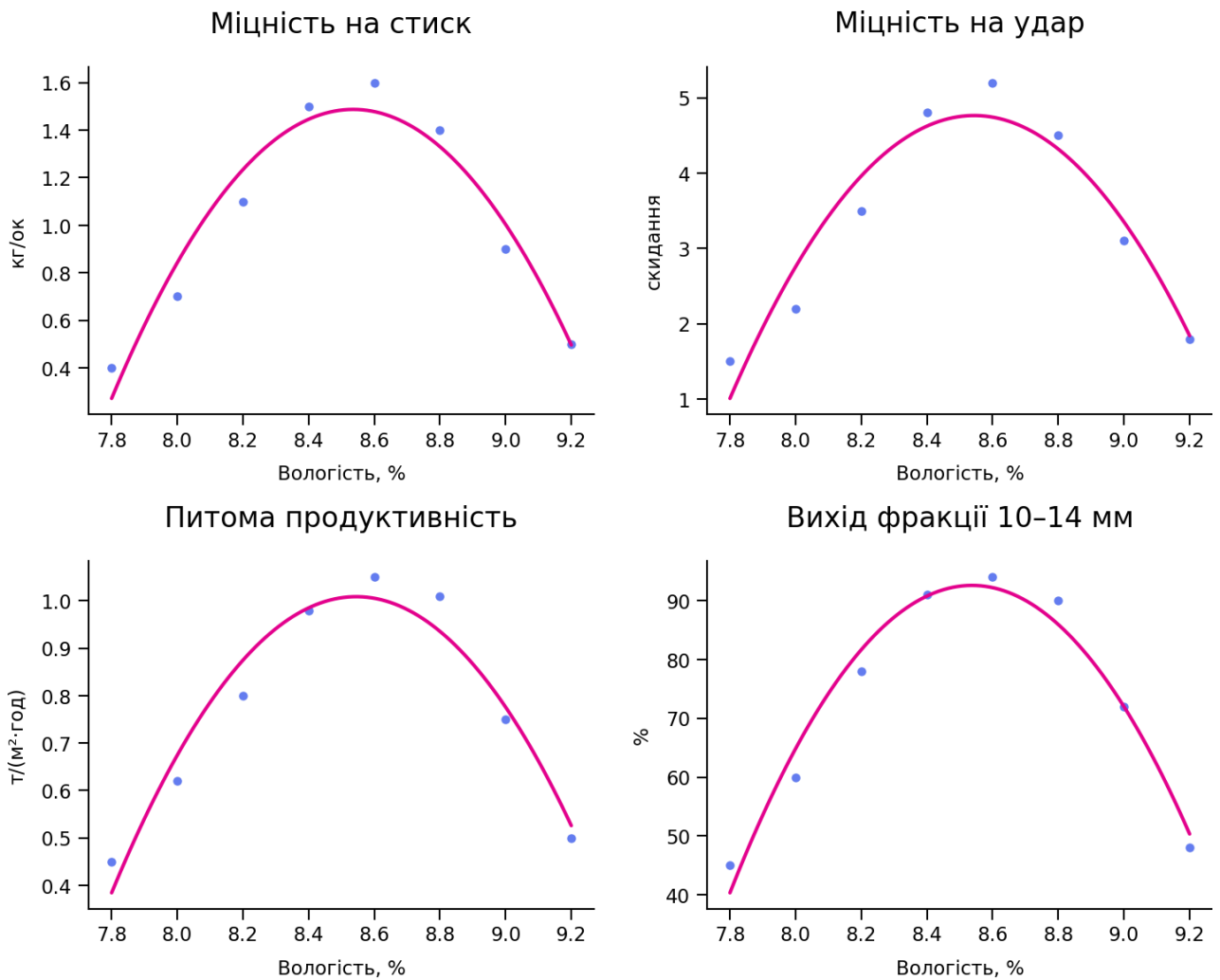


Рисунок 2.1 – Вплив вологості шихти на показники процесу

Гранулометричний склад шихтових матеріалів, і в першу чергу залізородного концентрату, характеризується вмістом контрольного класу мінусового компоненту (фракція мінус 0.044 мм) та питомою поверхнею. Для ефективного угрудкування концентрат ПРАТ «ЦГЗК» повинен містити не менше 90–92 % класу -0.044 мм, що відповідає питомій поверхні 1600–1800 см²/г. Збільшення дисперсності позитивно впливає на кінетику грудкування, збільшуючи кількість контактів між частинками, проте надмірне подрібнення (більше 2200 см²/г) збільшує потребу в бентоніті та погіршує фільтраційні властивості пульпи при зневодненні [9].

Якість бентонітового глинопорошку визначається передусім його мінеральним складом, а саме концентрацією монтморилоніту, та характером обмінного комплексу (натрієвий чи кальцієвий бентоніт). Натрієва форма мінералу має значно вищу здатність до гідратації, її набухання досягає 15–20 об'ємів води на один об'єм глини, тоді як для кальцієвої форми цей показник не перевищує 4–6 об'ємів. Висока колоїдність забезпечує утворення міцних гелеподібних плівок, які демпфують динамічні навантаження під час перевантажень сирих окатишів.

На ПРАТ «ЦГЗК» критично важливими показниками бентоніту є теплостійкість зв'язуючих властивостей та вихід колоїдної фракції. Зменшення виходу монтморилонітової фракції змушує збільшувати питому витрату бентоніту з 0,6 % до 1,2–1,5 %. Це тягне за собою серйозні техніко-економічні наслідки: кожен додатковий відсоток бентоніту вносить у шихту близько 0,6 % SiO_2 , що призводить до еквівалентного зниження вмісту заліза в готовому окатиші на 0,4–0,5 % та підвищення витрат палива на випал через необхідність нагрівання та дегідратації додаткових об'ємів глини.

Розглянемо кількісну залежність міцності сирих окатишів та кінцевої якості обпаленого продукту від показника набухання та колоїдності використовуваного бентонітового порошку при фіксованій його витраті на рівні 0,7 % див. табл. 2.3.

З наведених даних та на рис. 2.2 видно чітку лінійну залежність: використання активованих натрієвих бентонітів із високою колоїдністю дозволяє підняти термічну стійкість гранул з 320 °C до 560 °C. Це дає можливість значно інтенсифікувати температурний режим у зоні сушки випалювальної машини конвеєрного типу без ризику руйнування шару, підвищуючи загальну швидкість руху палет і збільшуючи питому

продуктивність агрегату на 12–15 % при одночасному зниженні витрат природного газу.

Таблиця 2.3 - Вплив колоїдності та індексу набухання бентоніту на якісні та економічні показники

Індекс набухання бентоніту, мл/2г	Колоїдність, %	Міцність сирого окатиша, кг/ок	Термічна стійкість окатишів, °С	Питома витрата газу на випал, м3/т
6	65.0	0.6	320	14.2
10	72.0	0.9	380	13.5
14	80.0	1.3	440	12.8
18 (Натрієвий)	88.0	1.7	510	12.2
22 (Активований)	94.0	1.9	560	11.9

Хімічний склад матеріалів визначає поведінку окатишів під час високотемпературного випалу. Вміст діоксиду кремнію (SiO_2) визначає кількість силікатної зв'язки, що утворюється при температурах 1200–1300 °С. При оптимальному вмісті SiO_2 (4.5–5.2 %) у структурі обпаленого окатиша формується оптимальна кількість залізисто-силікатного розплаву, який цементує зерна магнетиту та гематиту, забезпечуючи високу міцність готового продукту на стиснення (понад 250 кг/окатиш). Вплив основних хімічних компонентів на якість продукції систематизовано у таблиці 2.4.

