

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

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

**Тема роботи: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА 4,8 млн. т/рік
ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ОСНОВНІСТЮ 0,7 ПРИ ВИКОРИСТАННІ
АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ НЕОРГАНІЧНИХ СПОЛУЧНИХ»**

Виконав:
студентка групи ЗМТ-22-1 _____ Людмила КАГЛЯК

Керівник випускної роботи _____ Тетяна ЯРОШ

Нормоконтролер _____ Тетяна ЯРОШ

Т.в.о. завідувача кафедри _____ Дмитро БАБОШКО

Кривий Ріг
2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою _____

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на випускню атестаційну роботу бакалавра

Кагляк Людмила Петрівна

1. Тема роботи: Розробка технології виробництва 4,8 млн. т/рік залізрудних окатишів основністю 0,7 при використанні альтернативних видів неорганічних сполучних

керівник роботи: к.т.н., доцент Ярош Тетяна Петрівна

затверджено наказом по КНУ від « 19 » 02 2026 р. № 114с

2. Строк подання роботи студентом « 01 » 06 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: випалювальна машина; рентгенофлуоресцентного спектрометра EXPERT 4L; хімічний склад вихідних компонентів шихти; фізико-механічні характеристики та питомі витрати вихідних матеріалів шихти; питома витрата постелі – 200 кг/т; Оптимальна вологість шихти в процесі змішування і огрудкування ($W_{\text{сир. ок.}} = 9,0-9,5\%$); вихід відсіву (повернення) випалених окатишів – 1%.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питання, які потрібно розробити)

1. Теплові особливості процесу виробництва залізрудних окатишів.
2. Розрахунок витрати шихтових матеріалів при виробництві окатишів.
3. Обґрунтування параметрів та розрахунок технологічної лінії виробництва окатишів.
4. Обґрунтування та визначення параметрів основного технологічного обладнання

5. Перелік графічного матеріалу

Вплив різних сполучних добавок на показники процесу. Порівняльні показники міцності дослідних окатишів. Графічна залежність міцнісних характеристик випалених. Характеристика сирих та висушених окатишів. Фізико-хімічні характеристики випалених окатишів. Технологічна схема виробництва окатишів. Схема ланцюга апаратів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання бакалаврської роботи	Термін виконання етапів
1	Збір і обробка необхідного матеріалу для виконання кваліфікаційної роботи	19.01-27.01.2026
2	Аналіз літературних джерел та постановка завдання дослідження	28.01-08.02.2026
3	Теплові особливості процесу виробництва залізорудних окатишів	09.02-25.02.2026
4	Розрахунок витрати шихтових матеріалів при виробництві окатишів	26.02-10.03.2026
5	Обґрунтування параметрів та розрахунок технологічної лінії виробництва окатишів	11.03-10.04.2026
6	Обґрунтування та визначення параметрів основного технологічного обладнання	11.04-30.04.2026
7	Підсумкові показники роботи проектного комплексу з виробництва окатишів	01.05-20.05.2026
8	Оформлення роботи та креслення	21.05-31.05.2026
9	Перевірка роботи на плагіат	01.06-15.06.2026
10	Захист кваліфікаційної роботи	19.06.2026

Дата видачі завдання «__ 19 __» _____ 02 _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Людмила КАГЛЯК
(підпис)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Тетяна ЯРОШ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему:
«Розробка технології виробництва 4,8 млн. т/рік залізорудних окатишів
основністю 0,7 при використанні альтернативних видів неорганічних
сполучних»: 59 стор., 17 табл., 3 рис., 21 літературне джерело.

Об'єкт дослідження: процес виробництва залізорудних окатишів із
використанням альтернативних неорганічних сполучних.

Предмет дослідження: технологічні властивості активованих
бентонітових глин супутнього видобутку, а також їх вплив на якість сирих та
випалених окатишів.

Метою роботи є розробка технології отримання високоякісних
залізорудних окатишів при використанні активованих бентонітових глин.

Результати роботи: виконано аналіз можливості заміни імпортних
лужних бентонітів вітчизняними бентонітовими глинами супутнього видобутку
марганцевих та залізних руд. Експериментально обґрунтовано параметри
хімічної активації глин кальцинованою содою (3–6%), що дозволяє перевести їх
у клас лужних бентонітів. Результати випробувань підтвердили ефективність
розробленої технології: при витраті активованого бентоніту на рівні 1,4%
продуктивність агрегату зросла на 4,1–6,3%, а якість випалених окатишів
покращилася.

БЕНТОНІТ, АКТИВОВАНА БЕНТОНІТОВА ГЛИНА,
КАЛЬЦИНОВАНА СОДА, ЗАЛІЗОРУДНІ ОКАТИШІ, МІЦНІСНІ
ВЛАСТИВОСТІ.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.Р						
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Кагляк			РЕФЕРАТ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірив		Ярош							1	1	
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1			
Н. контр.		Ярош									
Затвердив		Бабошко									

ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

Перв. примен.		№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Кол. листов	№ экз.	Примечание	
		1							
		2	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.ПЗ	Пояснювальна записка	59			
		3							
		4			Графічна частина				
		5			(Презентація)				
Справ. №		6	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.01	Вплив різних сполучних				
		7		додавок на показники процесу	1				
		8	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.02	Порівняльні показники міцності				
		9		дослідних окатишів	1				
		10	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.03	Графічна залежність міцнісних				
		11		характеристик випалених окатишів	1				
		12	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.04	Характеристика сухих та				
		13		висушених окатишів	1				
		14	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.05	Фізико-хімічні характеристики				
		15		випалених окатишів	1				
Подп. и дата		16	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.06	Технологічна схема				
		17		виробництва окатишів	1				
		18	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-03.07	Схема ланцюга апаратів	1			
Инв. № докл.		19							
		20							
		21							
Взам. инв. №		22							
		23							
		24							
Подп. и дата									
Инв. № подл.		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	КНУ.РБ.136.26.114с-03.В0 Відомість об'єму матеріалів кваліфікаційної роботи Чертеж общего вида		
		Разраб.	Казляк						
		Пров.	Ярош						
		Н.контр.	Ярош						
		Утв.	Бабашко						
		Лит.	Лист	Листов					
		р	δ	1	1				
		кафедра МЧМ/В							
		група ЗМТ-22-1							
		Копировал							
		Формат А4							

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.3								
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата									
Розробив		Кагляк			ЗМІСТ			Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевірів		Ярош								1		2	
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1					
Н. контр.		Ярош											
Затвердив		Бабошко											

4.6 Вибір і розрахунок кількості огрудкувачів для отримання сирих окатишів	51
4.7 Техніко-економічне обґрунтування результатів проектування цеху з виробництва окатишів	53
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.3	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

ВСТУП

Використання неорганічних заміників бентоніту має чітко виражений економічний ефект, що базується на оптимізації собівартості чавуну. Зменшення частки бентоніту в шихті лише на 1% дозволяє суттєво знизити вміст «паразитного» кремнезему, що автоматично скорочує витрати вапняку на ошлакування пустої породи. Менша кількість шлаку в доменній печі вивільняє корисний об'єм агрегату, забезпечуючи приріст продуктивності без додаткових капіталовкладень у розширення потужностей. Найвагомішою статтею економії є зниження питомої витрати дороговартісного коксу, оскільки на плавлення кожного зайвого кілограма шлаку витрачається значна кількість теплової енергії. Окрім прямої економії палива, підвищення вмісту заліза в сировині дозволяє металургійним підприємствам отримувати додатковий прибуток за рахунок випуску продукції з вищою доданою вартістю.

Пошук ефективних неорганічних заміників також диктується вичерпанням родовищ високоякісних бентонітових глин та стрімким зростанням їхньої вартості через логістичні витрати. Використання промислових відходів, наприклад залізовмісних шлаків, як сполучних елементів дозволяє одночасно вирішити екологічну проблему утилізації техногенних накопичень. Крім того, скорочення енерговитрат на одиницю продукції також знижує екологічні платежі та викиди CO₂, що стає критичним фактором у контексті впровадження вуглецевих податків.

Використання альтернативних неорганічних сполучних у меншому дозуванні дозволяє суттєво скоротити обсяги закупівель та витрати на утримання складських приміщень. Крім того, нестабільність ринкових цін на імпортований

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.ВС			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив	Кагляк						1	1
Перевірив	Ярош							
Рецензент								
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		

бентоніт створює додаткові фінансові ризики, яких можна уникнути завдяки переходу на локальні або синтетичні замінники. Оптимізація витрат на зв'язуючі матеріали безпосередньо впливає на зниження порогу беззбитковості виробництва залізорудної сировини.

У підсумку, перехід на альтернативні сполучні є не просто технологічним кроком, а стратегічним рішенням для підвищення рентабельності всього металургійного циклу.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.ВС	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

1 ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ СПОЛУЧНИХ ДОБАВОК ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ

1.1 Літературний огляд можливих сполучних для виготовлення залізородних окатишів

Перспективним напрямком розвитку металургії є пошук зв'язуючих агентів, що мінімізують антропогенний вплив на довкілля та сприяють збереженню природних ландшафтів. Ідеальна сполучна добавка має не лише відповідати жорстким економічним і технічним стандартам, а й гарантувати високу якість готових окатишів, зокрема шляхом радикального зменшення частки порожньої породи в їхньому складі.

Сучасна варіативність допоміжних матеріалів дозволяє виробникам гнучко адаптувати технологію огрудкування до актуальних ринкових запитів. Впровадження органічних сполучних речовин є стратегічно важливим кроком, оскільки вони дозволяють суттєво оптимізувати матеріальні витрати та покращити якісні характеристики сировини.

1.1.1 Використання органічних сполучних

Для ефективного використання в промисловості такі реагенти повинні бути порошкоподібними, добре розчинними у воді та мати високу адгезійну здатність (рідкі форми є нетехнологічними через природну вологість концентрату).

Найбільш відповідним цим критеріям є похідна целюлози – карбоксиметилцелюлоза (КМЦ), а саме її натрієва сіль. Ця сполука, що є ефіром целюлози та гліколевої кислоти, синтезується шляхом взаємодії лужної целюлози з натрієвою сіллю монохлороцтової кислоти, забезпечуючи стабільне огрудкування залізородної маси.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ СПОЛУЧНИХ ДОБАВОК ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив	Кагляр							
Перевірив	Ярош						1.1	20
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

Результати досліджень підтверджують, що використання КМЦ дозволяє скоротити обсяги сполучних добавок – орієнтовно вдесятеро порівняно з бентонітом. Якщо для досягнення нормативної міцності сухих окатишів (25–30 Н/окат.) зазвичай потрібно 1,5–1,8% бентоніту, то аналогічний технологічний ефект досягається при значно менших дозуваннях органіки. Водночас виключно низьков'язка КМЦ у концентрації 0,15% не завжди забезпечує необхідну стійкість сировини.

