

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

КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної атестаційної роботи бакалавра
зі спеціальності 136 – **Металургія**

**Тема роботи: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА 5,2 млн. т/рік
ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ОСНОВНІСТЮ 0,75
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ
ВИТРАТИ ПАЛИВНИХ РЕСУРСІВ»**

Виконав:

студент групи ЗМТ-22-1

Ілля СТАХЄЄВ

Керівник випускної роботи

Тетяна ЯРОШ

Нормоконтролер

Тетяна ЯРОШ

Т.в.о. завідувача кафедри

Дмитро БАБОШКО

Кривий Ріг
2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійнийКафедра металургії чорних металів і ливарного виробництваОсвітньо-кваліфікаційний рівень: бакалаврСпеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою _____

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на випускню атестаційну роботу бакалавра

Стахєєв Ілля Сергійович

1. Тема роботи: Розробка технології виробництва 5,2 млн. т/рік залізородних окатишів основністю 0,75 із застосуванням технічних рішень щодо зменшення витрати паливних ресурсів

керівник роботи: к.т.н., доцент Ярош Тетяна Петрівназатверджено 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 питань, які потрібно розробити)

1. Теплові особливості процесу виробництва залізородних 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

Технологічна схема. Технологічні параметри зон випалювальної машини. Потенційна економія палива за рахунок впровадження енергозберігаючих заходів. Теплотехнічна оцінка роботи випалювальних машин. Вплив ширини випалювальних візків машини на електричні витрати. Порівняння енерговитрат агрегатів різних поколінь.

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 проєктованого 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	24.06.2026

Дата видачі завдання « 19 » 02 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Ілля СТАХЄСВ
(підпис)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Тетяна ЯРОШ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему: «Розробка технології виробництва 5,2 млн. т/рік залізорудних окатишів основністю 0,75 із застосуванням технічних рішень щодо зменшення витрати паливних ресурсів»: 62 стор., 14 табл., 6 рис., 22 літературних джерела.

Об'єкт дослідження: теплові схеми випалювальних конвеєрних машин для виробництва залізорудних окатишів.

Предмет дослідження: вплив елементів теплової схеми випалювальної машини на техніко-економічні показники виробництва окатишів.

Метою роботи є комплексне дослідження теплотехнічних і фізико-хімічних процесів випалювання окатишів для створення енергоефективних схем теплової роботи випалювальних машин конвеєрного типу.

Результати роботи: проведено аналіз сучасних теплових схем та режимів термообробки залізорудних окатишів на конвеєрних машинах. Розглянуто вплив п'ятизонної структури обпалювання на формування металургійних властивостей продукції та зміну її міцнісних характеристик. Визначено, що перехід до машин четвертого покоління у поєднанні з використанням інноваційних вогнетривів дозволяє суттєво оптимізувати сумарну енергоємність процесу.

ВИПАЛЮВАЛЬНА КОНВЕЄРНА МАШИНА, ЗАЛІЗОРУДНІ
ОКАТИШІ, ТЕПЛОВА СХЕМА, РЕЦИРКУЛЯЦІЯ ГАЗІВ,
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПИТОМА ВИТРАТА ПАЛИВА.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.Р					
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ					
Розробив	Стахеев							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-05.ПЗ	Пояснювальна записка	62				
	3								
	4			Графічна частина					
	5			(Презентація)					
Справ. №	6	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-05.01	Технологічна схема	1				
	7	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-05.02	Технологічні параметри зон					
	8			випалювальної машини	1				
	9	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-05.03	Потенційна економія палива за рахунок					
	10			впровадження енергозберігаючих заходів	1				
	11	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-05.04	Теплотехнічна оцінка роботи					
	12			випалювальних машин	1				
	13	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-05.05	Вплив ширини випалювальних					
	14		візків машини на електричні витрати	1					
Подп. и дата	15	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-05.06	Порівняння енерговитрат					
	16			агрегатів різних поколінь					
	17								
	18								
Инв. № дубл.	19								
	20								
	21								
Взам. инв. №	22								
	23								
	24								
Подп. и дата	<h3 style="margin: 0;">КНУ.РБ.136.26.114с-05.В0</h3>								
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Инв. № подл.	Разраб.	Стахєєв			Відомість об'єму матеріалів кваліфікаційної роботи Чертеж общего вида	Лист	Лист	Листов	
	Пров.	Ярош				р	д	1	1
	Н.контр.	Ярош				кафедра МЧМ/ЛВ група ЗМТ-22-1			
	Утв.	Бабашко							
Копировал					Формат А4				

ЗМІСТ

	Стор.
РЕФЕРАТ.....	4
ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ.....	5
ВСТУП.....	8
1 ТЕПЛОВІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ	10
1.1 Термообробка окатишів на випалювальній машині	10
1.2 Теплова схема і газохідна система	18
1.3 Тепловий баланс процесу термообробки окатишів	22
2 РОЗРАХУНОК ВИТРАТИ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ	34
2.1 Визначення питомої витрати матеріалів, що входять до складу шихти	34
2.2 Визначення розрахункового хімічного складу готових окатишів	38
3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ	44
4 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	48
4.1 Визначення годинної потужності комплексу з виробництва окатишів	48
4.2 Визначення погодинної потреби в сировинних компонентах шихти	48
4.3 Визначення необхідної кількості бункерів для вихідних шихтових матеріалів	49
4.4 Визначення потреби в обладнанні для дроблення та подрібнення	50