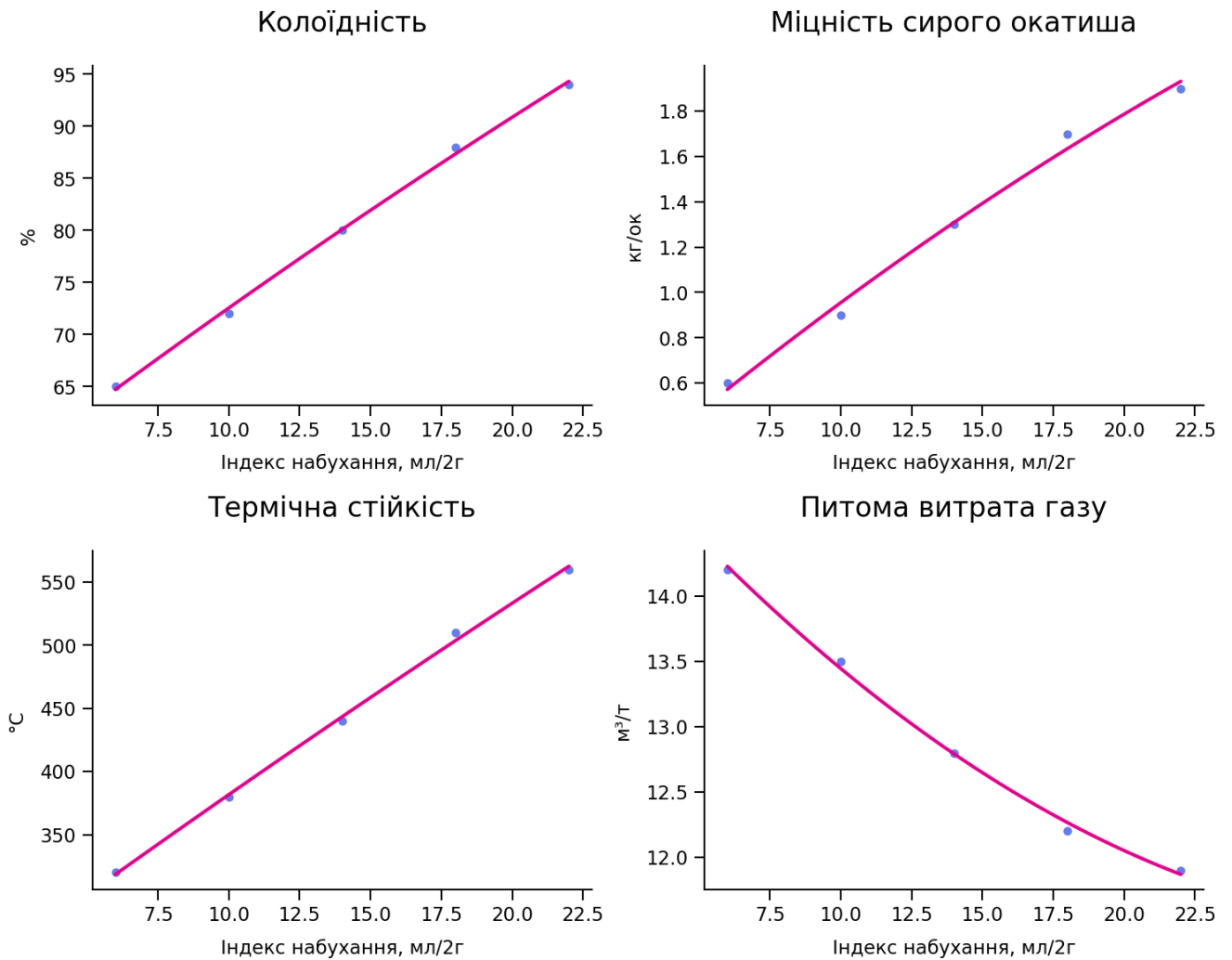


Рисунок 2.2 – Вплив характеристик бентоніту на показники процесу

Таблиця 2.4 – Вплив хімічного складу на показники процесу

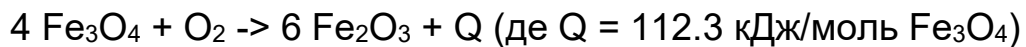
Параметр складу	Оптимальне значення	Вплив на процес грудкування	Вплив на показники випалу та міцність
Вміст Fe_заг	> 66.5 %	Нейтральний	Підвищує металургійну цінність, знижує вихід шлаку в ДП
Вміст SiO ₂	4.5–5.2 %	Покращує змочуваність	Формує силікатну зв'язку,

			забезпечує міцність
Основність CaO/SiO ₂	0.3–0.5 (для доменних)	Підвищує пластичність сирової шихти	Знижує температуру феритоутворення, покращує відновлюваність
Вміст S (сірки)	< 0.05 %	Відсутній	Вимагає подовження зони випалу для десульфуризації
Вміст Na ₂ O + K ₂ O	< 0.15 %	Нейтральний	Викликає руйнування окатишів при відновленні в ДП

Регулювання хімічного складу здійснюється шляхом точного дозування вапняку. Введення CaO сприяє утворенню низькоплавких феритів кальцію типу CaO·Fe₂O₃, які інтенсифікують процес спікання при нижчих температурах. Проте перевищення оптимальної основності понад 0.6 без відповідної корекції температурного режиму може призвести до надмірного оплавлення поверхні окатишів, злипання їх у блоки («козли») та суттєвого зниження газопроникності шару на випалювальній машині.

Вміст загального заліза (Fe_{заг}) у вихідному концентраті є базовим індикатором металургійної цінності окатишів. Для ПРАТ «ЦГЗК» підвищення вмісту Fe_{заг} в концентраті з 65,0 % до 68,5 % досягається шляхом впровадження технологій глибокого збагачення, включаючи магнітно-флотаційну сепарацію та тонке грохочення. Зміна концентрації заліза безпосередньо змінює співвідношення між рудною масою та пустою породою, що суттєво трансформує металургійні властивості.

Підвищення вмісту заліза в концентраті на 1 % призводить до зменшення об'єму шлакових фаз у доменній печі та забезпечує зниження питомої витрати коксу при плавленні на 1,2–1,5 %, а також збільшення продуктивності доменної печі на 2,0–2,5 %. У самому ж процесі виробництва окатишів на фабриці огрудкування вміст заліза визначає термохімічний баланс випалу [10]. Оскільки магнетитовий концентрат при випалюванні окиснюється до гематиту за екзотермічною реакцією:



Високий вміст магнетитового заліза забезпечує генерацію великої кількості внутрішнього тепла безпосередньо в шарі окатишів. Це тепло еквівалентне спалюванню значних об'ємів палива. Таким чином, чим вищий вміст магнетиту в концентраті, тим менше зовнішнього палива (природного газу) необхідно підводити в горн випалювальної машини. Нижче див. табл. 2.5 наведено кількісну модель впливу вмісту Fe_{заг} в концентраті на витрату газу та міцність обпалених окатишів.

Таблиця 2.5 - Вплив вмісту заліза в магнетитовому концентраті на енергетичні параметри випалу

Вміст Fe _{заг} в концентраті, %	Вміст Fe _{заг} в окатишах, %	Міцність обпалених окатишів, кг/ок	Питома витрата газу, м3/т окатишів	Собівартість виробництва, % від базової
64.5	63.2	210	16.5	108.0
65.5	64.3	235	14.8	104.5
66.5 (База)	65.2	260	13.2	100.0
67.5	66.3	285	11.5	96.2
68.5	67.4	310	9.8	92.5

Згідно з цими даними як видно на рис. 2.3 зростання вмісту заліза з 64,5 % до 68,5 % забезпечує зниження питомих витрат природного газу на випалювальній машині з 16,5 до 9,8 м³/т готової продукції. Це обумовлено двома факторами: по-перше, збільшенням питомої теплоти екзотермічного окиснення магнетиту, по-друге, зменшенням витрат тепла на плавлення та декарбонізацію пустої породи, об'єм якої в концентраті високої якості є мінімальним.

Пуста порода залізорудного концентрату є основою для формування силікатної зв'язки при температурах 1180–1320 °С. Основними компонентами пустої породи є SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO. Співвідношення між цими оксидами визначає температуру появи перших порцій рідкої фази, в'язкість залізо-силікатного розплаву та його здатність змочувати тверді зерна гематиту. Ключовим параметром контролю є індекс кремнієвості та кремнієвий модуль, а також модуль основності.