Найбільш перспективним рішенням виглядає комбіноване використання КМЦ та бентоніту. Оптимальні показники міцності фіксуються при додаванні всього 0,5 кг КМЦ на тонну продукції (0,05%) у поєднанні з мінеральною основою. Попри технологічну доцільність повної або часткової заміни бентоніту при витратах КМЦ на рівні 0,5–1,0 кг/т, широке впровадження методу стримується високою вартістю та дефіцитом реагенту. Виходом може стати розробка дешевших видів КМЦ на основі листяної деревини або невибіленої целюлози у співпраці з хімічною галуззю.

Окрім целюлозних ефірів, розглядаються й інші органічні сполучні:

1. Крохмаль: додавання 0,2% крохмалю у вигляді мікрогранул не лише підвищує пластичність шихти, а й запобігає налипанню матеріалу на робочі поверхні обладнання.

2. Спінена полістиролова гума: японська технологія передбачає введення до 25% цього порошку з подальшою термічною обробкою при 1000 °С, що зміцнює структуру через ефекти оплавлення.

3. Полівініловий спирт: завдяки високій в'язкості та адгезії до твердих частинок, цей водорозчинний полімер забезпечує виняткову міцність як вологих, так і сухих окатишів.

Головною перевагою органічних домішок над традиційним бентонітом є їхня здатність майже повністю вигорати під час термічної обробки. Це забезпечує зростання концентрації заліза в кінцевому продукті на 0,6–0,8%, залежно від специфіки шихти та базових витрат бентоніту. Проте схильність до

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
						1.2
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

окислення, обмежені обсяги виробництва та висока ціна наразі залишаються головними бар'єрами для їхнього масового промислового застосування.

1.1.2 Використання неорганічних сполучних

У пошуках альтернативи бентоніту було досліджено широке коло вологомістких добавок, серед яких: вапно (гашене та негашене), хлористий кальцій, нонтронітові глини, залізний купорос, сільвініт, бура тощо.

1. Рідке скло (силікат натрію або калію) – це один із найпотужніших неорганічних клеїв.

- Механізм: при висиханні або хімічному твердінні утворює міцну силікатну плівку.
- Переваги: забезпечує надвисоку міцність сирих окатишів або брикетів уже при малих витратах (1–3%).
- Недоліки: вводить у шихту значну кількість лужних металів (Na_2O , K_2O), що вкрай небажано для доменної плавки (руйнує футеровку печі та сприяє утворенню «настилів»). Також знижує температуру розм'якшення окатишів.

2. Цементи (переважно портландцемент).

Використовуються переважно для безобпалювального огрудкування відходів (шламів, пилу).

- Механізм: гідратація мінералів цементного клінкеру з утворенням кристалогідратів.
- Переваги: висока міцність продукту без енергомісткого випалу.
- Недоліки: повільне набирання міцності (потрібен час на твердіння), значне підвищення вмісту пустої породи (CaO , SiO_2 , Al_2O_3), що збільшує вихід шлаку в печі.

3. Хлористий магній та хлористий кальцій

Використовуються як сольові добавки для інтенсифікації процесів.

- Механізм: сприяють утворенню кристалізаційних містків між зернами концентрату.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
						1.3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Особливість:** Часто застосовуються взимку як добавки проти змерзання шихти, але вони мають обмежену сполучну здатність порівняно з глинами.

4. Залізорудні шлами та колошниковий пил

Це самостійні «техногенні» сполучні, які вже містять тонкодисперсні частинки.

- **Механізм:** завдяки високій питомій поверхні вони діють як мікронаповнювачі, що покращують пакування зерен у шихті.

- **Ефект:** дозволяють дещо знизити витрату дорогого бентоніту, але самі по собі не можуть повністю замінити його через низьку пластичність.

5. Магнієві сполучні (каустичний магнезит)

- **Механізм:** при змішуванні з розчинами солей (наприклад, $MgCl_2$) утворює магнезіальний цемент.

- **Переваги:** дуже висока швидкість твердіння та механічна міцність.

- **Недоліки:** висока вартість компонентів і складність дозування у великих промислових масштабах.

Порівняльний вплив на техніко-економічні показники процесу при використанні різних видів неорганічних сполучних показано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив різних сполучних добавок на показники процесу

Речовина	Міцність сирих окатишів	Вплив на металургійні властивості	Вартість
Рідке скло	Надвисока	Негативний (луги)	Середня
Цемент	Висока	Збільшує вихід шлаку	Висока
Шлами	Низька	Позитивний (рециклінг)	Низька
Бентоніт (активований)	Оптимальна	Нейтральний/Позитивний	Оптимальна

Найбільш перспективним серед мінеральних заміників визнано саме вапно, оскільки воно, подібно до глини, має виражені в'язучі властивості. Головна перевага використання вапна полягає в його доступності та природній поширеності. На відміну від бентоніту, цей матеріал практично не вносить сторонніх домішок, що погіршують якість рудної суміші, і не призводить до розубоження заліза в доменній шихті.

Проте практичний досвід, зокрема випробування на дослідно-промисловій базі Північного ГЗК, виявив низку суттєвих обмежень:

1) технологічна ефективність: заміна бентоніту негашеним вапном майже не змінила показники міцності сирих окатишів;

2) економічний фактор: на сьогодні вартість вапна залишається занадто високою для його масового використання як основного сполучного агенту;

3) виробнича санітарія: найбільш критичним недоліком є використання тонкодисперсного вапна, що спричиняє сильне запилення на ділянках підготовки шихти та значно погіршує умови праці персоналу.

Таким чином, попри хімічну перевагу вапна, його широке впровадження потребує вирішення питань пилоподавлення та оптимізації витрат.

Для проведення досліджень було підготовлено такі шихтові компоненти: залізорудний концентрат, бентоніт і вапняк. Частину вапняку піддавали термічній обробці в муфельній печі СНОЛ 30/1300 за температури 950 °С протягом декількох годин. Це дозволило отримати випалене вапно, необхідне для експериментальної частини роботи. Детальні дані щодо хімічних характеристик використаних матеріалів наведено в таблиці 1.2.

У межах досліді було сформовано два види шихтових сумішей:

1) окатиші групи I, для виготовлення яких використовувалися залізорудний концентрат, бентоніт і вапняк;

2) окатиші групи II: суміш залізорудного концентрату виключно з випаленим вапном.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.5

Таблиця 1.2 – Хімічні характеристики вихідної сировини

Найменування матеріалу	Хімічний склад, %						Вміст вологи, %
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	В.п.п.	
Залізорудний матеріал	65,28	1,4	2,5	0,11	0,028	-	-
Вапняк	-	1,7	0,8	50,51	0,7	42,90	-
Вапно	-	0,73	1,12	95,1	0,8	-	-
Бентоніт	-	60,84	17,81	0,94	2,57	-	9,59

Дозування компонентів у кожній суміші розраховувалося з орієнтацією на досягнення показника основності на рівні 0,25 од. Співвідношення складових частин шихти (у відсотковому еквіваленті до залізорудної маси) для обох дослідних груп представлено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Співвідношення шихтових компонентів для виробництва окатишів груп I і II

	Бентоніт, %	Вапняк, %	Вапно, %
Окатиші I	0,30	0,95	-
Окатиші II	-	-	0,45

У сирих, сухих і випалених окатишах обох груп визначалися їхні міцнісні показники. Результати досліджень представлено в табл. 1.4.

Аналіз даних таблиці 1.4 свідчить про те, що використання гашеного вапна забезпечує вищі показники міцності сирих окатишів (як на стискання, так і на удар) порівняно з традиційним бентонітовим сполучним». Такий ефект зумовлений процесом гідратації оксиду кальцію: при утворенні Ca(OH)₂ у вологому середовищі речовина диспергується на мікроскопічні частки, що

гарантує максимально рівномірний розподіл компонента в шихті та посилює когезійні зв'язки.

Таблиця 1.4 – Порівняльні показники міцності дослідних окатишів

Вид окатишів	Вологість, %	Основність, од.	Міцності сирих окатишів		Міцність висушених окатишів, кг/ок.
			на скидання, рази	на стискання, кг/ок.	
Окатиші І	8,5	0,25	9,0	1,3	5,5
Окатиші ІІ	8,8	0,25	12,0	1,5	3,5

Водночас окатиші на основі вапняку та бентоніту демонструють кращу термічну стійкість під час нагрівання. У зразках із вапном спостерігається інтенсивніше руйнування структури через дегідратацію гідроксиду кальцію, що супроводжується активним виділенням водяної пари всередині окатиша.

Попри це, міцність випалених окатишів з додаванням вапна становить 3,5 кг/ок, що суттєво перевищує мінімальний норматив доменного виробництва (2,2 кг/ок) і підтверджує їхню придатність для плавки. Динаміку зміни міцності окатишів обох груп залежно від режиму випалу наведено на рисунку 1.1.

Графічні дані на рисунку 1.1 демонструють, що пікові показники міцності випалених окатишів досягаються при 15-хвилинній термічній обробці в температурному діапазоні 1280–1300 °С. При цьому підвищення температури до 1300 °С забезпечує стабільно вищу міцність для обох дослідних груп порівняно з режимом 1280 °С. Характерно, що окатиші на основі вапна за міцнісними характеристиками перевершують зразки групи І (з бентонітом і вапняком) за всіх контрольних температур.

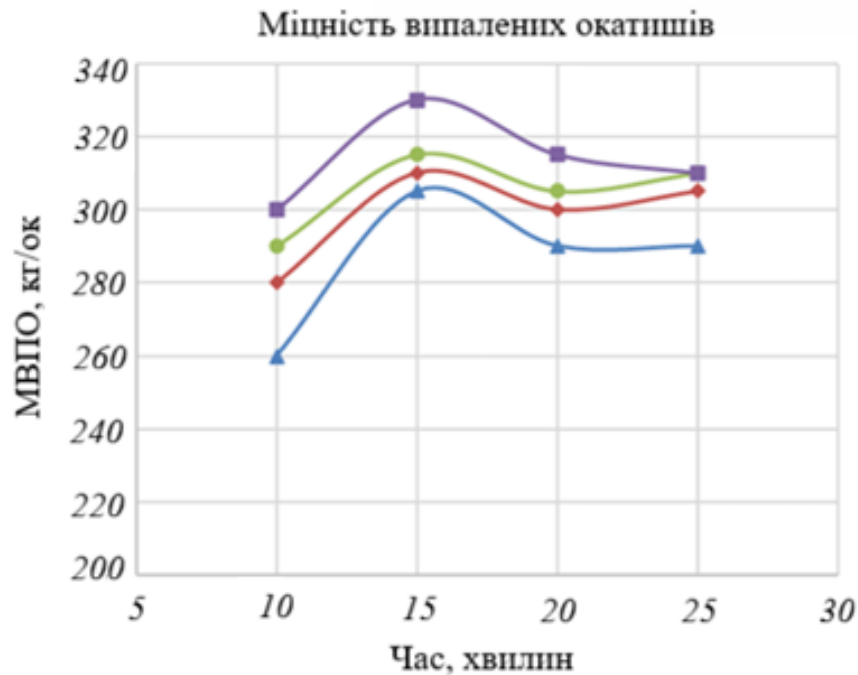


Рисунок 1.1 – Графічна залежність міцнісних характеристик випалених окатишів: — вапняк + бентоніт, 1280 град.; — вапняк + бентоніт, 1300 град.; — вапно, 1280 град.; — вапно, 1300 град.