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.3			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив	Стахєєв						1	2
Перевірив	Ярош							
Рецензент								
Н. контр.	Ярош					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Затвердив	Бабошко							

4.5 Розрахунок та підбір устаткування для термічної обробки сирих окатишів	51
4.6 Визначення необхідної кількості огрудкувачів	53
4.7 Підсумкові показники роботи проектного комплексу з виробництва окатишів	55
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.3	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

ВСТУП

Розробка технічних рішень щодо зменшення витрати паливно-енергетичних ресурсів при виробництві окатишів зумовлена критичною необхідністю зниження собівартості продукції в умовах стрімкого зростання цін на енергоносії. Сучасне виробництво залізородних окатишів залишається одним із найбільш енергомістких етапів металургійного циклу, де витрати на природний газ та електроенергію складають значну частку кінцевої вартості окатишів.

Впровадження технологій введення внутрішнього твердого палива безпосередньо в шихту дозволяє інтенсифікувати процес випалу та забезпечити рівномірне прогрівання шару, що суттєво знижує питому витрату газу на пальникових пристроях.

Використання альтернативних сполучних матеріалів, таких як гашене вапно, сприяє зниженню температури інтенсивного шлакоутворення, що дає змогу оптимізувати режими термообробки та зменшити енергоємність процесу. Крім того, зниження питомих енерговитрат безпосередньо сприяє декарбонізації виробництва, що відповідає критеріям «зеленої металургії» та міжнародним екологічним стандартам щодо скорочення викидів парникових газів (CO₂)/

Суттєвий потенціал енергозбереження полягає у глибокій модернізації теплової схеми випалювальної машини, зокрема через впровадження систем рекуперації та рециркуляції високотемпературних потоків. Оптимізація схеми перетоків повітря між зонами охолодження та випалу дозволяє максимально використовувати фізичне тепло розпечених окатишів для підігріву дуття. Встановлення сучасних пальників із можливістю ступеневого спалювання палива забезпечує більш гнучке регулювання температурного профілю в зонах

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.ВС					
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП					
Розробив	Стахеев							Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош								1	2
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош									
Затвердив	Бабошко									

термообробки. Додаткове впровадження системи автоматизованого контролю за розрідженням під колосниковими решітками мінімізує підсоси холодного атмосферного повітря, що запобігає непродуктивним втратам тепла.

Ефективним рішенням є також використання футерувальних матеріалів із низькою теплопровідністю, що знижує втрати енергії через корпус машини в навколишнє середовище. Перерозподіл теплових навантажень між секціями випалювальної машини сприяє стабілізації процесу зміцнення окатишів по всій висоті шару. У комплексі ці заходи дозволяють не лише скоротити питому витрату газу, а й підвищити загальний тепловий коефіцієнт корисної дії агрегату на 5-8%.

Таким чином, удосконалення теплової схеми стає фундаментом для переходу до енергоефективного виробництва залізорудної сировини.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.ВС	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

1 ТЕПЛОВІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

1.1 Термообробка окатишів на випалювальній машині

На підприємствах гірничо-збагачувального комплексу виготовлення залізорудних окатишів реалізується через послідовне виконання трьох ключових етапів. Перший етап передбачає підготовку компонентів шихти, до складу якої входять залізорудний концентрат, сполучна речовина (бентоніт) і флюсові добавки (вапняк). Другим етапом є формування сирих гранул (огрудкування), а заключним – їхнє високотемпературне зміцнення у випалювальних агрегатах (рис. 1.1).

Основним обладнанням для термічного зміцнення продукції є випалювальні машини конвеєрного типу, які забезпечують безперервний цикл, що включає сушіння, нагрів, безпосередньо випалювання та подальше охолодження з рекуперацією тепла.

Процес починається з подачі сирих гранул на укладальник, який рівномірно розподіляє їх по ширині живильника, паралельно відсіваючи некондиційні фракції перед завантаженням на обпалювальні візки, що вже мають захисний шар донної та бортової постелі з випаленого матеріалу.

Термічне зміцнення окатишів належить до найбільш критичних етапів виробничого циклу. Головним завданням цієї стадії є формування готової продукції, що має високу механічну міцність та оптимальні металургійні властивості, необхідні для доменної плавки. Крім того, випалені окатиші повинні зберігати цілісність під час тривалого зберігання та багаторазового перевантаження.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ТЕПЛОВІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив	Стахеев						1.1	24
Перевірив	Ярош					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Рецензент								
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							



Рисунок 1.1 – Схема виробництва окатишів з термообробкою у цеху випалу

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Структурно технологічна площа конвеєрної машини розподілена на функціональні зони: сушіння (ЗС), підігріву (ЗПН), безпосередньо випалу (ЗВ), а також рекуперації (ЗР) та охолодження (ЗО). Складна теплотехнічна схема випалювальної машини включає пальникові пристрої горна, систему колекторів для циркуляції газів між зонами, а також розгалужену мережу газоповітряних трактів і вакуум-камер.

Розглянемо більш детально кожен з цих зон:

1. Зона сушки

Це початковий етап термообробки, де відбувається видалення зовнішньої та гігроскопічної вологи з сирих окатишів.