Високий вміст діоксиду кремнію (SiO₂ > 5,5 %) призводить до утворення надлишкової кількості рідкої фази. При цьому формується грубокристалічна склувата структура, яка робить обпалені окатиші крихкими під час динамічних навантажень та транспортування (збільшується утворення дрібниці та пилу при вивантаженні). З іншого боку, дефіцит SiO₂ (< 3,5 %) приводить до нестачі рідкої фази, спікання відбувається виключно за рахунок твердофазної дифузії, що вимагає підвищення температури випалу до 1350 °С і суттєво збільшує витрати газу.

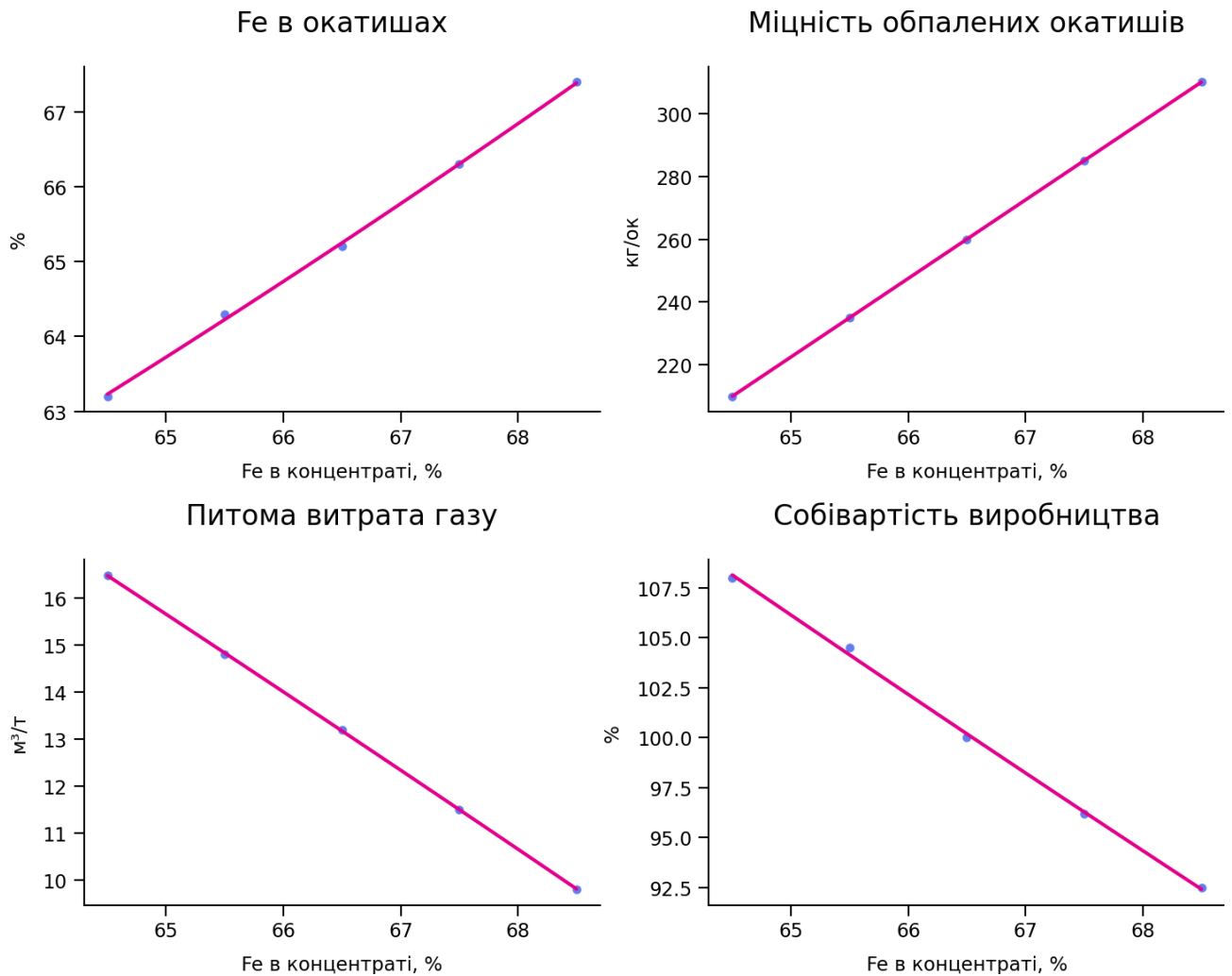


Рисунок 2.3 – Вплив кількості заліза в концентраті на показники процесу

Особливу роль відіграє оксид алюмінію (Al_2O_3). Він підвищує в'язкість силікатного розплаву, що перешкоджає рівномірному розподілу зв'язки по об'єму окатиша. Співвідношення Al_2O_3/SiO_2 в умовах ЦГЗК жорстко контролюється на рівні не більше 0,15. Оксид магнію (MgO), що вводиться з доломітизованим вапняком, стабілізує структуру магнетиту та запобігає аномальному розбуханню окатишів при їх відновленні в доменній печі що відображається у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6. Залежність металургійних властивостей окатишів від хімічного складу пустої породи

Співвідношення CaO/SiO ₂	Вміст SiO ₂ в кусковій формі, %	Температура початку розм'якшення, °C	Міцність на стиснення обпалених, кг/ок	Вихід фракції +16 мм (козли), %
0.1	5.5	1120	240	0.2
0.3	5.0	1150	275	0.5
0.5	4.6	1190	305	1.1
0.7	4.2	1220	290	2.8
0.9	3.8	1240	250	6.5

Як ілюструють дані таблиці 2.6 (див. рис. 2.4), оптимальні показники міцності на стиснення (понад 300 кг/окатиш) досягаються при основності CaO/SiO₂ в межах 0,5. При подальшому збільшенні основності понад 0,7 спостерігається інтенсивне утворення низькоплавких силікатів кальцію, що викликає оплавлення зовнішньої поверхні окатишів і приводить до їх зварювання між собою в процесі випалу з утворенням великих конгломератів (фракція понад 16 мм або «козли»), що блокують газові потоки у випалювальній машині.