Навіть при скороченні часу випалу до 10 хвилин (за 1280 °С) отримані результати – 260 кг/ок для групи I та 290 кг/ок для групи II – повністю відповідають технологічним стандартам, що дозволяє використовувати їх як сировину в доменному процесі.

Вищий опір руйнуванню у зразків групи II пояснюється двома факторами:

1) мікроструктурним: максимально гомогенний розподіл оксиду кальцію (СаО) сприяє активному формуванню зміцнюючих мінеральних фаз як в об'ємі, так і на поверхні окатиша;

2) енергетичним: на відміну від окатишів групи I, де відбувається енерговитратний ендотермічний розклад вапняку (CaCO_3) при 900 °С, окатиші групи II позбавлені цього деструктивного етапу, що позитивно впливає на цілісність структури.

1.2 Дослідження можливості використання активованої глини супутнього видобутку при виробництві залізорудних окатишів

Географічна близькість Нікопольського родовища марганцевих руд до криворізьких збагачувальних фабрик відкриває логістичні переваги, оскільки під час видобутку основної руди там попутно вилучають значні обсяги бентонітових глин.

Нікопольські бентонітові глини характеризуються високим вмістом монтморилоніту, що забезпечує їм відмінну адгезійну здатність при взаємодії з криворізьким магнетитовим концентратом. Завдяки високій питомій поверхні частинок, такий бентоніт створює щільні «містки» між зернами руди, що критично важливо для міцності сирих окатишів.

Проте варто враховувати такі особливості хімічної сумісності:

1. Лужність: високий вміст іонів натрію та калію в нікопольських глинах сприяє кращій пластичності шихти, але надлишок лугів у доменній печі може прискорювати руйнування футеровки.

2. Вміст марганцю: оскільки це супутня порода марганцевого родовища, мікродомішки марганцю в бентоніті можуть позитивно впливати на в'язкість шлаків при подальшій плавці.

3. Гігроскопічність: нікопольський бентоніт ефективно поглинає надлишкову вологу концентрату (яка в залізорудному криворізькому концентраті часто становить більше 10%), запобігаючи перезволоженню шихти під час огрудування.

Порівняння Нікопольського та Черкаського (Дашуківського) родовищ бентоніту показує суттєві відмінності, що впливають на технологію виробництва окатишів:

1. Мінеральний склад: черкаський бентоніт вважається еталонним завдяки надвисокому вмісту монтморилоніту (понад 70-80%), що забезпечує максимальну клейку здатність. Нікопольські глини часто мають вищий вміст

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
						1.9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

піщаних та пилюватих домішок, що дещо знижує їхню зв'язувальну силу на одиницю маси.

2. Тип обмінних катіонів: черкаське родовище представлене переважно кальцієвими бентонітами, які потребують додаткової активації содою для кращого набухання. Нікопольські поклади часто мають змішаний склад, що робить їх дещо дешевше в підготовці, але менш стабільними за показником виходу «гелю».

3. Вплив на залізо: через вищий вміст заліза (у формі оксидів) у супутніх глинах Нікополя, вони менше «розбавляють» загальний вміст Fe в окатишах, ніж чисті білі або сірі глини Черкащини.

4. Логістична складова: для гірничо-збагачувальних комбінатів Кривого Рогу Нікопольський бентоніт є найвигіднішим через мінімальне транспортне плече (близько 100 км), тоді як доставка з Черкаської області суттєво здорожчує кожену тонну сировини.

5. Технологічна норма: через нижчу сортність нікопольського матеріалу, його витрата в шихті зазвичай на 15-20% вища, ніж при використанні високоякісного черкаського аналога, щоб досягти тієї ж міцності сирого окатиша.

Порівняльна характеристика основних фізико-хімічних показників бентонітів Нікопольського та Черкаського (Дашуківського) родовищ, що критично впливають на процес огрудкування, показана в табл. 1.5.

Основні висновки з порівняння:

1) набухання: Черкаський бентоніт має значно вищу здатність до збільшення в об'ємі, що дозволяє використовувати меншу кількість добавки для досягнення необхідної зв'язності шихти;

2) вологоємність: завдяки вищій вологоємності черкаська глина краще «зв'язує» надлишкову вологу концентрату, що важливо для стабільної роботи чашових огрудковувачів;

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.10

Таблиця 1.5 – Основні показники бентонітів Нікопольського та Черкаського родовищ

Показник	Нікопольське родовище	Черкаське родовище
Вміст монтморилоніту, %	45 – 60	70 – 85
Коефіцієнт набухання (відн. од.)	4.0 – 6.5	8.0 – 12.0 (після активації)
Вологоємність (статична), %	120 – 150	180 – 220
Вміст SiO ₂ (кремнезему), %	52 – 58	48 – 54
Вміст Al ₂ O ₃ (глинозему), %	14 – 18	16 – 21
Логістичне плече до Кривбасу	~100 км	~350 – 400 км

3) економіка: попри кращі технологічні властивості Черкаського бентоніту, Нікопольський матеріал часто виграє за рахунок низької ціни та короткого логістичного шляху, навіть при вищій питомій витраті (на 2-3 кг більше на тонну окатишів).

Поліпшити властивості сполучної добавки можна шляхом її активації. Наприклад, активація содою (Na₂CO₃) – це хімічний процес перетворення кальцієвого або змішаного бентоніту на натрієву форму, що критично важливо для підвищення його зв'язувальних властивостей.

Механізм та переваги активації для нікопольських глин:

1. Заміна катіонів: під час змішування глини з розчином соди іони кальцію (Ca²⁺) у міжпакетному просторі монтморилоніту заміщуються іонами натрію (Na⁺). Це приводить до збільшення відстані між шарами мінералу, що дозволяє молекулам води легше проникати всередину.

2. Зростання набрякання: після активації коефіцієнт набухання нікопольського бентоніту може зрости у 1,5–2 рази. Це дозволяє отримувати міцні сирі окатиші при меншій кількості сполучного, що прямо впливає на чистоту заліза в кінцевому продукті.

3. Покращення пластичності: натрієва форма бентоніту робить шихту більш «слухняною» під час огрудкування в чашах, запобігаючи утворенню нерівномірних за розміром окатишів (дріб'язку або занадто великих грудок).

4. Способи введення:

- сухий метод – додавання порошкоподібної соди безпосередньо під час помелу бентоніту на фабриці;

- мокрий метод – зрошення бентоніту розчином соди перед подачею в змішувач шихти (більш ефективний для рівномірного розподілу).

Хоча додавання соди підвищує вартість активованої бентонітової глини, це компенсується зниженням загальної витрати сполучного на 15–25%, що, у свою чергу, дозволяє зменшити кількість кремнезему (SiO_2) у шихті. Крім того, додавання активованої бентонітової глини дозволяє забезпечити стабільність процесу огрудкування навіть при зміні вологості залізорудного концентрату.

У роботі набухання глин визначали за наступною методикою. Пробу бентоніту крупністю 0,1-0 мм і об'ємом 5 мл поміщали в мірний циліндр ємністю 100 мл і внутрішнім діаметром 25 мм. Потім доливали 70 мл дистильованої води та ретельно перемішували. Після цього вливали в циліндр в якості коагулятора 5 мл 5% розчину хлористого кальцію і доливали дистильовану воду до мітки. Вміст судини залишали у спокої на добу. Величину набухання визначали по відношенню обсягів проби, яка набухла і вихідної проби.

Для оцінки ефективності модифікації бентоніту як активатор застосовували кальциновану соду, яку вносили безпосередньо у вологу глиняну масу з наступним ретельним перемішуванням. Паралельно проводилася серія дослідів із використанням водного розчину карбонату натрію для обробки сировини.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.12

Головними критеріями дослідження виступали концентрація реагенту та тривалість витримки активованих зразків, що безпосередньо впливають на здатність глини до розширення в об'ємі. Згідно з отриманими даними (рис. 1.2), природна бентонітова глина без добавок характеризується вкрай низькими показниками набухання.

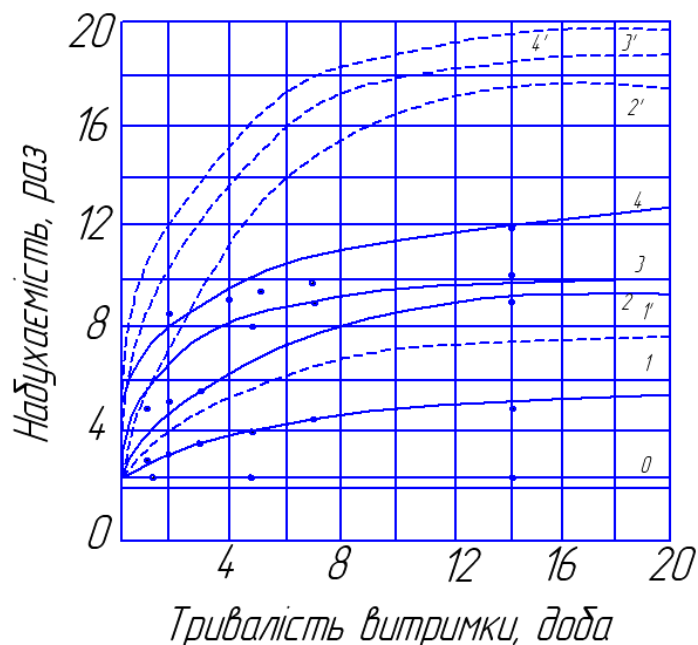


Рисунок 1.2 – Залежність набухання від вмісту соди та часу витримки:

1 - 4 – вміст сухої соди 0,5, 1,0, 1,5 та 2,0% відповідно;

1' - 4' – вміст соди з активатором 0,5, 1,0, 1,5 та 2,0% відповідно;

0 – глина без активатору

Проте застосування розчину кальцинованої соди дозволяє досягти вражаючих результатів: після витримки суміші від 7 до 20 діб здатність до набухання зростає у 15–18 разів порівняно з вихідною сировиною. Використання сухої кальцинованої соди за аналогічний період забезпечує дещо менший ефект – збільшення об'єму в 9–12,2 рази.

Найбільш інтенсивна активація спостерігається при підвищенні частки соди до 6%: у такому разі показник набухання сягає 18-20-кратного значення вже через п'ять діб витримки. Це свідчить про те, що правильний вибір методу

введення активатора та часу витримки дозволяє радикально покращити сорбційні властивості бентонітових глин.