Зона сушіння є критично важливим етапом, оскільки саме тут закладається структурна цілісність окатишів перед впливом екстремальних температур. Основне завдання цієї зони полягає у видаленні вологи, об'ємна частка якої в сирих гранулах зазвичай становить 8–10 %. Процес організований таким чином, щоб нагрівання відбувалося поступово, оскільки занадто інтенсивне випаровування створює внутрішній тиск пари, що призводить до руйнування («шокового» розтріскування) матеріалу.

Для забезпечення ефективного вологовидалення на сучасних випалювальних машинах зону сушіння поділяють на дві підзони: сушіння продувкою (знизу-вгору) та сушіння просочуванням (згори-вниз). У першій підзоні гарячий теплоносій проходить крізь колосникову решітку та шар постелі, що захищає металоконструкції візків від перегріву та перезволоження. Друга підзона забезпечує остаточне видалення залишків води з верхніх горизонтів шару, готуючи їх до зони підігріву.

Температурний режим у цій зоні зазвичай коливається в межах 250-350 °С, залежно від властивостей вжитого концентрату та сполучних добавок. Як теплоносій використовується відпрацьоване повітря з зон рекуперації та охолодження, що робить процес енергоефективним. Важливою умовою є підтримання оптимальної швидкості фільтрації газу, щоб запобігти випаданню

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конденсату («запотіванню») у нижніх шарах, що може спричинити втрату міцності сирих окатишів. Тому дуже важливо здійснювати постійний моніторинг температури відхідних газів, тому що якісна підготовка матеріалу в зоні сушіння мінімізує вихід дріб'язку (некондиційної фракції) на подальших етапах виробництва.

2. Зона підігріву

Зона попереднього нагріву виконує роль технологічного містка між сушінням та високотемпературним випалом, забезпечуючи плавний перехід до фазових перетворень. У цій зоні температура газового теплоносія суттєво підвищується, досягаючи значень 800-1050 °С.

Основне завдання етапу – завершити видалення фізично зв'язаної вологи та розпочати хімічну підготовку компонентів шихти. Саме тут відбувається дегідратація глинистих мінералів (зокрема бентоніту), що супроводжується перебудовою їхньої кристалічної решітки.

Одним із ключових процесів у ЗПН є інтенсивне окиснення магнетиту (Fe_3O_4) до гематиту (Fe_2O_3). Це екзотермічна реакція, яка супроводжується виділенням значної кількості власного тепла безпосередньо всередині окатиша, що дозволяє суттєво зекономити природний газ. Одночасно з окисненням розпочинається дисоціація карбонатних сполук, які додаються до складу шихти переважно у вигляді вапняку для отримання окатишів певної основності. Декарбонізація є енергоємним процесом і потребує стабільного підведення зовнішнього тепла.

Важливо, щоб швидкість нагріву в цій зоні була збалансованою: занадто швидкий підйом температури може призвести до оплавлення поверхні окатиша («заколювання»), що заблокує вихід газів із середини гранули. Газодинамічний режим у ЗПН налаштований на просочування гарячого теплоносія згори вниз крізь товщу матеріалу. Температура відхідних газів під колосниковою решіткою у цій зоні є критичним параметром для контролю завершеності реакцій окиснення.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зоні підігріву також починають формуватися перші міцнісні зв'язки між зернами рудного мінералу, що забезпечує структурну стійкість окатишів перед входом у зону випалу. Застосування в шихті флюсуючих добавок дозволяє змістити початок формування рідких фаз саме на цей етап, що сприяє ущільненню структури. Ефективність роботи ЗПН безпосередньо впливає на продуктивність усієї випалювальної машини, оскільки ступінь підготовки матеріалу визначає необхідний час перебування окатишів у зоні максимальних температур. Таким чином, зона підігріву є фундаментом для енергоефективного випалу та отримання якісної металургійної сировини.

3. Зона випалу

Зона високотемпературного випалу є центральним сегментом теплової схеми, де відбуваються вирішальні фізико-хімічні перетворення, що визначають кінцеву якість продукції. Температура газового теплоносія в цій зоні підтримується на максимальному рівні – від 1200 до 1350 °С, залежно від хімічного складу шихти. Основним процесом тут є завершення твердофазного спікання та інтенсивне формування розплаву (рідкої фази). Саме за рахунок появи рідкої фази відбувається стягування рудних зерен, заповнення мікропор та ущільнення структури окатиша.

У цій зоні остаточно формується мінералогічний склад готового продукту, де переважають кристали гематиту, зв'язані силікатною або ферито-кальцієвою зв'язкою. Важливу роль при цьому може відігравати введена в шихту внутрішня енергія (вуглець твердого палива), яка в умовах зони випалу вигоряє, створюючи додаткові мікроосередки тепла в центрі кожної гранули. Це дозволяє досягти рівномірного прогріву по всьому перетину окатиша, запобігаючи появі неміцних, «сирих» ядер.

Пальникові пристрої горна в цій зоні працюють з максимальною інтенсивністю, забезпечуючи необхідний тепловий потік для підтримки реакцій шлакоутворення. Газодинаміка ЗВ організована за принципом просочування гарячих продуктів згоряння згори вниз, що забезпечує інтенсивний теплообмін

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

між газом і нерухомим шаром матеріалу. Для захисту колосників від екстремальних температур використовується захисний шар – «постіль», яке приймає на себе основний тепловий удар.