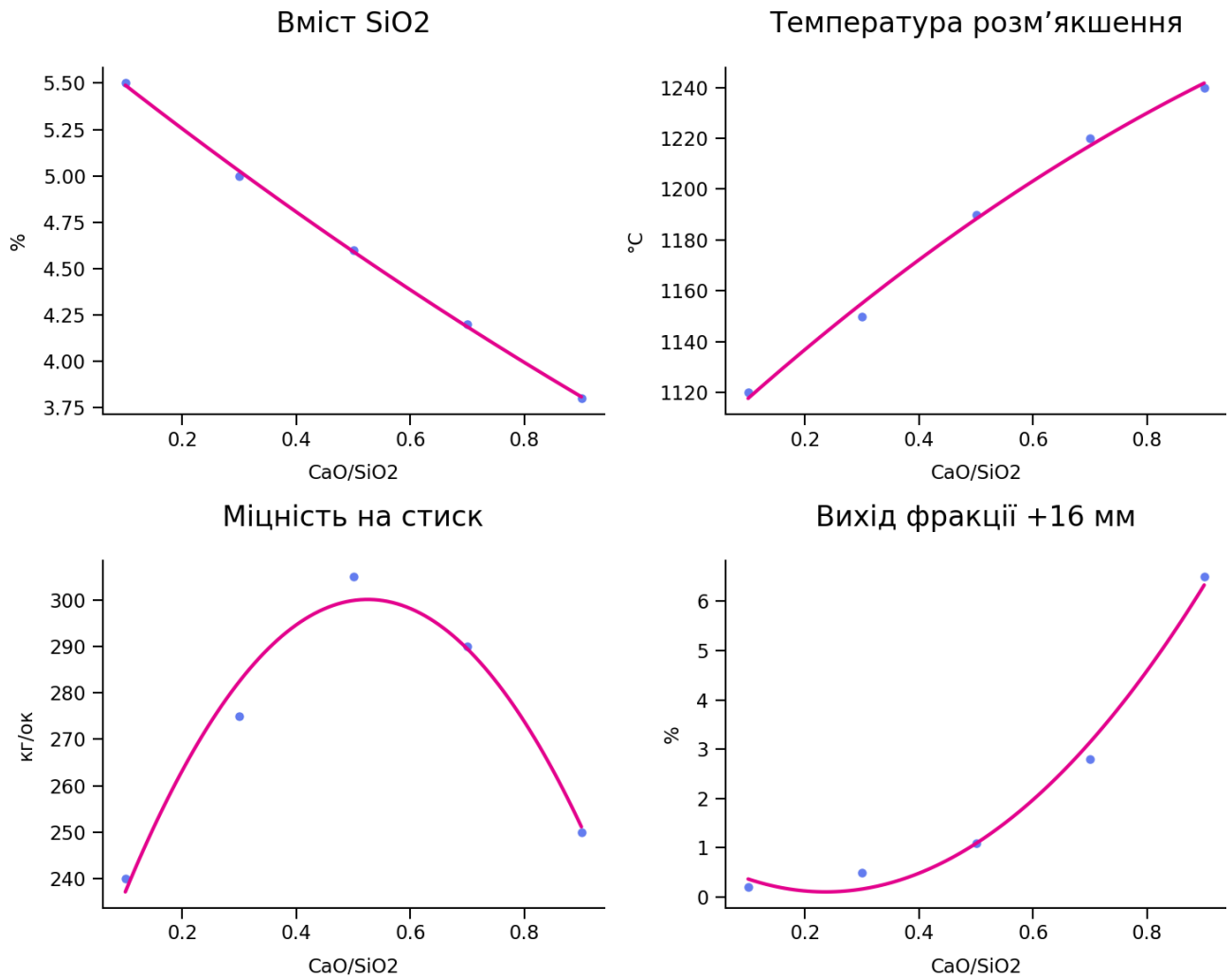


Рисунок 2.4 – Вплив основності на показники процесу

2.3 Аналіз можливості використання твердого палива у шихті для виробництва окатишів та вплив характеристик палива на процес

Традиційна технологія виробництва окатишів передбачає підведення тепла для термохімічних перетворень виключно за рахунок спалювання природного газу або рідкого палива в пальниках випалювальної машини. Проте в умовах постійного зростання вартості енергоносіїв актуальним є впровадження енергозберігаючих технологій, зокрема введення до складу шихти твердого палива (коксового дрібняка, антрацитового штибу або бурого вугілля). На ПРАТ «ЦГЗК» використання

твердого палива є одним із ключових напрямків зниження собівартості виробництва кондиційних окатишів [8, 9].

Введення твердого палива (зазвичай коксового дрібняку фракції 0-3 мм, змеленого до питомої поверхні 1200–1500 см²/г) безпосередньо у шихту перед угрудкуванням кардинально змінює теплову роботу шару окатишів на випалювальній машині. Внутрішнє джерело тепла, що виділяється при вигоранні вуглецю всередині окатиша, забезпечує високу швидкість нагрівання та рівномірне прогрівання по всій висоті корисного шару, що особливо важливо для нижніх горизонтів [12].

Основними характеристиками твердого палива, які визначають ефективність його застосування, є: вміст фіксованого вуглецю ($C_{\text{тв}}$), зольність (A_d), вміст летких речовин (V_{daf}), вміст сірки (S_{t^d}) та гранулометричний склад паливної добавки. У таблиці 2.7 представлено вимоги до характеристик твердого палива для умов фабрики огрудкування.

Аналіз механізму випалу окатишів із твердим паливом показує, що присутність вуглецю всередині окатиша створює локально відновне мікросередовище. Це стимулює швидке відновлення гематиту та магнетиту до вюститу (FeO). Закис заліза FeO активно взаємодіє з SiO_2 з утворенням фаяліту ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$), температура плавлення якого становить всього 1205 °С. Це дозволяє інтенсифікувати утворення рідких фаз та завершити процес рідкофазного спікання при нижчих температурах горна випалювальної машини (на 40–60 °С нижче порівняно з безпаливною технологією), що веде до економії природного газу до 3–5 м³/т готової продукції [13].

Таблиця 2.7. – Вплив характеристик твердого палива на показники процесу виробництва окатишів

Показник якості палива	Оптимальний діапазон	Технологічний вплив на процес виробництва окатишів
Вміст фіксованого вуглецю, $C_{\text{тв}}$	82–88 %	Визначає питому теплоту згоряння шихти, знижує витрату газу
Зольність палива, A_d	< 12.0 %	Зола забруднює окатиші кремнійкислотою, знижуючи вміст $Fe_{\text{заг}}$
Вихід летких речовин, V_{daf}	1.5–4.0 %	Низький вихід летких запобігає передчасному розтрішуванню гранул
Вміст загальної сірки, $S_{\text{т}^d}$	< 0.6 %	Мінімізує викиди діоксиду сірки в атмосферу та вміст S в продукції
Крупність палива (клас -0.074 мм)	75–82 %	Забезпечує рівномірний розподіл вуглецю по об'єму окатиша

Однак введення твердого палива має жорсткі обмеження. Оптимальна кількість коксового дрібняку в шихті становить 0.6–1.2 % від

маси концентрату. Перевищення цієї межі (більше 1.5 %) призводить до надмірного розвитку відновних процесів, утворення великої кількості макропор через вигоряння вуглецю та утворення крихкої фаялітової зв'язки. Як наслідок, суттєво знижується міцність окатишів на стиснення та погіршується їх відновлюваність у доменній печі через закриття внутрішніх пор шлаковим розплавом [13, 14].

Таким чином, комплексний аналіз характеристик шихтових матеріалів дозволяє оптимізувати техніко-економічні показники фабрики угрудкування ПРАТ «ЦГЗК». Шляхом суворого контролю вологості на рівні 8.5 %, підтримання питомої поверхні концентрату понад 1700 см²/г та раціонального введення коксового дрібняку в кількості 0.8 % забезпечується досягнення питомої продуктивності випалювальних машин типу ОК-324 на рівні 0.95–1.05 т/(м²·год) при зниженні питомих витрат природного газу до значень менше 12.5 м³/т готових окатишів.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ І ЕКОЛОГІЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

3.1 Заходи безпеки при експлуатації обладнання та цивільний захист персоналу в умовах воєнного стану

Усі проектні, конструктивні та компонувальні рішення щодо розміщення обладнання фабрики огрудкування розроблені відповідно до Закону України «Про охорону праці» та галузевих правил безпеки (зокрема Правил ОП під час дроблення, сортування та огрудкування, Правил безпеки у газовому господарстві чорної металургії, Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів тощо).

Заходи безпеки під час експлуатації технологічного обладнання

Огородження рухомих частин: усі відкриті обертові та рухомі частини машин (вали, приводи, елементи конвеєрів, чаші огрудкувачів) оснащуються захисними кожухами й сітчастими огороженнями, які обов'язково заблоковані з пусковими пристроями. Зняття або відкриття огорожі призводить до миттєвого вимкнення приводу.

Передпускова сигналізація: запуск конвеєрних ланцюгів та агрегатів, розташованих поза зоною прямої видимості, здійснюється за двоступеневою звуковою схемою. Спочатку подається перший сигнал тривалістю 5... 10 с, після чого витримується технологічна пауза не менше 30 с для виходу людей з небезпечної зони, і лише після другого сигналу тривалістю 30 с вмикається привід.

Проведення ремонтів та зачисток: будь-які ремонтні роботи, огляд зумпфів, очищення чаш чи барабанів виконуються виключно за нарядом-допуском із застосуванням системи БМП (Блокування-Маркування-

Перевірка) та біргової системи допуску. Це гарантує видимий розрив електричного кола живлення та унеможливорює випадковий чи несанкціонований пуск агрегату під час перебування всередині людей.

Організація робочих місць: монтажні отвори, приямки та канали закриваються настилами врівень з підлогою або огорожуються перилами заввишки не менше 1,0 м з бортовою обшивкою. Забороняється ручне прибирання просипів чи ручне змащування механізмів під час їхньої роботи. Персонал у повному обсязі забезпечується сертифікованими спецодягом, спецвзуттям та ЗІЗ (органів дихання, зору та слуху).