Після змішування глини з карбонатом натрію на відкритому майданчику, їхнього сумісного подрібнення та подальшої п'ятидобової витримки в умовах закритого складу, здатність сировини до набухання зросла до показників 9,0–17,1 раза.

Ключовим результатом дослідного етапу стало успішне зниження частки бентонітової глини в шихті – в середньому на 0,6% порівняно з початковими регламентними показниками. Це підтверджує високу ефективність попередньої активації глини содою, що дозволяє зменшити витрати сполучного без втрати якості огрудкування.

Порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей концентрату в базовий та дослідний періоди суттєвих відмінностей не виявив – сировина залишалася стабільною. Проте під час експерименту було зафіксовано кращий ступінь подрібнення флюсової суміші (табл. 1.6), хоча рівень її вологості дещо перевищував базові значення.

Таблиця 1.6 – Фізико-хімічні властивості вихідних матеріалів та шихти

Період	Концентрат					Суміш вапняку і зв'язуючого		
	частка вологи за масою %	масова доля класу -74 мкм, %	питома поверхня м ² /кг	хімічний склад, %		хімічний склад, %		масова доля класу -74 мкм, %
				Fe _{заг}	SiO ₂	CaO+MgO	SiO ₂	
Базовий	10,3	92,1	157,0	65,7	8,1	43,8	10,8	89,7
Дослідний	10,2	91,7	156,0	65,7	7,8	43,6	10,5	90,4

продовження таблиці 1.6

Шихта					
хімічний склад, %				основність CaO/ MgO, дол.од	частка вологи за масою, %
Fe _{заг}	CaO	MgO	SiO ₂		
57,0	6,4	1,58	8,2	0,86	9,2
58,6	4,3	1,28	8,1	0,69	9,4

У дослідному періоді міцність сирих і висушених окатишів була вищою, сирі окатиші мали більш гладку поверхню. Гранулометричний склад сирих окатишів в базовому і дослідному періоді був однаковий (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Характеристика сирих та висушених окатишів

Період	Масова доля вологи, %	Міцність на стиснення, кг/об.		Міцність на удар з висоти 500 мм, раз
		сирих	сухих	
Базовий	9,2	1,3	4,9	10
Дослідний	9,1	1,3	5,6	12

продовження таблиці 1.7

Гранулометричний склад, %					Вихід придатного (фр. 8-18 мм), %	Кількість відсіву з-під ролико- укладальника, %
-8	8-12	12-16	16-18	+18		
4,8	10,0	42,8	17,2	25,2	70,0	15,8
4,3	8,9	34,2	25,5	27,1	68,1	14,3

Під час проведення випробувань було забезпечено суворе дотримання регламентних параметрів термічної обробки, що відповідало чинній технологічній карті підприємства. Це дозволило об'єктивно порівняти ефективність базового та дослідного складів шихти без спотворення результатів через коливання температурних режимів.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
						1.15
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Незважаючи на однакову швидкість руху випалювальної машини (1,1 м/хв.) в обох періодах, активація бентонітової глини та покращення властивостей шихти дозволили збільшити висоту шару сирих окатишів на 20 мм. Таке нарощування товщини шару свідчить про вищу газопроникність шихтового матеріалу та його здатність витримувати статичне навантаження без руйнування нижніх горизонтів. Збільшення висоти шару при сталій швидкості конвеєра прямо пропорційно веде до зростання питомої продуктивності випалювальної установки.

Якісні показники випалених окатишів представлено в табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Фізико-хімічні характеристики випалених окатишів

Період	Хімічний склад, %				
	Fe _{заг}	FeO	CaO	MgO	SiO ₂
Базовий	58,4	3,3	5,0	1,46	8,3
Дослідний	59,5	3,0	5,4	1,56	8,0

продовження таблиці 1.8

Основність СаО/ MgO, дол.од	Вміст фракції 0-5 мм, %	Міцність по ГОСТ 15137-81, %		Міцність на стиснення, кг/ок.
		+5 мм	-5 мм	
0,78	6,2	91,3	6,9	260
0,86	6,0	91,4	6,9	300

Аналіз якісних характеристик готової продукції (табл. 1.8) показав наступні переваги дослідної партії:

1. Механічна міцність: показники на стискання та стиранність виявилися стабільно вищими, що пов'язано з рівномірнішим розподілом активованого сполучного.

2. Термічна стійкість: окатиші краще витримували шоківі температурні навантаження в зоні сушки, що мінімізувало утворення дріб'язку (фракції -5 мм).

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.16

3. Хімічна гомогенність: завдяки кращому подрібненню та змішуванню компонентів, хімічний склад окатишів став більш однорідним по всій висоті шару.

Таким чином, використання активованої бентонітової глини не лише покращило якість металургійної сировини, а й створило технічні передумови для інтенсифікації роботи випалювальних агрегатів.

Для розрахунку приросту продуктивності випалювальної машини при збільшенні висоти шару на 20 мм треба скористатися прямою пропорційною залежністю об'єму матеріалу від геометричних параметрів насипу.

1. Вихідні дані для розрахунку:

- стандартна висота шару окатишів на машинах типу ОК (наприклад, ОК-306) зазвичай становить 400 мм (0,4 м);
- збільшення висоти шару (Δh) становить 20 мм (0,02 м).

2. Розрахунок відносного приросту:

$$\Delta P = \frac{\Delta h}{h_{\text{баз}}} \times 100\%.$$

$$\Delta P = \frac{20 \text{ мм}}{400 \text{ мм}} \times 100\% = 5,0\%.$$

3. Технологічне обґрунтування:

- Збільшення виходу продукції. Оскільки швидкість руху машини залишилася незмінною (1,1 м/хв), збільшення висоти шару на 5% означає, що за кожну хвилину через зону випалу проходить на 5% більше корисної маси сировини;
- Енергоефективність. Оскільки витрати палива на роботу приводів машини та вентиляторів залишаються практично сталими, питомі витрати енергії на тонну готових окатишів знижуються пропорційно зростанню продуктивності;
- Газодинаміка. Можливість тримати вищий шар без зниження швидкості машини підтверджує, що активований бентоніт забезпечує кращу грудковатість

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
						1.17
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шихти. Це створює пористу структуру шару з низьким газодинамічним опором, що дозволяє ефективно прогрівати навіть збільшений об'єм матеріалу.

Таким чином, підняття висоти шару всього на 20 мм забезпечує стабільний приріст продуктивності агрегату на рівні 5%, що в масштабах великого гірничо-збагачувального комбінату Кривого Рогу еквівалентно додатковому випуску десятків тисяч тон окатишів на місяць без залучення нових потужностей.

Показники виробництва, приведені в табл. 1.9, наочно демонструють переваги дослідного періоду випробувань над базовим.

Таблиця 1.9 – Порівняльна таблиця показників ефективності в базовому та дослідному періодах

Показник	Базовий період	Дослідний період	Ефект (%)
Витрата бентоніту, %	1,5 – 1,8	0,9 – 1,2	-35% (економія)
Вміст заліза (Fe) в окатишах, %	62,5	63,1	+0,6% (якість)
Висота шару на машині, мм	400	420	+5% (об'єм)
Питома продуктивність, т/год	100%	105%	+5% (ефективність)
Міцність на стискання, кг/ок	240	275	+14% (механіка)

Проведені випробування з використанням у складі шихти активованої бентонітової глини як сполучної добавки показали, що активація цієї глини кальцинованою содою дозволяє отримати бентоніт хорошої якості, який відповідає технічним умовам ТУ-14-9-198-80. Використання активованої глини в технологічному процесі поліпшило всі показники процесу та сприяло підвищенню якості готових окатишів.

Отже, на підставі отриманих результатів можна зробити такі висновки за трьома ключовими напрямками:

1. Економічна доцільність та імпортозаміщення.

Логістична перевага: використання глин супутнього видобутку марганцевих і залізних руд (наприклад, родовищ Нікопольського марганцеворудного басейну або Криворіжжя) різко знижує собівартість шихти за рахунок відсутності витрат на далеку транскордонну логістику, яка раніше була необхідна для закупівлі високоякісних бентонітів (наприклад, з Азербайджану чи Греції).

Вартість компонентів: хоча кальцинована сода є додатковою статтею витрат, її частка (3–6%) значно дешевша за використання чисто органічних зв'язуючих (полімерів).

2. Науково-технічний аспект активації.

Іонообмінний процес: суть активації кальцинованою содою (Na_2CO_3) полягає в заміні двовалентних катіонів кальцію (Ca^{2+}) та магнію (Mg^{2+}) у проміжках між окремими елементарними шарами (пакетами) кристалічної ґратки монтморилоніту на одновалентні катіони натрію (Na^+). Це призводить до:

- збільшення товщини гідратних оболонок навколо частинок глини;
- підвищення набухання та перетворення лужноземельної глини на лужну.

При цьому дуже важливим є процес витримки вихідної бентонітової глини з активуючою речовиною. Вимога витримки суміші не менше 15 діб пояснюється низькою швидкістю дифузії іонів натрію всередину глинистих агрегатів. Тільки після завершення іонообміну глина набуває необхідної колоїдності для ефективного огрудкування.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
						1.19
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Технологічні переваги при виробництві окатишів:

1) зміцнення сирих окатишів: активована глина створює міцніші «мости» між зернами залізорудного концентрату. Це підвищує ударну міцність та опір стисненню сирих окатишів, що критично важливо для збереження їхньої цілісності при транспортуванні та завантаженні на випалювальну машину;

2) вплив на продуктивність: зростання продуктивності на 4,1–6,3% досягається завдяки покращенню газопроникності шару окатишів на решітці випалювальної машини. Оптимальна кількість активованого бентоніту запобігає надмірному перезволоженню нижніх шарів (ефект «перезволоження»), що зазвичай сповільнює процес випалу;

3) якість продукту: одержані окатиші мають стабільну пористість, що покращує їхню відновлюваність у доменній печі.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.01.ВАСДВО	Аркуш
						1.20
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Досліджувані зразки (залізорудний концентрат, флюсові і сполучні добавки) попередньо висушували та усереднювали до однорідного стану для забезпечення відтворюваності результатів. Підготовлені наважки матеріалу поміщали у спеціальну вимірювальну камеру приладу. Завдяки високій чутливості детектора аналізатор EXPERT 4L дозволяє одночасно ідентифікувати широкий спектр елементів. Отримані спектри автоматично оброблялися програмним забезпеченням приладу, що дозволило отримати кількісний вміст оксидів та домішок у відсотковому співвідношенні. Результати виконаного аналізу приведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад вихідної сировини для виробництва окатишів

Матеріали	Вміст компонентів, %						
	Fe _{заг}	S _{заг}	P	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Залізорудний концентрат	65,28	0,03	-	1,70	91,37	1,40	2,50
Бентонітова глина	3,43	-	-	-	4,90	58,30	17,50
Вапняк	-	-	-	-	-	1,70	0,80

продовження табл. 2.1

Вміст компонентів, %					
CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
0,11	0,03	-	0,075	2,815	-
1,50	1,70	-	-	16,10	-
50,51	0,70	-	-	3,39	42,90

Для розрахунку необхідної кількості сировини та встановлення кінцевого складу окатишів було застосовано відповідний методичний підхід.