Контроль температури в цій зоні є найсуворішим, оскільки перевищення критичної межі може призвести до масового оплавлення окатишів і утворення «гроздів» (спечених агломератів), що порушує газопроникність шару. Одночасно, недостатній нагрів призведе до отримання крихкої продукції, яка зруйнується при першому ж перевантаженні. Тривалість перебування матеріалу в ЗВ розраховується так, щоб забезпечити повну перекристалізацію рудного мінералу. Результатом проходження цієї зони є отримання високоміцного матеріалу з необхідним ступенем пористості, що є критичним для відновних процесів у доменній печі. Таким чином, зона випалу є технологічним серцем машини, де концентруються основні енерговитрати та формуються міцнісні властивості готової продукції.

4. Зона рекуперації

Зона рекуперації є технологічним продовженням випалу, але без прямого спалювання палива в пальниках. Її основне призначення – вирівнювання температурного профілю по всій висоті шару за рахунок використання акумульованого тепла. У цю зону подається гаряче повітря з першої секції зони охолодження, температура якого сягає 800-1000 °С. Це дозволяє нижнім шарам окатишів, які не встигли прогрітися в зоні випалу, досягти необхідної температури зміцнення.

Завдяки тривалій витримці при високих температурах у ЗР завершуються процеси кристалізації та стабілізується структура силікатної зв'язки. Такий підхід мінімізує термічні напруження в матеріалі, запобігаючи появі тріщин при подальшому різкому охолодженні. Крім того, зона рекуперації дозволяє суттєво економити природний газ, замінюючи дороге паливо фізичним теплом розпеченого продукту. Газодинаміка тут налаштована на просочування теплоносія згори вниз, що забезпечує «доварювання» придонного шару

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.6
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

окатишів. Правильна настройка довжини цієї зони критично важлива для отримання однорідної за міцністю партії продукції.

5. Зона охолодження

Зона охолодження замикає технологічний цикл, перетворюючи випалювальну машину на високоефективний теплообмінник. Головною метою цієї стадії є зниження температури окатишів з 1200 °С до прийнятних 100-150 °С для безпечного транспортування конвеєрами.

Процес реалізується шляхом інтенсивного продування атмосферного повітря крізь шар матеріалу знизу вгору. Саме тут відбувається наймасштабніша рекуперация енергії: повітря, проходячи крізь розпечені окатиші, нагрівається до високих температур і спрямовується в колектори вторинного повітря. Цей гарячий потік згодом використовується як підігріте дуття для пальників та як основний теплоносій у зонах сушіння та підігріву.

Ефективна робота ЗО дозволяє повернути у виробничий процес до 70% теплової енергії, витраченої на випалювання. Окрім енергетичного аспекту, швидкість охолодження впливає на фазовий склад окатишів; надто різке охолодження може спричинити крихкість гематитових зерен. Зона охолодження також виконує роль захисного бар'єра, запобігаючи виходу гарячого продукту на розвантажувальний вузол, що захищає механічне обладнання від теплового зносу. Таким чином, ЗО забезпечує не лише якість продукту, а й високі техніко-економічні показники всього підприємства.

Для систематизації описаних процесів наведено порівняльну таблицю 1.1. Вона відображає динаміку змін температури теплоносія, напрямок руху газів та ключові фізико-хімічні перетворення в кожній зоні випалювальної машини.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Технологічні параметри зон випалювальної машини

Зона	Температура теплоносія, °С	Напрямок руху газів	Основні процеси та перетворення
Сушіння (ЗС)	250 – 350	Реверсивний (вгору/вниз)	Видалення вільної вологи, запобігання розтріскуванню.
Підігріву (ЗПН)	800 – 1050	Згори вниз	Окиснення магнетиту (Fe_2O_3), декарбонізація вапняку.
Випалу (ЗВ)	1200 – 1350	Згори вниз	Максимальне зміцнення, формування рідкої фази, спікання зерен.
Рекуперації (ЗР)	800 – 1000	Згори вниз	Вирівнювання температур по висоті шару, «доварювання» нижніх шарів.
Охолодження (ЗО)	20 (вхід) – 1000 (вихід)	Знизу вгору	Охолодження продукту, нагрівання повітря для повернення в цикл (рекуперація).

Аналізуючи табл. 1.1, можна зробити такі висновки:

1) найвищий газодинамічний опір спостерігається в зонах випалу та рекуперації через високу в'язкість гарячих газів та початок оплавлення поверхні окатишів;

2) зона охолодження є «генератором» тепла для зон сушіння та підігріву, що дозволяє суттєво знизити питомі витрати природного газу;

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.8
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) напрямок руху газів «знизу вгору» в першій підзоні сушіння та зоні охолодження є критичним для захисту металевих колосників від перегріву та корозії.

Підсумовуючи аналіз режиму термообробки окатишів на випалювальних машинах, слід зазначити: якщо структура шару та подальший якісний прогрів закладаються в зоні сушіння, то металургійні властивості окатишів формуються в зоні нагріву, де активно розвиваються фізико-хімічні процеси. Випалювання, завершуючи процеси, що відбуваються в окатишах на основі рідкофазного спікання, остаточно фіксує фазовий склад, структуру та якість готового продукту.