Контроль технології виробництва залізорудних окатків з концентрату залізорудної фабрики (ЗФ) ПРАТ «ЦГЗК», а також моніторинг поточного стану технологічного устаткування покладається на інженерно-технічних працівників (ІТП) фабрики, фахівців відділу технічного контролю (ВТК) та рудовипробувальної лабораторії (РВЛ). Кінцева оцінка та контроль якості готового товарного окатка перед відвантаженням здійснюється спеціалізованою ділянкою зовнішнього відвантаження ВТК.

У межах оперативного керування процесом підготовки шихти, огрудкування та випалу обов'язковому контролю підлягають такі параметри:

- Масова частка вологи в компонентах шихти та безпосередньо в сирих окатках.
- Гранулометричний склад сирих окатків, суміші мелених добавок, а також готових обпалених окатків.
- Хімічний склад вихідної шихти, суміші мелених добавок та обпалених окатків.
- Показники механічної міцності: міцність на скидання для сирих окатків та міцність на стиск для обпалених окатків.

- Дотримання встановлених теплотехнічних та температурних режимів роботи випалювальної машини ОК-324.

Відбір, транспортування та підготовка аналітичних проб виконуються суворо відповідно до вимог ДСТУ ISO 3082:2012 «Руди залізни. Методи відбирання та готування проб».

Інструменти для ручного відбору: застосовуються спеціалізовані совки, листи та відерця. Для ручного відбору проб окатків безпосередньо з залізничних вагонів використовується механічний ручний пробовідбірник — щуп, виготовлений за ДСТУ 3195:2015.

Обладнання для підготовки та подрібнення проб: щоківні дробарки, дискові стирачі типу ІДА-175, а також набір сит із розміром комірки 0,056 мм.

Нормативна база хімічного аналізу: визначення масової частки вологи та загального хімічного складу здійснюється за ДСТУ ISO 3082:2012 та ДСТУ 4575:2006 (із врахуванням ДСТУ 3195:2015, ДСТУ 3196:2015, ДСТУ 3201-95). Масова частка загального заліза $Fe_{заг.}$ визначається згідно з ДСТУ 8811.1:2018.

Опробування технологічних потоків здійснюється контролерами ВТК безперервно протягом зміни за затвердженим графіком:

1. Шихта: кожні 2 години з двох точок (на перепаді потоку з конвеєра ОК-3 на ОК-4 дільниці №8 та безпосередньо з барабанного змішувача №2 дільниці №7).
2. Подрібнені добавки (вапняк + бентоніт): 1 раз на 2 години з кожного працюючого млина після стрічкових дозаторів.
3. Сирі окатиші: кожні 4 години вручну за допомогою спеціальної лопати зі збірного конвеєра ОБ-7.
4. Обпалені окатиші: 1 раз на 2 години спеціальним совком методом перетину потоку матеріалу з голови конвеєрів ПУ 6-1 та ПУ 6-2.

Усі отримані дані реєструються в журналах фізико-механічних властивостей та хімічного аналізу із зазначенням номера проби, часу відбору, зміни, конвеєра та прізвища контролера. Інформація оперативно надходить оператору пульта керування (ПК) для корегування процесу.

Шламове господарство фабрики забезпечує збирання, транспортування та освітлення стоків і гідросумішей [15]. Персонал у своїй діяльності керується інструкціями з експлуатації обладнання, посадовими інструкціями та планами ліквідації аварій (ПЛА) в частині «затоплення».

Насосна ділянка випалу обладнана зумпфом місткістю 150 м^3 та чотирма шламовими насосами (№105 типу ГрТ 1600/50, №106–108 типу 8Гр8) продуктивністю $400 \text{ м}^3/\text{год}$ кожен. Насоси працюють за схемою: один у роботі, три — в резерві. Транспортування пульпи здійснюється по чотирьох нитках шламопроводів (діаметрами 426 мм та 325 мм), прокладених по естакадах та опорах до дамб польових відстійників. Трубопроводи обладнані зворотними клапанами і спускниками.

Машиніст насосних установок зобов'язаний безперервно контролювати продуктивність, тиск, роботу автоматики, очищати зумпфи від сторонніх предметів та запобігати зашламуванню всмоктувальних патрубків.

Польові шламівідстійники є спорудами з трьох ставків, огорожених ґрунтовими греблями.

- Місткість ставків: ставок №1 — 56000 м^3 , №2 — 48000 м^3 , №3 — 32000 м^3 .
- Геометричні параметри дамб: ширина по гребеню — не менше 5 м, у проїзній частині — не менше 7,5 м, по підшві — не менше 22,0 м. Мінімальний безпечний запас (перевищення гребеня над дзеркалом води) становить 1 м.

Освітлення води відбувається шляхом відстоювання. Випуск води здійснюється через металеві водоскидні колодязі (Ø1200 мм, ширина отвору 500 мм), рівень зливу в яких регулюється за допомогою металевих запірних пластин (шандорів) розміром 500x200x200 мм. Напір води над порогом водозливу підтримується на рівні не більше 100 мм, а загальна глибина біля колодязя — не менше 1 м. Освітлена вода через колектори (Ø1200 мм) скидається в систему гідротранспорту хвостів збагачувальної фабрики.

При досягненні граничного заповнення ставка пульпа перенаправляється на резервний ставок. Заповнений відстійник осушується шляхом поступового зняття шандорів і ставиться на дренавання. Після досягнення залишкової вологості шламів менше 15%, здійснюється розкриття дамби, а шлам екскаватором та автосамоскидами вивозиться на підлоговий склад для подальшого рециклінгу. Втрати корисного компонента зі зливами жорстко контролюються РВЛ (відбір проб 2 рази на тиждень) і не повинні перевищувати 0,1%.

Цивільний захист персоналу в умовах воєнного стану

З метою мінімізації ризиків та захисту життя працівників під час виконання службових обов'язків в умовах воєнного стану на підприємстві впроваджено комплекс заходів цивільного захисту:

- Розроблено та затверджено чіткий План евакуації персоналу з території виробничих майданчиків до захисних споруд (сховищ, бомбосховищ).
- Пересування персоналу фабрики огрудкування до бомбосховища під час кризових ситуацій регламентується спеціальною схемою (Додаток схема №5).
- У разі оголошення сигналу «Повітряна тривога» або виникнення безпосередньої загрози артилерійського обстрілу чи

бомбардування, персонал зобов'язаний негайно зупинити (або перевести в безпечний режим) обладнання та прямувати до визначених укриттів, перебуваючи там до офіційного скасування сигналу небезпеки.

3.2 Виробнича санітарія та промислова екологія

Металургійне виробництво на сьогодні є одним з найбільш істотних забруднювачів навколишнього середовища. Особливо гостро це питання стоїть в Дніпропетровській області, яка представлена великими металургійними центрами – Криворізьким залізрудним басейном і рядом підприємств в містах Кривий ріг, Дніпро і Кам'янське [15].

Викиди в атмосферу здійснюються на всіх етапах класичної схеми виробництва готової сталевих продукції: підготовка залізрудної сировини і палива – виробництво чавуну – виплавка сталі – отримання готового металопрокату.

Більш того, всі вищеописані етапи тісно взаємопов'язані і певні технологічні операції, які можуть підвищити собівартість продукції, наприклад, при виробництві підготовленої залізрудної сировини, дозволять досягти істотного зниження собівартості чавуну при його виплавці в доменних печах.

Забруднення навколишнього середовища металургійними виробництвами відбувається через стічні води, в які потрапляють різні хімічні сполуки, що утворюються в процесі виплавки металів. Металургійне виробництво споживає воду у значних кількостях, тому його підприємства завжди споруджують в безпосередній близькості від річок і озер або створюють спеціальні гідротехнічні споруди, в яких вона накопичується.

Виробничі процеси фабрики огрудкування (дроблення добавок, пересипання шихти, сушіння й випал) супроводжуються виділенням

значної кількості пилу, надлишкового тепла, газів, а також підвищеними рівнями шуму та вібрації від роботи млинів, димососів та конвеєрів.

Для забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних умов (згідно з ДСН 3.3.6.042-99, ДБН В.2.5-67:2013) та захисту навколишнього природного середовища реалізовано такі інженерні рішення [16, 17].