Матеріальний баланс процесу відображено через наступну математичну залежність:

$$G_o = P \cdot K_p + \Phi \cdot K_\phi + B \cdot K_\delta \pm O_2,$$

де G_o – одиниця прийнятої для розрахунку маси (100 або 1000 кг окатишів);

P, Φ, B – питомі витрати відповідно рудної, флюсової і бентонітової сумішей, кг/100(1000) кг окатишів;

K_p, K_ϕ, K_δ – коефіцієнти виходу випаленої маси з сухої маси відповідно рудного, флюсового і бентонітового компонентів шихти, част. од.;

O_2 – приріст (+) або втрата (–) маси відповідно від окислення або відновлення оксидів заліза, що містяться в шихті, кг/100 (1000) кг окатишів.

Для встановлення співвідношення маси випаленого матеріалу до вихідної сухої сировини за окремими складниками використовується така формула:

$$K^0 = 0,01(100 - \eta_S \cdot S_{за}^0 - C_\Gamma^0 - \eta_{ВПП} \cdot ВПП^0 - MnO_2^0 \cdot \frac{16}{87}), \text{ част.од.}$$

де $S_{за}^0, C_\Gamma^0, ВПП^0, MnO_2^0$ – середньозважений вміст, відповідно загальної сірки, горючого вуглецю, втрат при прожарюванні й оксидів марганцю в компонентах шихти, %;

$\eta_{ВПП}, \eta_S$ – прийняті ступені видалення, відповідно, ВПП і сірки, част.од.

З урахуванням прийнятих значень – ступеня видалення сірки 70% та 100-відсоткових втрат при термічній обробці (ВПП) – було отримано такі показники:

$$K_p^0 = 0,01(100 - 0,70 \cdot 0,03 - 0) = 0,9998.$$

$$K_\phi^0 = 0,01(100 - 0,70 \cdot 0 - 0) = 1.$$

$$K_B^0 = 0,01(100 - 0,70 \cdot 0 - 42,90) = 0,571.$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.02.РПХСЗО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2.3

Змінення маси шихти, що виникає через реакції окиснення та відновлення залізовмісних оксидів у процесі випалу:

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left(\frac{P_{\Sigma} \cdot FeO_p^0}{100} + \frac{\Phi_{\Sigma} \cdot FeO_{\phi}^0}{100} + \frac{\Pi_{\Sigma} \cdot FeO_{\Pi}^0}{100} + \frac{Б_{\Sigma} \cdot FeO_B^0}{100} - FeO_{a(0)}^0 \right), \text{ кг/т,}$$

де FeO^0 – середньозважений вміст закису заліза в сумішах компонентів шихти й окатишах, %.

При прийнятому для розрахунків вмісті FeO в обпаленому продукті на рівні 1,7%, результуюча зміна ваги матеріалів становитиме:

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left(\frac{P \cdot 1,7}{100} + \frac{\Phi \cdot 0}{100} + \frac{Б \cdot 0}{100} - 1,7 \right) = 0,0019 \cdot P - 0,1889.$$

Формування рівняння балансу матеріалів з урахуванням змінення маси компонентів під час термічного оброблення в агрегаті для випалювання:

$$1000 = 0,9998 \cdot P + 0,571 \cdot \Phi + 1 \cdot Б + 0,0019 \cdot P - 0,1889.$$

$$1000,1889 = 1,0017 \cdot P + 0,571 \cdot \Phi + 1 \cdot Б.$$

Для визначення модуля основності шихти з урахуванням концентрації домінуючих кислих та основних оксидів використовується наступна формула:

$$m_{a(0)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot (CaO_{P_{\Sigma}}^0 + MgO_{P_{\Sigma}}^0) + \Phi_{\Sigma} \cdot (CaO_{\Phi_{\Sigma}}^0 + MgO_{\Phi_{\Sigma}}^0) + \Pi_{\Sigma} \cdot (CaO_{\Pi_{\Sigma}}^0 + MgO_{\Pi_{\Sigma}}^0) + Б_{\Sigma} \cdot (CaO_{Б_{\Sigma}}^0 + MgO_{Б_{\Sigma}}^0)}{P_{\Sigma} \cdot (SiO_{2P_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3P_{\Sigma}}^0) + \Phi_{\Sigma} \cdot (SiO_{2\Phi_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3\Phi_{\Sigma}}^0) + \Pi_{\Sigma} \cdot (SiO_{2\Pi_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3\Pi_{\Sigma}}^0) + Б_{\Sigma} \cdot (SiO_{2Б_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3Б_{\Sigma}}^0)}$$

де CaO^0 , MgO^0 , SiO_2^0 , $Al_2O_3^0$ – середньозважений вміст основних і кислих оксидів у відповідних сумішах, %;

m_0 – основність окатишів, част. од.

$$0,7 = \frac{0,14 P_{\Sigma} + 51,21 \Phi_{\Sigma} + 3,2 Б_{\Sigma}}{3,9 P_{\Sigma} + 2,5 \Phi_{\Sigma} + 79,7 Б_{\Sigma}}.$$

$$2,59 P_{\Sigma} - 49,46 \Phi_{\Sigma} + 52,59 Б_{\Sigma} = 0.$$

Для встановлення оптимального дозування компонентів шихти застосовується метод сумісного розв'язання балансових рівнянь. Розрахункова модель базується на зіставленні приходу та витрати хімічних елементів з

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.02.РПХСЗО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2.4

одночасним урахуванням заданого значення основності (CaO/SiO_2). Це гарантує, що отриманий склад шихти буде не лише збалансованим за масою, а й відповідатиме заданим металургійним вимогам.

$$\begin{cases} 1000,1889 = 1,0017 \cdot P + 0,571 \cdot \Phi + 1 \cdot B \\ 2,59 \cdot P - 49,46 \cdot \Phi + 52,59 \cdot B = 0 \end{cases}$$

Оскільки раніше було встановлено, що додавання активованої бентонітової глини в кількості 1,4% забезпечує оптимальний баланс між міцністю сирих окатишів та їхньою здатністю до швидкого сушіння без руйнування, можна прийняти її питому витрату на рівні $B = 14 \text{ кг/т}$.

$$1000,1889 = 1,0017 \cdot P + 0,571 \cdot \Phi + 1 \cdot 14.$$

$$1,0017 \cdot P + 0,571 \cdot \Phi = 986,1889.$$

$$\begin{cases} 1,0017 \cdot P + 0,571 \cdot \Phi = 986,1889 \\ 49,46 \cdot \Phi - 2,59 \cdot P = 736,26 \end{cases}$$

Розрахунок питомої потреби в сухих складниках шихти виконується для підвищення економічної ефективності та зниження енергоємності процесу термообробки. Ці розрахункові величини задають оптимальний масовий баланс сировини, необхідний для формування заданого хімічного складу та експлуатаційних параметрів випалених окатишів:

$$P = 947,7346 \text{ кг/т}.$$

$$\Phi = 64,5150 \text{ кг/т}.$$

$$B = 14 \text{ кг/т}.$$

Сумарна маса сухих складників шихтової суміші – 1026,2496 кг/т.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.02.РПХСЗО	Аркуш
						2.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Прогнозування хімічних характеристик отриманих окатишів

На базі отриманих значень витрат шихтових складників проведено розрахунок хімічного складу готового продукту. Цей крок дозволяє заздалегідь встановити частку заліза, основних оксидів і шкідливих елементів, що є ключовим для підтвердження металургійної придатності окатишів. Під час обчислень було встановлено сумарну кількість усіх компонентів, що надходять у шихту з кожним її інгредієнтом (флюсом, зв'язуючим та концентратом):

$$Fe_{\text{заг}} = 947,7346 \cdot 0,6528 + 64,5150 \cdot 0 + 14 \cdot 0,0343 = 619,161 \text{ кг.}$$

$$S_{\text{заг}} = 947,7346 \cdot 0,0003 + 64,5150 \cdot 0 + 14 \cdot 0 = 0,284 \text{ кг.}$$

$$FeO = 947,7346 \cdot 0,017 + 64,5150 \cdot 0 + 14 \cdot 0 = 16,111 \text{ кг.}$$

$$Fe_2O_3 = 947,7346 \cdot 0,9137 + 64,5150 \cdot 0 + 14 \cdot 0,049 = 866,631 \text{ кг.}$$

$$SiO_2 = 947,7346 \cdot 0,014 + 64,5150 \cdot 0,017 + 14 \cdot 0,583 = 22,527 \text{ кг.}$$

$$Al_2O_3 = 947,7346 \cdot 0,025 + 64,5150 \cdot 0,008 + 14 \cdot 0,175 = 26,659 \text{ кг.}$$

$$CaO = 947,7346 \cdot 0,0011 + 64,5150 \cdot 0,5051 + 14 \cdot 0,015 = 33,839 \text{ кг.}$$

$$MgO = 947,7346 \cdot 0,0003 + 64,5150 \cdot 0,007 + 14 \cdot 0,017 = 0,974 \text{ кг.}$$

$$SO_3 = 947,7346 \cdot 0,00075 + 64,5150 \cdot 0 + 14 \cdot 0 = 0,711 \text{ кг.}$$

$$\text{Інші} = 947,7346 \cdot 0,02815 + 64,5150 \cdot 0,0339 + 14 \cdot 0,161 = 31,120 \text{ кг.}$$

$$\text{ВПП} = 947,7346 \cdot 0 + 64,5150 \cdot 0,429 + 14 \cdot 0 = 27,677 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.02.РПХСЗО	Аркуш
						2.6
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок складу випаленої сировини базується на припущенні, що деякі оксидні сполуки (зокрема магнезія, вапно, глинозем та кремнезем) не змінюють своєї ваги. Слід враховувати, що фактична концентрація елементів у готовому продукті відрізняється від розрахункової через термічну дисоціацію карбонатів, повне видалення гігроскопічної та кристалізаційної вологи, а також перебіг окислювально-відновних процесів під час обпалу. Ці хімічні перетворення призводять до зміни маси зразка та відповідного перерахунку часток компонентів у кінцевому складі окатишів.

Зміни стосуються насамперед таких сполук:

- S та C – переходять у гази через процеси окиснення;
- втрати маси – обумовлені десорбцією вологи та розкладанням мінеральних солей (карбонатів);
- оксиди заліза – зміна їхньої масової частки зумовлена переходом закису заліза у вищий оксид.