1.2 Теплова схема і газохідна система

Теплова схема випалювального агрегату має гарантувати таку послідовність термічного впливу на шар, яка забезпечить максимально високі металургійні показники готової сировини. Поряд із цим, сучасні інженерні рішення в тепловій схемі спрямовані на оптимізацію техніко-економічної ефективності роботи машин та мінімізацію екологічного навантаження на довкілля.

Структурно теплова схема конвеєрної машини є поєднанням технологічного регламенту, теплотехнічного обладнання та розгалуженої мережі газоповітряних потоків (рис. 1.2).

Технологічна складова визначає специфіку температурної обробки окатишів у різних функціональних зонах, залежно від характеру фізико-хімічних перетворень, що в них відбуваються. Відповідно до регламенту, повний цикл термообробки охоплює п'ять зон, розглянутих раніше, в яких послідовно реалізуються процеси видалення вологи, перетворення магнетиту на гематит, дисоціація карбонатів, а також спікання та зміцнення структури гранул. Ефективність такої обробки підтверджується зміною характеристик матеріалу: якщо на початку процесу вміст закису заліза (FeO) становить 25–29% при

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

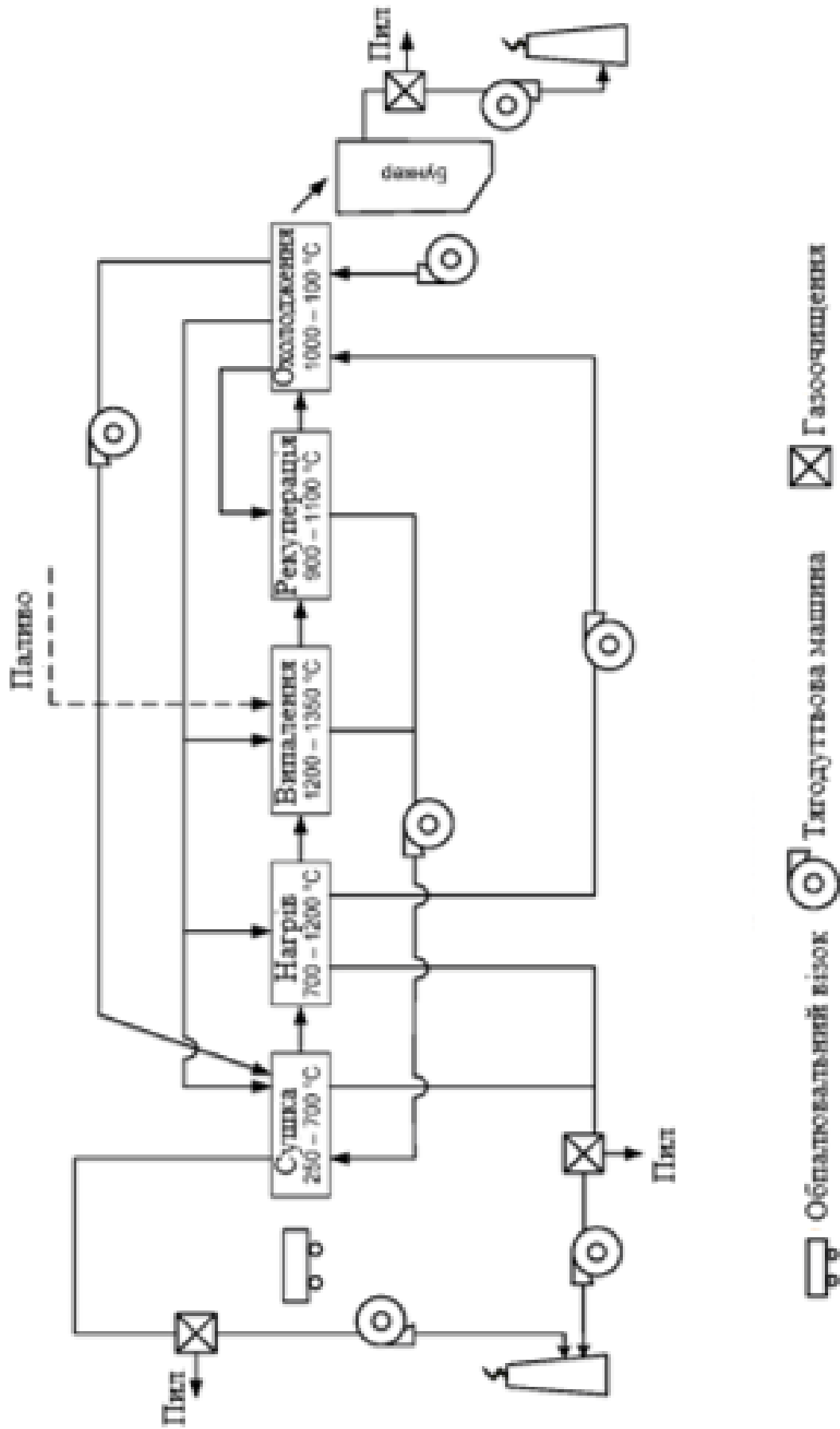


Рисунок 1.2 – Теплова схема випалювальної машини

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

міцності 10–15 Н/ок, то готова продукція на виході має лише 0,5–1,8% FeO, а її міцність на стискання зростає до 2-4 кН/ок.