Захист атмосферного повітря та аспірація

Усі місця інтенсивного пилоутворення (вузли перевантаження сипучих матеріалів, завантажувальні бункери) оснащені герметичними укриттями з пилоприймальними патрубками місцевих відсмоктувачів. Вони підключені до розвинених аспіраційних систем, що включають мережу повітропроводів, високоефективні пиловловлювачі (циклони, електрофільтри) та потужне тягодуттєве обладнання. Експлуатація газовідчисних установок (ГОУ) здійснюється суворо відповідно до Правил технічної експлуатації ГОУ та ДСТУ Б А.3.2-12:2009 [18].

Системи гідропилоподавлення та рециклінгу

Для зниження пиління безпосередньо в технологічному потоці застосовуються системи гідрознепилення, які здійснюють дозоване зволоження компонентів шихти. Також на фабриці впроваджено практику регулярного мокрого прибирання осілого пилу з будівельних конструкцій та підлоги, а також примусове очищення холостої вітки стрічкових конвеєрів.

Усі утворені промислові стоки, включаючи змиви підлоги, зливи від систем газовідчистки та мокрого аспіраційного обладнання, збираються дренажними каналами та направляються на польові шламівідстійники фабрики, що забезпечує замкнений цикл використання технологічної води.

Боротьба з шумом, вібрацією та тепловиділенням

- Зниження вібраційного навантаження: агрегати, що генерують значну віброакустичну енергію (кульові млини, димососи, насоси),

встановлюються на ізольовані масивні фундаменти з використанням антивібраційних матеріалів та демпфувальних вставок.

- Акустичний захист персоналу: робочі місця операторів та диспетчерів розміщуються в спеціальних закритих звукоізованих приміщеннях (кабінах спостереження), оздоблених звукопоглинальними матеріалами.

- Нормалізація мікроклімату: обладнання, що є джерелом надлишкового тепловиділення (елементи випалювальної машини, газоходи), підлягає суцільній термоізоляції. Постійний температурний режим у цеху підтримується сумісною роботою повітряного (конвективного) опалення взимку та загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції з дефлекторами в теплий період року.

4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

Економічна ефективність функціонування цеху огрудкування ПрАТ «ЦГЗК» безпосередньо залежить від оптимізації витрат матеріальних та енергетичних ресурсів, оскільки структура собівартості виробництва залізородних окатишів має чітко виражений матеріаломісткий та енергомісткий характер.

Узагальнена калькуляція собівартості 1 тони готових окатишів на підприємстві складається з наступних ключових елементів:

- Сировина та матеріали (60–70% від загальної собівартості). Це найбільша стаття витрат, яка включає витрати на видобуток і збагачення залізородного концентрату, закупівлю та доставку бентонітової глини, а також придбання і складну логістику флюсового вапняку з Івано-Франківської області.
- Енергоносії (20–25%). Включає витрати на природний газ, що спалюється у горнах випалювальних машин для забезпечення температурних зон сушіння, підігріву, випалу та рекуперації (температури до 1250–1320 °С), а також електроенергію для приводу потужних димососів (ексгаустерів), млинів тонкого помелу, змішувачів та чашових огрудкувачів.
- Витрати на оплату праці та соціальні заходи. Фонд оплати праці технологічного та ремонтного персоналу цеху огрудкування.
- Амортизація основних засобів. Фіксує знос високовартісного технологічного обладнання (колінчастих випалювальних машин, випалювальних візків-палет, дробильних агрегатів).

Аналітична оцінка питомих витрат матеріалів дозволяє виділити наступні критерії оптимізації економічних показників:

- Коефіцієнт витрати концентрату. Показує масу концентрату, необхідну для отримання 1 тонни окатишів. На ПрАТ «ЦГЗК» цей показник утримується на рівні 1,02–1,05 т/т. Будь-яке перевищення норми через просипи, пиловинос або шлакоутворення веде до перевитрати дорогоцінної залізорудної сировини.

- Питома витрата бентоніту. Оптимальний технологічний мінімум становить 0,5–1,0% від маси шихти. Бентоніт є привізним і відносно дорогим матеріалом. Його надмірне введення (понад 1%) не тільки спричиняє прямі фінансові збитки на закупівлю, але й штучно «засмічує» шихту кремнеземом та глиноземом, що автоматично знижує вміст заліза в готовому окатиші та вимагає збільшення витрати вапняку для флюсування.

- Питома витрата природного газу. Прямо залежить від повноти використання внутрішнього тепла екзотермічних реакцій окиснення. Стабільна шихта з високим вмістом магнетиту забезпечує максимальний вихід внутрішнього тепла, мінімізуючи споживання дорогого природного газу з мережі.

Великий вплив на питому собівартість має рівень циркуляційного навантаження (повернення). При зростанні частки некондиційного повернення понад норму (наприклад, до 30%), потужність цеху з випуску готової продукції падає на відповідні 30%. При цьому витрати електроенергії на повторне транспортування, дроблення та сушіння одного й того самого об'єму матеріалу по замкнутому колу суттєво зростають, підвищуючи частку умовно-постійних витрат у собівартості тони окатишів.

На світовому ринку залізорудної сировини діє жорстка премія за якість: окатиші з вмістом заліза понад 67% та низьким вмістом кремнію та шкідливих домішок (що відповідає марці А-1 ПрАТ «ЦГЗК») оцінюються

значно дорожче за базові окатиші з вмістом заліза 62–65%. Економічний ефект посилюється за рахунок транспортної логістики: чим вища концентрація корисного компонента в одиниці маси, тим нижча питома вартість залізничного чи морського фрахту в розрахунку на «одиницю чистого заліза» при доставці кінцевому споживачу.

Таким чином, забезпечення стабільності фізико-хімічних та гранулометричних характеристик усіх компонентів шихти, суворе дотримання технологічного регламенту за вологістю та оптимізація витрат бентоніту і вапняку є головними важелями для підвищення конкурентоспроможності продукції ПрАТ «ЦГЗК», зниження її собівартості та підвищення рентабельності виробництва в складних сучасних макроекономічних умовах.

Окрім цього можна для досягнення кращих економічних показників можна запропонувати інноваційні технології. Що і було зроблено в основній частині. Ефективність запропонованого рішення наводиться нижче.

У сучасних умовах функціонування гірничо-металургійного комплексу України, що супроводжується високою спроможністю ринків енергоносіїв, дефіцитом природного газу та зростанням вимог до екологічної безпеки виробництва, проблема зниження собівартості та підвищення енергоефективності процесів огрудкування залізорудної сировини набуває критично важливого значення. На ПрАТ «ЦГЗК» витрати на паливно-енергетичні ресурси становлять вагомую частку в структурі витрат на виробництво залізорудних окатишів. Традиційна технологія випалу окатишів на конвеєрних машинах типу ОК-324 передбачає спалювання значних обсягів природного газу для забезпечення необхідного температурно-часового режиму в зонах сушки, підігріву, випалу та рекуперації.

З метою кардинального зниження споживання дефіцитного природного газу та інтенсифікації термохімічних процесів формування мікроструктури окатишів, у даній кваліфікаційній роботі запропоновано та науково обґрунтовано технологічне рішення щодо введення до складу вихідної металургійної шихти дисперсних вуглецевмісних матеріалів (коксового дрібняку, антрациту або подрібненого пісного вугілля з оптимізованим вмістом летких речовин). Впровадження даного технічного рішення базується на результатах комплексних досліджень, викладених у працях різних авторів [7-14], які довели високу технологічну ефективність використання внутрішнього палива в окатишах за умови оптимізації його гранулометричного складу (фракція 40–71 мкм) та обмеження вмісту летких речовин до 40%.

Вихідні дані та передумови для розрахунку економічної ефективності

Для виконання комплексних розрахунків проектних показників і порівняння їх із базовим варіантом виробництва були прийняті фактичні техніко-економічні показники роботи фабрики огрудкування ПРАТ «ЦГЗК». Основне технологічне обладнання цеху представлено випалювальними машинами конвеєрного типу ОК-324 із корисною площею спікання 324 м². Річний обсяг виробництва товарних обпалених окатишів у базовому періоді склав 2 873 700 тонн.