Кількісний вміст інгредієнтів у готових окатишах обчислюють за допомогою наведених формул:

$$Fe_{зага(o)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot Fe_{P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Pi_{\Sigma}}^0 + B_{\Sigma} \cdot Fe_{B_{\Sigma}}^0}{G_{a(o)}},$$

$$SiO_{2a(o)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot SiO_{2P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Pi_{\Sigma}}^0 + B_{\Sigma} \cdot SiO_{2B_{\Sigma}}^0}{G_{a(o)}},$$

де Fe^0, SiO_2^0 – середньозважений вміст елементів і оксидів у відповідній суміші, %.

Особливу увагу при розрахунках слід приділити реакції переходу магнетиту в гематит. Цей процес супроводжується адсорбцією кисню з газового середовища, що призводить до теоретичного збільшення маси залізорудного залишку приблизно на 3,3% від вмісту закису заліза. Такий приріст частково компенсує втрати від декарбонізації, що необхідно враховувати для точного визначення кінцевої концентрації заліза в окатишах.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.02.РПХСЗО	Аркуш
						2.7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунки здійснюються за формулами:

$$G_{FeO} = G_{FeO_{ш}} - G_{FeO_{a(o)}}, \text{ кг/т аглом. (окат.)},$$

де G_{FeO} , $G_{FeO_{ш}}$, $G_{FeO_{a(o)}}$ – маса FeO , відповідно, що окислюється (відновлюється), в шихті і в агломераті (окатишах), кг/т.

$$G_{FeO} = 1000 \cdot 0,017 - 16,111 = +0,889 \text{ кг.}$$

Зазначений коефіцієнт слугує для кількісного оцінювання появи гематиту (Fe_2O_3) у процесі інтенсивного окиснення магнетитової основи або закису заліза, що міститься в шихті (у розрахунках маркується знаком «+»). Навпаки, при виникненні відновних умов, які спричиняють дисоціацію вищих оксидів та втрату кисню, показник приймається з від'ємним значенням («-»). Такий диференційований підхід забезпечує високу точність при визначенні підсумкової маси залізорудної складової готової продукції:

$$G_{Fe_2O_3} = \pm \frac{G_{FeO} \cdot 160}{144}.$$

$$G_{Fe_2O_3} = \frac{0,889 \cdot 160}{144} = -0,987 \text{ кг.}$$

Підсумкові показники розрахунків для кожного елемента шихтової суміші були узагальнені та представлені у вигляді балансової таблиці 2.2.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.02.РПХСЗО	Аркуш
						2.8
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Хімічний склад та норми витрат шихтових матеріалів

Матеріали	Вміст компонентів, %											
	Fe _{заг}		S _{заг}		FeO		Fe ₂ O ₃		SiO ₂		Al ₂ O ₃	
	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
Залізорудний концентрат	65,28	618,681	0,03	0,284	1,70	16,111	91,37	865,945	1,40	13,268	2,50	23,693
Бентонітова глина	3,43	0,480	-	0	-	0	4,90	0,686	58,30	8,162	17,50	2,45
Вапняк	-	0	-	0	-	0	-	0	1,70	1,097	0,80	0,516
Всього шихти	60,33	619,161	0,03	0,284	1,57	16,111	84,45	866,631	2,20	22,527	2,60	26,659
Приріст (+) втрата (-) маси				-0,199		+0,889		-0,987				
Окатиші	62,04	619,161	0,01	0,085	1,70	17,0	86,74	865,644	2,26	22,527	2,67	26,659

КНУ.РБ.136.26.114с-03.02.РПХСЗО

продовження табл. 2.2

Вміст компонентів, %												Витрати сухих шихтових матеріалі в, кг/т
CaO		MgO		P ₂ O ₅		SO ₃		Інші		ВПП		
%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	
0,11	1,043	0,03	0,284	-	-	0,075	0,711	2,815	26,679	-	0	947,735
1,50	0,21	1,70	0,238	-	-	-	0	16,10	2,254	-	0	14
50,51	32,587	0,70	0,452	-	-	-	0	3,39	2,187	42,90	27,677	64,515
3,29	33,839	0,09	0,974	-	-	0,07	0,711	3,03	31,120	2,70	27,677	1026,250
							-0,498				-27,677	
3,39	33,839	0,10	0,974	-	-	0,02	0,213	3,12	31,120	0	0	997,976

Результати розрахунку хімічних властивостей готової продукції наведено у зведеній таблиці складу отриманих окатишів (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Прогнозовані показники фізико-хімічного складу випаленої сировини

Компоненти	Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Вміст, %	62,04	0,01	1,70	86,74	2,26	2,67

продовження табл. 2.3

Компоненти	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
Вміст, %	3,39	0,10	-	0,02	3,12	0

$$O_{CH} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{3,39 + 0,10}{2,26 + 2,67} = 0,71 \text{ част. од.}$$

3 РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЛАНЦЮГА ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

Вибір конкретної схеми огрудкування залізорудної сировини обумовлений її фізико-хімічною природою, зокрема гранулометричним складом, вмістом вологи та мінералогією. Ці чинники безпосередньо впливають на технологію підготовки шихти. Подальший регламент робіт (змішування, формування гранул, обпалювання) базується на перевірених практикою рішеннях сучасних фабрик огрудкування.

Вихідні показники для технологічних обчислень згруповано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Матеріальні витрати та фізико-механічні властивості вихідної шихти

Компоненти шихти	Питомі витрати , кг/т окатишів	Вміст вологи, %	Крупність, мм
Залізорудний концентрат	947,735	10,1	-0,063
Бентонітова глина	14	27,6	-100
Вапняк	64,515	5,2	-100

Додаткові дані для виконання розрахунків:

- 1) Вихід повернення після операції просівання сирих окатишів 5%.
- 2) Оптимальна вологість шихти в процесі змішування і огрудкування ($W_{\text{сир. ок.}} = 9,0-9,5\%$).
- 3) Вихід відсіву (повернення) випалених окатишів – 1%.
- 4) Питома витрата постелі – 200 кг/т.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.03.РТЛОВО			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Кагляк				РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЛАНЦЮГА ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						3.1	5
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

5) Механічні втрати компонентів шихти в процесі виробництва окускованого матеріалу – 1,9%.

Для ефективної роботи систем вагового контролю необхідно встановити масу вологої сировини, що подається в процес. Обчислення виконуються з урахуванням розрахованих витрат сухої речовини, фактичної вологості кожного компонента та коефіцієнта технологічних втрат, зумовлених транспортуванням і перевантажувальними операціями:

$$M_{\text{вол.}} = \frac{M_{\text{сух.}} \cdot 10^4}{(100 - W)(100 - \text{Втр.})}, \quad (3.1)$$

де W – вміст води в матеріалі, %.

Втр. – механічні втрати компонентів шихти, %.

Фактична вага вологої залізовмісної сировини розраховується для концентрату, який є головним компонентом у складі шихти:

$$M_{\text{з.к.}} = \frac{947,735 \cdot 10^4}{(100 - 10,1)(100 - 1,9)} = 1074,6 \text{ кг.}$$

Визначення маси бентоніту в складі шихти проводиться з урахуванням його фактичної вологості та специфічних властивостей як мінеральної зв'язки:

$$M_{\text{б.}} = \frac{14 \cdot 10^4}{(100 - 27,6)(100 - 1,9)} = 19,7 \text{ кг.}$$

Висока гідрофільність глини дозволяє їй ефективно зв'язувати надлишкову вільну вологу концентрату, перетворюючи її на капілярну.

Маса вологого флюсового компонента визначається для дотримання заданого хімічного складу (основності), враховуючи природну вологість вапняку:

$$M_{\text{в.}} = \frac{64,515 \cdot 10^4}{(100 - 5,2)(100 - 1,9)} = 69,4 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.03.РТЛОВО	Аркуш
						3.2
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кількість бентонітової глини після проходження процесу попереднього нагріву до встановленого рівня вологості 12%. Цей параметр визначає проміжні властивості зв'язуючого матеріалу після сушіння, що забезпечує стабільність мінеральної структури під час логістичних операцій та подальшої інтеграції в технологічну лінію підготовки шихти:

$$M_{\text{б.підс.}} = M_{\text{б.}} - M_{\text{б.}} \cdot (W_{\text{б.}} - W_{\text{б.підс.}})/100. \quad (3.2)$$

$$M_{\text{б.підс.}} = 19,7 - 19,7 \cdot \frac{27,6 - 12}{100} = 16,6 \text{ кг.}$$

Маса підсушеної до 4% та подрібненої бентонітової глини, готової до введення в шихту. Такий стан матеріалу дозволяє досягти його високої ефективності як сполучної добавки. Поєднання тонкої дисперсності та низького вмісту води сприяє рівномірній дифузії частинок глини між зернами концентрату, забезпечуючи максимальну реакційну здатність речовини під час формування шихти:

$$M_{\text{б.подр.}} = 16,6 - 16,6 \cdot \frac{12 - 4}{100} = 15,3 \text{ кг.}$$

Кількість флюсуючого складника (вапняку) після проведення механічного дроблення та підсушування до рівня 2,5%. Контроль маси сухого вапняку відіграє вирішальну роль у точності введення оксиду кальцію в систему. Завдяки низькій вологості вдається нейтралізувати ефект злипання дрібних зерен матеріалу, що гарантує отримання окатишів із заданим і рівномірним хімічним складом:

$$M_{\text{в.подр.}} = M_{\text{в.}} - M_{\text{в.}} \cdot (W_{\text{в.}} - W_{\text{в.подр.}})/100. \quad (3.3)$$

$$M_{\text{в.подр.}} = 69,4 - 69,4 \cdot \frac{5,2 - 2,5}{100} = 67,5 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.03.РТЛОВО	Аркуш
						3.3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маса зворотного продукту в сухому стані обчислюється за відповідною формулою:

$$M_{\text{відс.}} = \frac{M_{\text{ок}} \cdot \text{Відсів}}{100}, \quad (3.4)$$

де $M_{\text{ок}}$ – маса випалених окатишів, кг;

Відсів – вихід відсівання, %.