Процес генерації тепла відбувається у пальникових пристроях, що розташовані по обидва боки горна. Використовується двостадійна схема спалювання палива у спеціалізованих камерах згоряння – форкамерах.

На початковому етапі паливо окиснюється в інжекційних або вихрових пальниках (залежно від їхньої конструкції). При цьому коефіцієнт витрати повітря становить менше 0,3 для першого типу та понад 1,2 – для другого.

На другій стадії здійснюється остаточне допалювання паливної суміші. Продукти згоряння змішуються з високотемпературним переточним повітрям, що дозволяє довести газовий потік до необхідної температури перед його подачею з форкамери безпосередньо в робочий простір горна.

У табл. 1.2 надано інформацію про обидва типу пальників.

Таким чином, можна зробити висновки, що:

- 1) вихрові пальники забезпечують вищу повноту згоряння палива, що критично важливо для зниження шкідливих викидів (CO);
- 2) інжекційні системи простіші в експлуатації, оскільки не потребують складних систем подачі вторинного повітря безпосередньо в пальник, проте вони менш гнучкі в регулюванні потужності;
- 3) вибір конкретного типу залежить від конструкції форкамери та необхідної температури газів на виході в робочий простір горна.

На випалювальних конвеєрних машинах застосовують два типи рециркуляції технологічних газів – внутрішню та зовнішню, що різняться за рівнем тепловмісту (ентальпії). Температурний режим зовнішньої рециркуляції обмежений можливостями тягодуттьових установок (ТДУ) і не перевищує 400 °С, тоді як теплоносій внутрішнього циклу прогрівається понад 900 °С.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.11
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз типів пальників для форкамер ОКМ

Характеристика	Інжекційні пальники	Вихрові пальники
Принцип роботи	Самостійне засмоктування повітря за рахунок енергії струменя газу.	Примусове подавання повітря з наданням йому обертального руху (турбулізації).
Коефіцієнт повітря (α_r)	Працюють з дефіцитом повітря ($\alpha_r < 0,3$).	Працюють з надлишком повітря ($\alpha_r > 1,2$).
Довжина факела	Довгий, розтягнутий факел.	Короткий, широкий та інтенсивний факел.
Змішування палива	Поступове, що забезпечує м'який прогрів.	Миттєве та якісне змішування завдяки завихренню.
Температурний профіль	Нижча пікова температура, рівномірний розподіл тепла.	Висока концентрація тепла в зоні горіння, швидкий вихід на режим.
Сфера застосування	Оптимальні для зон, де важливо уникати локального перегріву футеровки.	Найкращі для інтенсифікації обпалювання та роботи на великих швидкостях конвеєра.

Система внутрішніх перетоків забезпечує рух високотемпературного газу спеціальними колекторами із зони охолодження безпосередньо до зон нагрівання, випалювання та рекуперації. Цей процес відбувається самопливом завдяки різниці тиску в робочих зонах.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.12
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зовнішня рециркуляція реалізується через розгалужену мережу газоходів та збірних колекторів за допомогою димососів і вентиляторів. ТДУ відповідають за примусове транспортування газових потоків, їхню фільтрацію крізь шар окатишів у технологічних секціях та підтримання необхідного перепаду тиску над шаром.

Через постійне насичення циркулюючих газів продуктами горіння палива, оксидами азоту та сірки, а також водяною парою, що виділяється під час сушіння, організувати замкнений цикл неможливо. Для запобігання критичному накопиченню домішок частину відпрацьованих газів після обов'язкового очищення в пиловловлювачах скидають через димову трубу в атмосферу.

Ключові параметри термічного впливу на шар – гранична температура верхнього шару, мінімальна температура нижнього рівня, а також тривалість перебування матеріалу в цих умовах – наочно представлені на термограмах процесів сушки, підігріву та охолодження окатишів (рис. 1.3).

1.3 Тепловий баланс процесу термообробки окатишів

Тепловий баланс процесу термообробки окатишів на випалювальній машині визначає енергетичну ефективність обладнання та структуру витрат палива.

Прихід тепла складається з енергії, що виділяється при спалюванні природного газу в пальниках форкамер, та фізичного тепла нагрітого повітря, що повертається в цикл із зон охолодження (рекуперація). Важливим складником приходу є екзотермічні реакції окиснення магнетиту до гематиту, які можуть покривати до 20-30% загальної потреби в енергії. Також враховується фізичне тепло сирих окатишів та волога, що міститься в них.