Проектне технологічне рішення передбачає введення до складу шихти коксового дрібняку або вугілля в кількості 1,0 % від маси сухого концентрату. За рахунок виділення внутрішнього тепла при горінні фіксованого вуглецю всередині самого окатиша забезпечується зниження питомої витрати природного газу на випал на 5,3 м³ на кожну тону готової продукції. При цьому враховується, що дрібне паливо попередньо подрібнюється у кулястих млинах сушильно-мельного відділення до

питомої поверхні, що забезпечує переважний вміст фракції 40–71 мкм, як рекомендовано дослідженнями [7-14].

Аналіз матеріальних та енергетичних потоків при введенні вуглецевих добавок

Зміна структури металургійної шихти при введенні твердого палива вимагає перерахунку матеріального балансу [19]. За рахунок інтенсифікації процесу спікання та збільшення виходу придатної фракції 10-14 мм (згідно з лабораторними даними до 94%) загальна продуктивність обладнання залишається стабільною. Основні вихідні економічні константи та ціни на сировину наведені у таблиці 4.1.

Розрахунок економії паливно-енергетичних ресурси

Головним джерелом зниження собівартості окатишів є заміщення теплової енергії від спалювання природного газу теплом внутрішнього горіння вуглецю. Розрахунок річної економії витрат на природний газ виконується за формулою (4.1):

$$\Delta E_{\text{газ}} = V * (G_{\text{баз}} - G_{\text{про}}) * P_{\text{газ}}, \quad (4.1)$$

де V – річний обсяг виробництва окатишів, т/рік (2 873 700 т); $G_{\text{баз}}$ – питома витрата газу в базовому варіанті, м³/т (15,5 м³/т); $G_{\text{про}}$ – питома витрата газу в проектному варіанті, м³/т (10,2 м³/т); $P_{\text{газ}}$ – ціна природного газу, грн/м³ (18,502 грн/м³).

Таблиця 4.1 – Вихідні економічні дані

Найменування показника	Один. виміру	Базовий варіант	Проектний варіант
Річний обсяг виробництва окатишів	т/рік	2 873 700	2 873 700
Питома витрата концентрату	т/т окатишів	0,945	0,935
Питома витрата бентоніту	т/т окатишів	0,012	0,012
Питома витрата вапняку	т/т окатишів	0,035	0,035
Питома витрата вуглецевої добавки	т/т окатишів	0,000	0,0105
Питома витрата природного газу	м ³ /т окатишів	15,5	10,2
Питома витрата електроенергії	кВт·год/т	42,5	43,1
Ціна природного газу (без ПДВ)	грн/м ³	18,502	18,502
Ціна вуглецевої добавки	грн/т	—	7 500,00
Ціна залізорудного концентрату	грн/т	2 450,00	2 450,00
Вартість електроенергії для підприємства	грн/кВт·год	6,50	6,50

Підставляючи значення у формулу (4.1), отримаємо:

$$\Delta E_{\text{газ}} = 2\,873\,700 * (15,5 - 10,2) * 18,502 = 281\,800\,681,14 \text{ грн/рік.}$$

Водночас, введення твердого палива вимагає додаткових витрат на його придбання та підготовку (подрібнення). Річні витрати на закупівлю вуглецевого матеріалу визначаються за формулою (4.2):

$$V_{\text{пал}} = V * g_{\text{пал}} * P_{\text{пал}}, \quad (4.2)$$

де $g_{\text{пал}}$ – питома витрата палива на тону окатишів (0,0105 т/т);
 $P_{\text{пал}}$ – ціна палива, грн/т (7 500 грн/т).

$$V_{\text{пал}} = 2\,873\,700 * 0,0105 * 7\,500 = 226\,303\,875,00 \text{ грн/рік.}$$

Обґрунтування капітальних інвестицій на модернізацію шихтового комплексу

Для впровадження технології використання внутрішнього твердого палива в окатишах на фабриці огрудкування ПРАТ «ЦГЗК» необхідно створити спеціалізовану дільницю прийому, подрібнення, дозування та транспортування вуглецевих добавок. Склад капітальних витрат наведено у таблиці 4.2.

Калькуляція собівартості виробництва залізородних окатишів

На основі матеріальних балансів та поточних цін проведено повний порівняльний аналіз [20] собівартості виробництва однієї тони обпалених окатишів ПРАТ «ЦГЗК». Результати зведені в таблицю 4.3.

Таблиця 4.2. – Капітальні витрати на модернізацію виробництва

Елемент витрат / Обладнання	Кількість, од.	Вартість, тис. грн	Всього, тис. грн
Бункер прийому та зберігання твердого палива (місткість 500 тонн)	2	8 500	17 000
Млин кулястий вентильований для тонкого розмелу палива	1	24 500	24 500
Система високоточного автоматичного вагового дозування Schenck Process	4	3 200	12 800
Комплекс стрічкових конвеєрів та аспіраційних установок дільниці	1 комплекс	11 200	11 200
Будівельно-монтажні та пусконаладжувальні роботи	—	—	19 500
РАЗОМ капітальні інвестиції (К)	—	—	85 000

Таблиця 4.3. – Калькуляція собівартості виробництва окатишів

Стаття витрат	Базовий варіант, грн/т	Проектний варіант, грн/т	Відхилення (+/-), грн/т
Залізорудний концентрат	2 315,25	2 290,75	-24,50
Бентонітовий порошок	42,60	42,60	0,00
Вапняк флюсуючий	38,50	38,50	0,00

Вуглецева добавка (тверде паливо)	0,00	78,75	+78,75
Природний газ	286,78	188,72	-98,06
Електроенергія на технологічні потреби	276,25	277,27	+1,02
Амортизація нового обладнання дільниці	0,00	2,96	+2,96
Утримання та ремонт основних засобів	112,00	113,50	+1,50
Заробітна плата з відрахуваннями	94,50	94,50	0,00
Загальновиробничі витрати цеху	145,00	145,00	0,00
ЦЕХОВА СОБІВАРТІСТЬ ОДНІЄЇ ТОННИ	3 310,88	3 297,05	-13,83

Розрахунок річного економічного ефекту та терміну окупності

Зниження собівартості виробництва однієї тони окатишів становить $E_t = 13,83$ грн/т. Річний економічний ефект ($E_{річ}$) від реалізації запропонованого технічного рішення визначається за формулою (4.3):

$$E_{річ} = V * E_t, \quad (4.3)$$

$$E_{річ} = 2\,873\,700 * 13,83 = 39\,743\,271,00 \text{ грн/рік.}$$

Термін окупності капітальних інвестицій ($T_{ок}$) розраховується як відношення загального обсягу капітальних вкладень до річного економічного ефекту [21] згідно з формулою (4.4):

$$T_{ок} = K / E_{річ}, \quad (4.4)$$

$$T_{ок} = 85\,000\,000 / 39\,743\,271 = 2,14 \text{ роки.}$$

Таким чином, проект модернізації шихтового комплексу фабрики огрудкування ПРАТ «ЦГЗК» з метою введення твердого палива характеризується високим економічним ефектом та коротким терміном окупності (близько 2 років і 2 місяців), що робить його інвестиційно привабливим та доцільним для практичної реалізації в поточному економічному середовищі металургії України.

Для оцінки стабільності проекту в умовах невизначеності ринкового середовища було проведено аналіз чутливості терміну окупності до зміни двох ключових факторів: вартості природного газу та вартості вуглецевої добавки. Розрахунки показують, що навіть при зростанні ціни твердого палива на 20% термін окупності проекту залишається в межах 2,6 років, що не перевищує гранично допустимі нормативи для підприємств компанії Метінвест. Більш того, подальше зростання цін на природний газ лише підвищує питому ефективність проекту та скорочує термін окупності.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі на основі системного підходу, узагальнення теоретичних положень і аналізу практичних даних фабрики огрудкування ПРАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПРАТ «ЦГЗК») вирішено важливе науково-практичне завдання — виконано комплексний аналіз впливу фізико-хімічних, структурних та гранулометричних характеристик вихідних шихтових матеріалів на техніко-економічні показники та якісні параметри процесу виробництва залізородних окатишів.