Показник базується на кількості дефектних окатишів та дріб'язку, що повертаються до системи підготовки шихти. Такий підхід дозволяє точно визначити інтенсивність внутрішнього обігу матеріалів у технологічній схемі.

$$M_{\text{відс.}} = \frac{1000 \cdot 1}{100} = 10 \text{ кг.}$$

Вага збірного навантаження шихтових матеріалів разом із сухим зворотним продуктом. Цей показник демонструє дійсне завантаження змішувачів, адже додавання відсіву до основної маси шихти безпосередньо змінює підсумкові потоки матеріалів:

$$M_{\text{вих.}} = 1074,6 + 15,3 + 67,5 + 10 = 1167,4 \text{ кг.}$$

Обчислений рівень вологості багатокомпонентної шихти. Він базується на масових частках та вологості шихтових компонентів, що надходять у технологічний процес огрудкування. Показник використовується для встановлення дефіциту води, який потрібно компенсувати перед огрудкуванням, згідно з наступним виразом:

$$W_{\text{сер.}} = W_1 \cdot \frac{m_1}{\sum m_i} + W_2 \cdot \frac{m_2}{\sum m_i} + W_3 \cdot \frac{m_3}{\sum m_i} + \dots + W_i \cdot \frac{m_i}{\sum m_i}, \quad (3.5)$$

де $m_1, m_2, m_3, \dots, m_i$ – маса першого, другого, третього, ..., i -го компонентів суміші, кг;

$\sum m_i$ – сумарна маса всіх компонентів суміші, кг.

$$W_{\text{сер.}} = 10,1 \frac{1074,6}{1167,4} + 4 \frac{15,3}{1167,4} + 2,5 \frac{67,5}{1167,4} + 0 \frac{10}{1167,4} = 9,5\%.$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.03.РТЛОВО	Аркуш
						3.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Повна вага матеріалів на етапі формування гранул, що включає первинну шихту та масу вологого повернення. Показник охоплює ті сирі окатиші, що відсіваються через невідповідність фракційному складу або руйнуються під час перевантажень на шляху до випалювальної машини. Даний розрахунок дозволяє об'єктивно оцінити фактичне навантаження на чашові чи барабанні огрудкувачі. Вираз для обчислення:

$$M_{\text{ш.огр.}} = M_{\text{вих.}} \left(1 + \frac{B_{\text{с.ок.}}}{100} \right), \quad (3.6)$$

де $B_{\text{с.ок.}}$ – масова частка повернення вологих некондиційних окатишів на повторне формування (% від загальної маси).

$$M_{\text{ш.огр.}} = 1167,4 \left(1 + \frac{5}{100} \right) = 1225,8 \text{ кг.}$$

Загальна вага продуктів термообробки на розвантажувальному кінці конвеєрного агрегату, що включає кондиційну фракцію, захисну постіль та технологічний відсів. Ця величина складається з маси готових окатишів, рециркуляційного шару для захисту колосникових решіток та дрібних уламків, що утворюються внаслідок дії термічних напруг під час випалювання:

$$C_{\text{п}} = 1000 + M_{\text{відс.}} + \text{Пост}, \quad (3.7)$$

де Пост – питома витрата постелі на виробництво окатишів, кг/т.

$$C_{\text{п}} = 1000 + 10 + 200 = 1210 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.03.РТЛОВО	Аркуш
						3.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ВИБІР ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ З ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

4.1 Визначення виробничих потужностей цеху

На цій стадії визначається фактичний обсяг виробництва продукції за годину, що є вихідною точкою для проектування потужностей конвеєрного транспорту, вузлів усереднення та випалювальних машин:

$$P_o = \frac{G}{\eta \cdot 365 \cdot 24}, \quad (4.1)$$

де G – річне виробництво окатишів, т/рік;

P_o – годинне виробництво окатишів цехом, т/год.;

η – коефіцієнт використання обладнання – відношення робочого часу до календарного, част.од. (приймаємо 0,85);

365 – календарна кількість днів в рік;

24 – кількість годин в добі.

$$P_o = \frac{4800000}{0,85 \cdot 365 \cdot 24} = 644,64 \text{ т/год.}$$

4.2 Встановлення обсягів постачання компонентів шихти за годину

Для розрахунку використовуються значення питомих витрат матеріалів (у розрахунку на одиницю маси продукції) та їхній початковій вологості, що були обґрунтовані раніше. Проведені обчислення дозволяють зафіксувати необхідний темп подачі вологої сировини – концентрату, бентонітової глини та вапняку – для забезпечення ритмічної роботи фабрики.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.04.ВООТЛВО			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Кагляк				ВИБІР ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ З ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						4.1	9
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

Розраховуються за формулою:

$$P_{з.к.} = P_o \cdot X_{з.к.}, \quad (4.2)$$

де $P_{з.к.}$ — годинна потреба в компоненті шихти (наприклад, залізорудний концентрат), т/год.;

$X_{з.к.}$ — питома витрата компонента шихти, т/т агл. (окат.).

$$P_{з.к.} = 644,64 \cdot 1,0746 = 692,73 \text{ т/год.}$$

$$P_{б.} = 644,64 \cdot 0,0197 = 12,70 \text{ т/год.}$$

$$P_{в.} = 644,64 \cdot 0,0694 = 44,74 \text{ т/год.}$$

4.3 Обґрунтування кількості бункерів для вихідної сировини

Обчислення необхідної кількості бункерних одиниць базується на показниках максимального погодинного навантаження та нормах складського запасу. Це необхідно для створення технологічного буфера, який забезпечить роботу цеху в разі затримок у логістиці складників шихти:

$$n_{з.к.} = \frac{P_{з.к.} \cdot \tau}{\gamma \cdot V_{б.} \cdot 0,85}, \quad (4.3)$$

де $P_{з.к.}$ — погодинна потреба в компоненті шихти, т/год;

τ — прийнятий нормативний запас компонента шихти в бункерах (4-10 год), год;

$V_{б.}$ — об'єм стандартних бункерів (100, 130, 200), м³;

0,85 — ступінь заповнення бункерів, част.од.;

γ — насипна маса компонента шихти, т/м³.

Принципи проведення розрахунків: результат визначення потреби в бункерах округлюється в бік зростання до цілої одиниці. Оскільки технологічна схема передбачає експлуатацію двох незалежних потоків, остаточну кількість накопичувачів обирають парною для забезпечення двопотокового завантаження.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.04.ВООТЛВО	Аркуш
						4.2
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{з.к.} = \frac{692,73 \cdot 10}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 18,3.$$

$$n_{б.} = \frac{12,70 \cdot 10}{0,93 \cdot 200 \cdot 0,85} = 0,8.$$

$$n_{в.} = \frac{44,74 \cdot 10}{1,51 \cdot 200 \cdot 0,85} = 1,8.$$

Обґрунтована кількість бункерних місткостей:

- для залізорудного концентрату (зважаючи на високу інтенсивність потоку) проектом передбачено 20 бункерів;
- для бентоніту обрано 2 бункери, що повністю покриває розрахунковий дефіцит матеріалу;
- для вапняку (флюсу) встановлюється 2 бункери, що дозволяє підтримувати задані хімічні параметри шихтової суміші.

4.4 Обґрунтування вибору дробильно-розмельного устаткування

Механічна підготовка компонентів шихти базується на застосуванні дробарок і вентильованих млинів ШБМ. Технологія також включає стадію сушіння бентоніту в барабанній печі для зниження його вологості з 25-30 % до рівня 12-15 %.

Вибір моделей обладнання зумовлений вхідними параметрами сировини:

- для флюсуючого вапняку та палива з розміром кусків понад 10 мм передбачено молоткові дробарки моделі ДМРИЭ-1450×1300 (продуктивність до 250 т/год);
- для сирого бентоніту доцільним є використання дробарок СМД-102 з функцією самоочищення, що гарантують потужність 150–500 т/год і фракцію на виході до 30 мм;
- для помелу шихтових компонентів застосовують млини ШБМ-370/850 з годинною потужністю на рівні 40–50 т.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.04.ВООТЛВО	Аркуш
						4.3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кількість дробарок і млинів розраховується за формулою:

$$n = \frac{P_{\text{в.}}}{q}, \quad (4.4)$$

$$n = \frac{P_{\text{б.}}}{q}, \quad (4.5)$$

де $P_{\text{в.}}$, $P_{\text{б.}}$ – годинна потреба у, відповідно, вапняку та бентоніту, т/год;

q – продуктивність дробарки або млина, т/год.

При остаточному визначенні кількості дробарок і млинів отримане розрахункове число коригується в бік збільшення до цілої одиниці. Проектним рішенням передбачається встановлення одного додаткового агрегату понад розраховану потребу. Це зумовлено специфікою роботи розмельного обладнання, яке потребує регулярних зупинок для заміни робочих тіл (куль) або очищення внутрішніх порожнин. Резервна одиниця обладнання забезпечує гнучкість виробничої схеми, дозволяючи підтримувати номінальну годинну продуктивність фабрики під час перебування основної техніки на технічному обслуговуванні.

$$n_{\text{др.б.}} = \frac{12,70}{150} = 0,08.$$

$$n_{\text{др.в.}} = \frac{44,74}{250} = 0,18.$$

$$n_{\text{мл.б.}} = \frac{12,70}{50} = 0,25.$$

$$n_{\text{мл.ф.}} = \frac{44,74}{50} = 0,9.$$

Для забезпечення стабільної роботи технологічного ланцюга прийнято наступну комплектацію дробильно-розмельовального устаткування:

1. Молоткові дробарки: по 2 одиниці для підготовки бентонітової глини та вапняку відповідно.

2. Кульові млини: по 2 одиниці для тонкого помелу кожного з цих компонентів.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.04.ВООТЛВО	Аркуш
						4.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий склад обладнання (1 робочий + 1 резервний агрегат на кожну позицію) гарантує безперебійне постачання сировини.

4.5 Розрахунок необхідної кількості обладнання для випалу сирих окатишів

Процес термічного зміцнення вологих гранул здійснюється на випалювальних машинах конвеєрного типу. Кількість одиниць обладнання встановлюється відповідно до річної потужності фабрики та фактичної знімальної здатності з одиниці робочої площі. У сучасній практиці проектування цехів кількість таких машин зазвичай становить від 2 до 10 одиниць.

На продуктивність термообробки суттєво впливає хімічний склад суміші (вміст флюсу та енергетичних добавок). Зокрема, введення додаткових 10 кг флюсу на кожну тонну сировини знижує ефективність роботи машини на 0,83%, що відповідає втраті 0,0079 т/м²·год продукції.

Сумарна робоча площа випалу визначається на базі уточненої питомої потужності за формулою:

$$S_{\Sigma} = \frac{P_o}{q}, \text{ м}^2, \quad (4.6)$$

де P_o – годинне виробництво окатишів цехом, т/год;

q – питома продуктивність випалювальної машини, т/м²·год.

Величина питомої продуктивності термічної установки суттєво залежить від складу шихти, зокрема від кількості введенного флюсу. За умови витрати вапняку на рівні 69,4 кг на тонну окатишів, прогнозований показник роботи конвеєрної стрічки становитиме 0,896 т/(м²·год). Подібна інтенсивність термообробки пов'язана з термодинамічними особливостями розкладу карбонатів та їхнім впливом на теплообмін у шарі. Це значення є відправною точкою для підбору типорозміру машини серії ОК, що дозволить реалізувати заплановані обсяги виробництва.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.04.ВООТЛВО	Аркуш
						4.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{\Sigma} = \frac{644,64}{0,896} = 719,5 \text{ м}^2.$$

З метою забезпечення процесу обпалювання сирих окатишів обрано конвеєрні машини, робоча площа яких становить 520 м². Визначення потреби в кількості таких одиниць обладнання базується на використанні такої формули:

$$N_o = \frac{S_{\Sigma}}{S_m}, \quad (4.7)$$

де N_o – кількість машин;

S_m – корисна площа обраної машини, м².