Витрати тепла спрямовані на випаровування гігроскопічної та кристалізаційної вологи, а також на нагрівання матеріалу до температури спікання (1250-1320 °C). Значна частина енергії витрачається на ендотермічні процеси дисоціації карбонатів (вапняку) та розкладання інших домішок у

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.13
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

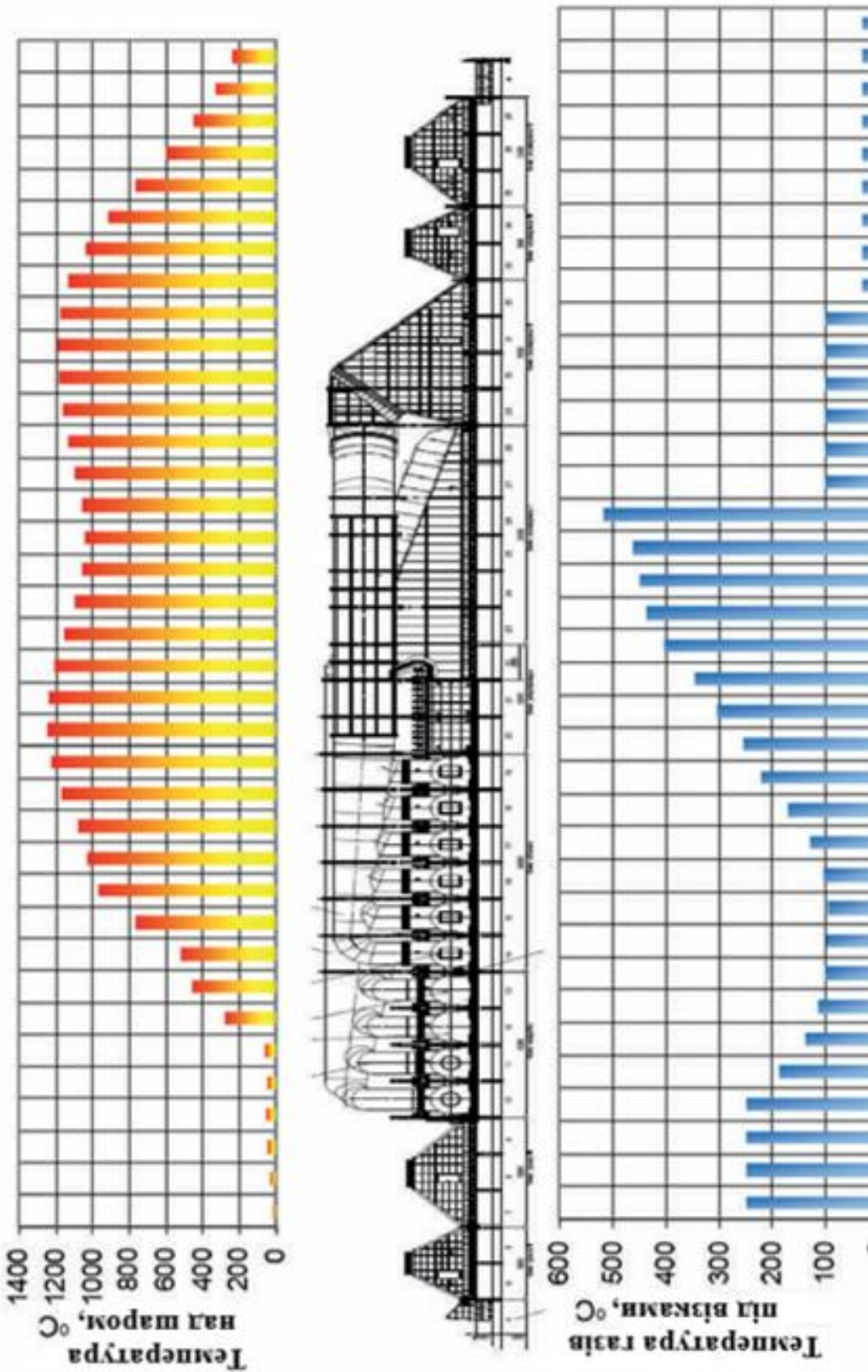


Рисунок 1.3 – Температура газів над шаром окатишів і під

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО

концентраті. Крім того, тепло витрачається на нагрівання технологічних газів, що проходять крізь шар і забезпечують теплообмін.

Втрати тепла охоплюють відхідні гази, що викидаються в димову трубу після зон сушіння та очищення, а також залишкове тепло готових окатишів на виході з машини. Неминучими є втрати через охолодження елементів конвеєрних візків (палет) та випромінювання тепла футеровкою горна в навколишнє середовище (рис. 1.4). Оптимізація балансу полягає у максимальному поверненні тепла від гарячих окатишів назад у технологічний цикл.