Аналіз чинного стану технології та матеріального балансу шихтопідготовки засвідчив, що стабільність роботи конвеєрних випалювальних машин типу ОК-324 безпосередньо лімітується коливаннями параметрів вихідного магнетитового концентрату, флюсуючого вапняку та бентонітового глинопорошку. Визначено, що концентрат із високим ступенем збагачення вимагає підвищеної уваги до процесів капілярного зволоження через значну питому поверхню матеріалу (1600–1800 см²/г).

Встановлено екстремальний параболічний характер впливу вологості шихти на кінетику зародкоутворення і міцність сирих гранул. Доведено, що підтримання вологості шихти в жорсткому технологічному коридорі 8,4–8,8 % є оптимальним для умов ПРАТ «ЦГЗК». Відхилення від цього діапазону в бік зниження (<8,2 %) зумовлює дефіцит капілярної вологи та падіння швидкості росту гранул, тоді як перезволоження (>9,0 %) веде до появи вільної вологи на поверхні, неконтрольованого укрупнення та руйнування окатишів у зоні сушки внаслідок інтенсивного внутрішнього пароутворення («ефекту вибуху»).

Досліджено вплив мінералогічної якості зв'язуючих добавок та встановлено, що використання високоякісного активованого натрієвого бентоніту з індексом набухання понад 18 мл/2г та колоїдністю не менше 88 % дозволяє підвищити термічну стійкість сирих окатишів з 320 °С до 510–560 °С. Це забезпечує можливість суттєвої інтенсифікації сушки без руйнування шару, що підвищує питому продуктивність випалювальної машини на 12–15 % та знижує витрату природного газу.

Виявлено, що оптимізація витрати бентонітового порошку з її зниженням до рівня 0,7 % замість базових 1,2 % (за рахунок застосування активованих форм) запобігає надмірному внесенню діоксиду кремнію (SiO_2) в шихту. Це дозволяє підвищити вміст заліза загального у готовому товарному продукті на 0,3–0,4 % та покращити його подальшу металургійну цінність для доменного плавлення.

Енергетичний аналіз процесу високотемпературного термозміцнення підтвердив суттєвий позитивний ефект від підвищення вмісту загального заліза в магнетитовому концентраті. Завдяки високій питомій теплоті екзотермічної реакції окиснення магнетиту до гематиту ($4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3$), зростання концентрації заліза в сировині забезпечує генерацію значного обсягу внутрішнього тепла, що дозволяє знизити питомі витрати природного газу на випалювальній машині з 15,5 до 9,8–10,2 м³/т окатишів.

Хімічний склад пустої породи концентрату безпосередньо визначає фазовий склад та в'язкість залізористо-силікатного розплаву, який цементує рудні зерна при температурах 1200–1300 °С. Встановлено, що підтримання модуля основності CaO/SiO_2 на рівні 0,5 забезпечує максимальну механічну міцність обпалених окатишів на стиснення (понад 300 кг/окатиш). Перевищення основності $>0,7$ викликає передчасне

оплавлення поверхні окатишів, злипання гранул у блоки («козли») та критичне погіршення газопроникності шару.

Науково обґрунтовано та розраховано технологічне рішення щодо введення до складу вихідної шихти дисперсного твердого палива (коксового дрібняку або вугілля) в кількості 1,0 %. На основі лабораторних досліджень доведено доцільність попереднього подрібнення паливної добавки до переважного вмісту класу 40–71 мкм, що гарантує рівномірне вигорання вуглецю по всьому об'єму окатиша, стимулює рідкофазне спікання через локальне утворення фаяліту ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) та знижує температуру в горні машини на 40–60 °С.

Проведено комплексний розрахунок економічної ефективності запропонованого проекту модернізації шихтового комплексу фабрики огрудкування ПРАТ «ЦГЗК». Розрахунки калькуляції собівартості показали, що часткова заміна природного газу внутрішнім теплом твердого палива дозволяє знизити витрату газу на 5,3 м³/т продукції. Попри витрати на закупівлю й підготовку коксового дрібняку, чисте зниження цехової собівартості окатишів становить 13,83 грн/т.

За умов стабільного річного обсягу виробництва окатишів на рівні 2 873 700 тонн, загальний річний економічний ефект від реалізації запропонованого технічного рішення складе 39 743 271 грн. Обсяг необхідних капітальних інвестицій на будівництво та інтеграцію ділянки підготовки й автоматичного дозування вуглецевих добавок становить 85 000 000 грн. Розрахований термін окупності капітальних вкладень становить 2,14 роки (близько 2 років і 2 місяців), що підтверджує високу інвестиційну привабливість, техніко-економічну доцільність та стабільність розробленого проекту в сучасних ринкових реаліях металургійної галузі України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д. Ф. Чернега та ін. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.
2. Удосконалення технології та обладнання агломераційного виробництва / О. Д. Учитель та ін. Кривий Ріг : Видавець Р. А. Козлов, 2018. 182 с.
3. Петренко І. М., Ковальський О. В. Вплив бентонітових і штучних зв'язуючих добавок на міцність сирих залізорудних обкотишів. Вісник Криворізького національного університету. 2023. Вип. 56. С. 45–51.
4. Бережний М. М., Мовчан В. П. Збагачення та окускування сировини. Кривий Ріг, 2000. 368 с.
5. Дослідження процесу спікання залізорудних котунів із підвищеним вмістом твердого палива / Д. Ф. Чернега та ін. Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-технічний журнал. 2013. № 2 (88). С. 124–128. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7127>.
6. Shvets I., Babenko M., Grishin A. Thermal treatment of iron ore pellets on straight-grate indurating machines. *Journal of Mining and Metallurgy*. 2020. Vol. 56, No. 2. P. 115–123.
7. Production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks / L. Kieush et al. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2021. Vol. 27, no. 4. P. 167–171. DOI: <https://doi.org/10.36547/ams.27.4.1052>.
8. Дослідження ефективності заміни природного газу твердим паливом для випалу залізорудних окатишів / Д. А. Ковальов та ін. Теорія і практика металургії. 2019. № 3. С. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.03>.

9. Fernandez-Gonzalez R., Martin-Duarte J., Pineiro-Alvarez A. Optimization of pelletizing process parameters for hematite and magnetite concentrates. *Steel Research International*. 2019. Vol. 90, No. 8. Art. 1900112.
10. Kovalenko A. B., Sorokin V. A. Mineralogical and structural transformations in fluxed iron ore pellets during high-temperature heating. *Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 88, No. 1. P. 102–110.
11. Bondarenko V., Shevchenko O. Effect of CaO/SiO₂ basicity on the metallurgical properties of iron ore pellets. *Ukrainian Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 12–19.
12. Малий Є. І., Старовойт М. А. Модифікація вугілля і вугільної шихти для підвищення якості коксу як доменного палива. *ВуглеХімічний журнал*. 2013. № 3-4. С. 8–16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukhj_2013_3-4_4.
13. Ягольник М. В., Ковальов Д. А., Бочка В. В. Дослідження можливостей використання різних видів твердого палива у виробництві окатишів. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-24>.
14. Robinson R. High Temperature Properties of By-Product cold bonded pellets containing Blast Furnace Flue Dust. *Thermochimica Acta*. 2005. Vol. 432. P. 112–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.04.015>.
15. Зелені технології у промисловості : монографія / І. А. Василенко та ін. Дніпро : Акцент ПП, 2019. 366 с.
16. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042-99. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : Держстандарт України, 1999. 13 с.
17. Опалення, вентиляція та кондиціонування : ДБН В.2.5-67:2013. [На заміну СНиП 2.04.05-91 ; чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2013. 141 с. (Державні будівельні норми України).

18. Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги : ДСТУ Б А.3.2-12:2009. [Чинний від 2010-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 11 с. (Державний стандарт України).

19. Економіка підприємства : підручник / за заг. ред. С. Ф. Покропивного. Київ : КНЕУ, 2009. 528 с.

20. Федоненко Н. П., Грицай О. І. Економіка та організація металургійного виробництва : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2014. 144 с.

21. Ільчук П. Г., Коц О. О. Аналіз інвестиційних проектів : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. 240 с.