Математично визначену кількість одиниць для випалу приймають як найближче більше ціле число. У складі цього технологічного комплексу встановлення запасних машин не передбачено нормативами.

$$N_o = \frac{719,5}{520} = 1,4.$$

Орієнтуючись на результати розрахунків, виробничий корпус обладнується 2 випалювальними машинами.

Завершальним кроком цього підрозділу є встановлення годинної продуктивності обладнання для термопідготовки окатишів:

$$P_m = S_m \cdot q, \text{ т/год.}, \quad (4.8)$$

$$P_m = 520 \cdot 0,896 = 465,9 \text{ т/год.}$$

4.6 Вибір і розрахунок кількості огрудкувачів для отримання сирих окатишів

Для виробництва вологих гранул обрано чашові огрудкувачі, діаметр робочої поверхні яких складає 7,5 м. Пропускна здатність однієї такої установки за придатним продуктом (фракція 8-18 мм) становить 100-120 т/год. Кількість огрудкувачів, необхідна для виконання плану, обчислюється за формулою:

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.04.ВООТЛВО	Аркуш
						4.6
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{\text{огр.}} = \frac{P_{\text{м}}}{K \cdot P_{\text{огр}}}, \text{ шт.} \quad (4.9)$$

де $P_{\text{м}}$ – годинна продуктивність машини для термообробки окатишів, т/год;

K – коефіцієнт виходу 1 т окатишів з вологої шихти (визначається з балансової таблиці), ч.од.;

$P_{\text{огр}}$ – годинна продуктивність огрудкувача, т/год.

Для безперервної роботи випалювального агрегату в проєкті реалізовано наступні підходи:

1. Матеріальні розрахунки. Пропорція між масою готової сировини (997,976 кг) та масою вологої шихти (1167,4 кг) визначає коефіцієнт виходу продукції. Його обчислюють шляхом зіставлення ваги отриманих окатишів із масою затраченої шихтової суміші:

$$K = \frac{997,976}{1167,4} = 0,855.$$

$$n_{\text{огр.}} = \frac{465,9}{0,855 \cdot 120} = 4,5.$$

2. Надійність системи. Розрахункова кількість огрудкувачів коригується в бік збільшення до цілого числа. Також передбачено наявність одної одиниці резервного обладнання для компенсації потужностей під час сервісного обслуговування основних одиниць.

У підсумку, для кожної лінії прийнято до встановлення 6 чашових огрудкувачів.

Тоді загальне число використововуваного устаткування становитиме:

$$n_{\Sigma \text{огр.}} = N_o \cdot n_{\text{огр.}}, \quad (4.10)$$

де $n_{\Sigma \text{огр.}}$ – кількість огрудкувачів цеху, шт.;

N_o – кількість комбінованих установок, шт.;

$n_{\text{огр.}}$ – кількість огрудкувачів на одній машині, шт.

$$n_{\Sigma \text{огр.}} = 2 \cdot 6 = 12 \text{ шт.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.04.ВООТЛВО	Аркуш
						4.7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.7 Техніко-економічне обґрунтування результатів проектування цеху з виробництва окатишів

Таблиця 4.1 – Витрата компонентів шихти

Компоненти шихти	Питома витрата кг/т окатишів	Годинна витрата, т/год.	Добова витрата т/добу	Річна витрата, т/рік
Залізорудний концентрат	1074,6	692,73	16625,52	5158067,58
Бентонітова глина	19,7	12,70	304,8	94564,20
Вапняк	69,4	44,74	1073,76	333134,04
Разом вологої шихти	1163,7	750,17	18004,08	5585765,82

Таблиця 4.2 – Виробництво готової продукції (залізорудних окатишів)

Продукція	Годинне виробництво, т/год.	Добове виробництво, т/добу	Річне виробництво, т/рік
Окатиші	644,64	15471,36	4800000

Таблиця 4.3 – Характеристика основного технологічного обладнання

Найменування обладнання	Кількість, шт.	Тип	Продуктивність, т/год.
Витратні бункери концентрату	20	200 м ³	-
Витратні бункери бентонітової глини	2	200 м ³	-
Витратні бункери флюсів	2	200 м ³	-
Молоткові дробарки для флюсів	2	ДМРИЭ-1450x1300	250
Молоткові дробарки для бентоніту	2	СМД-102	150
Кульові вентильовані млини	4	ШБМ-3700/850	50
Огрудкувачі	12	Чашові Ø 7,5 м	120
Випалювальні машини	2	306 м ²	-

Таблиця 4.4 – Показники хімічного складу випалених окатишів

Компоненти	Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Вміст, %	62,04	0,01	1,70	86,74	2,26	2,67

продовження табл. 4.4

Компоненти	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
Вміст, %	3,39	0,10	-	0,02	3,12	0

ВИСНОВКИ

1. Установлено критичну відсутність родовищ високоякісних природно-лужних бентонітів на території України. Доведено, що серед неорганічних сполук повноцінних природних заміників бентоніту не існує, а використання органічних зв'язуючих (полімерів) є економічно недоцільним через їх високу вартість. Як раціональну альтернативу запропоновано використання бентонітових глин супутнього видобутку марганцевих та залізних руд.

2. За результатами фізико-хімічних та реологічних досліджень встановлено, що глини супутнього видобутку належать до класу лужноземельних бентонітів. Через низькі показники набухання, в'язкості та колоїдності їх пряме використання у шихту потребує значного перебільшення витрат, що негативно впливає на вміст заліза в готових окатишах.

3. Експериментально доведено, що обробка глин марганцевих руд кальцинованою содою у концентрації 3–6% значно змінює їхні властивості. При введенні понад 2% соди сума лужних катіонів зростає до 62–67 мг-екв/100 г сухої глини, що переводить матеріал у розряд лужних бентонітів середньої якості (згідно з вимогами ТУ-14-9-198-80).

4. Встановлено визначальну роль способу введення активатора та фактору часу. Для досягнення максимального набухання необхідно забезпечити ретельне змішування (переважно введення соди у вигляді розчину) та обов'язкову тривалу витримку суміші протягом не менше 15 діб, що зумовлено повільною дифузією іонів натрію в міжпакетний простір монтморилоніту.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.В			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив	Кагляк						1	2
Перевірив	Ярош							
Рецензент								
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		

5. Під час випробувань з'ясовано, що використання активованої суміші при витраті 1,4% дозволяє стабілізувати процес формування залізорудних офлюсованих окатишів. Це забезпечує оптимальний баланс між міцністю сирих окатишів та їхньою здатністю до швидкого сушіння без руйнування.

6. Впровадження розробленої технології дозволило збільшити питому продуктивність випалювального агрегату на 4,1–6,3%. Одночасно зафіксовано покращення фізико-механічних характеристик випалених окатишів (міцність на стискання, стиранність), що позитивно впливає на подальший доменний переділ.

7. Використання відходів (супутніх глин) замість імпортової сировини забезпечує значний економічний ефект за рахунок зниження собівартості шихти. Крім того, залучення супутніх глин у виробництво сприяє раціональному використанню надр та зменшенню навантаження на відвали гірничо-збагачувальних комбінатів.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.В	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <http://www.nbuv.gov.ua> (Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського).
2. Сировинні матеріали та їх підготовка до металургійних процесів: навчальний посібник / за ред. доктора технічних наук, професора І.Ф. Червоного Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2013. 408 с.
3. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 258 с.
4. Лялюк В.П., Ляхова І.А., Касімов О.М. Теорія і технологія підготовки металургійної шихти до плавки: навчальний посібник. Кривий Ріг: КНУ, 2015. 340 с.
5. Охотський В.В., Костьолов О.Л., Симонов В.К. Теорія металургійних процесів: підручник. Київ: ІЗМН, 1997. 512 с.
6. Величко О.Г., Низьяєв К.Г. Металургія сталі: підручник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2011. 420 с.
7. Стовба І. Г., Величко О. Г. Позапічна обробка чавуну і сталі: навч. посіб. Дніпропетровськ: Пороги, 2008. 198 с.
8. ДСТУ 2430-94 (ГОСТ 28177-89). Глини формувальні бентонітові. Загальні технічні умови. Чинний від 1995-01-01. Київ: Держстандарт України, 1994. 22 с.
9. ДСТУ 4060-2001. Вапно технологічне для металургійного виробництва. Технічні умови. Чинний від 2002-07-01. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 18 с.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.Л			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Кагляк				ЛІТЕРАТУРА	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						1	3
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

10. Система автоматичного керування процесом збагачення рудних матеріалів: пат. 67389 Україна. МПК В03В 13/0; опубл. 15.06.2004, Бюл. № 2. 2 с.

11. Спосіб одержання модифікованого бентоніту для грудкування залізорудних концентратів: пат. 118432 Україна: МПК С04В 33/04, В01J 20/12. № u201702441; заявл. 15.03.2017; опубл. 25.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

12. Шихта для виробництва залізорудних окатишів: пат. 104523 Україна: МПК С22В 1/14, С22В 1/244. № u201507612; заявл. 30.07.2015; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 3. 5 с.

13. Спосіб десульфурзації чавуну або сталі порошкоподібними сумішами: пат. 92415 Україна: МПК С21С 1/02, С21С 7/064. № u201402311; заявл. 06.03.2014; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15. 4 с.

14. Andrejkovičová J., Sudagar S., Rocha F. Bentonite as a natural additive for lime and lime–metakaolin mortars used for metallurgical linings and restoration. *Applied Clay Science*. 2015. Vol. 114. P. 120–131.

URL: <https://www.researchgate.net/publication/275345367> (дата звернення: 13.05.2026).

15. Lyalyuk V. P., Tarakanov A. K., Kassim D. O., Lyakhova I. A. The potential of using of alkaline earth bentonite clays of Ukraine in the production of iron ore pellets. *Theory and Practice of Metallurgy*. 2020. No. 1. P. 34–41.

DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2020.05>.

16. Srivastava A., Singh R., Kumar S. Eco-friendly bentonite clay as a binder in iron ore pelletization: A systematic characterization of physical and chemical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 24. P. 1502–1515.

17. Wang Y., Zhang M., Lin H. Experimental investigation on the mechanisms of lime-bentonite reactions at elevated temperatures. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022. Vol. 40, Iss. 3. P. 1125–1139.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.Л	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

18. Смирнов В.О., Білецький В.С. Фізичні та хімічні основи виробництва: навчальний посібник. Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. 148 с.

19. Збожна О.М. Основи технології: навчальний посібник. Тернопіль: Картбланш. 2002. 486 с.

20. Бережний М.М., Мовчан В.П. Збагачення та окискування сировини: монографія. Кривий Ріг: ЦГЗК, 2000. 368 с.

21. Воденніков С.А., Тарасов В.К., Воденнікова О.С. Конструкція агрегатів чорної металургії: навчально-методичний посібник. Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2012. 192 с.

					КНУ.РБ.136.26.114с-03.Л	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3