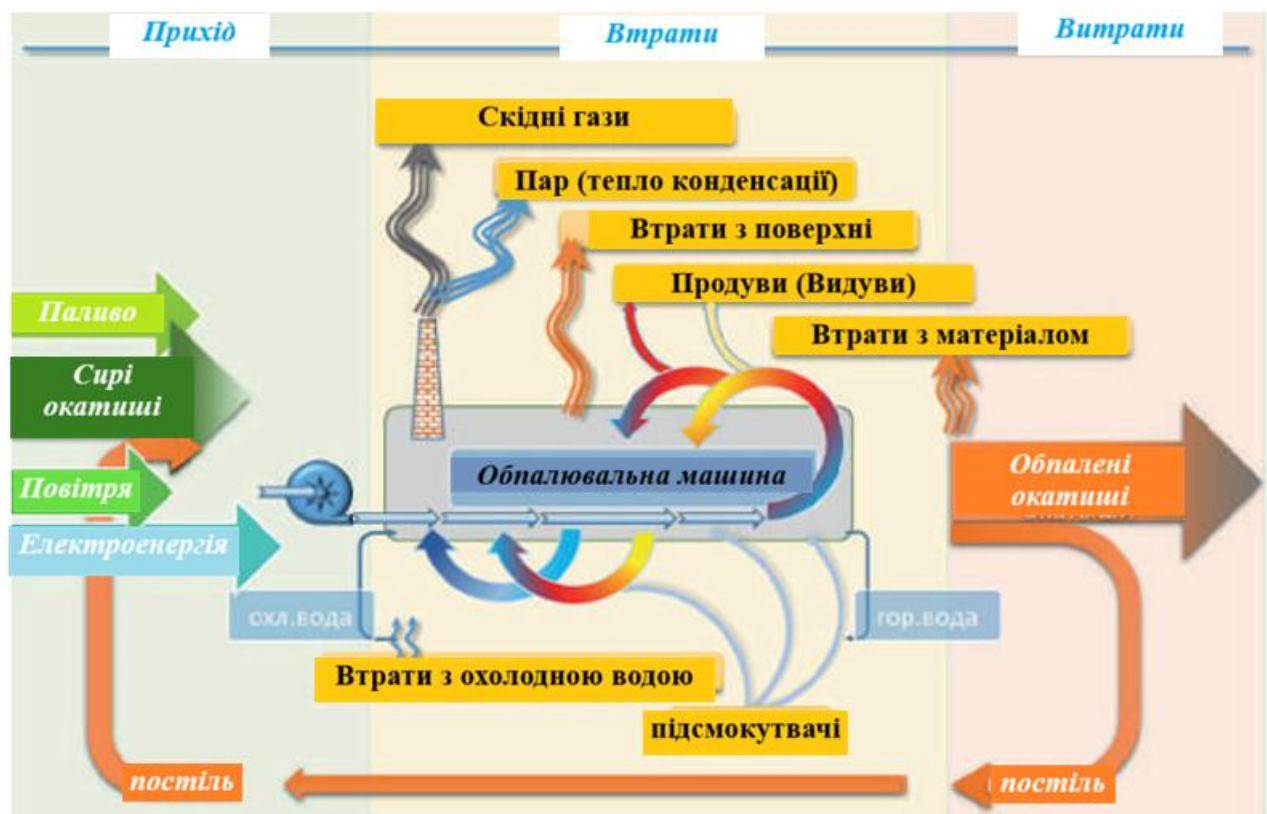


Рисунок 1.4 – Схема балансу теплоти на випалювальній машині

Статті тепловтрат випалювального агрегату охоплюють енергію, що розсіюється крізь футеровку (включаючи її теплову інерцію), виноситься охолоджувальною водою та втрачається внаслідок нещільностей газоповітряних

трактів. Крім того, енергетичні втрати зумовлені винесенням тепла з просипом матеріалу та елементами конвеєрних візків (палет).

Для оцінки ефективності використання енергоресурсів при термообробці окатишів на конвеєрній машині застосовують два ключові показники: коефіцієнт корисного тепловикористання ($\eta_{\text{ккт}}$) і коефіцієнт використання палива ($\eta_{\text{квп}}$).

Коефіцієнт корисного тепловикористання визначається як співвідношення корисно спожитої теплоти ($Q_{\text{кор}}$) до сумарно витраченої ($Q_{\text{витр}}$), що і є показником теплової ефективності.

Конфігурація газоповітряних потоків на випалювальній машині, окрім забезпечення окиснення палива, охолодження продукції та видалення відпрацьованих газів, виконує критичну функцію перерозподілу теплової енергії через системи внутрішньої та зовнішньої рециркуляції. Інтенсифікація повернення теплоносія в робочий цикл безпосередньо знижує обсяги викидів у димову трубу, зменшує енергетичні втрати та мінімізує питому витрату палива. Таким чином, вищий ступінь рециркуляції ($\eta_{\text{рец}}$) є головною ознакою технологічної досконалості та енергоефективності сучасної схеми газопотоків випалювальної машини.

У таблиці 1.3 систематизовано показники теплового балансу випалювальних агрегатів (у діапазоні значень), починаючи від устаткування першого покоління (машина ОК-108) і завершуючи сучасними машинами третього та четвертого поколінь (ОК-536 та ОКМ-592).

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.16
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.3 – Показники приходної та витратної частин теплового балансу випалювальних машин

Статті балансу	Позначення	Значення	
		МДж/т	%
Прихід тепла			
Паливо	Q_T	310-1190	35-71
Окатиші	Q_i	20-35	1,2-3,9
Повітря	Q_B	25-65	2,6-7,2
ФХП	$Q_{екз}$	370-490	23-54
Всього	$Q_{пр}$	800-1665	100
Витрата тепла			
Окатиші	Q_i	60-360	7-32
Відхідні гази	$Q_{вих}$	200-600	17-36
ФХП	$Q_{енд}$	230-350	21-39
Втрати	$Q_{вт}$	180-500	21-31
Всього	$Q_{рас}$	800-1665	100

1.4 Аналіз можливих способів зменшення витрати паливних ресурсів при виробництві залізородних окатишів

Розробка технічних рішень для зниження витрат палива у виробництві окатишів зосереджена на двох напрямках:

- 1) оптимізація теплової роботи випалювальної машини та
- 2) впровадження внутрішніх джерел енергії безпосередньо в шихту.

Додавання твердого палива (подрібненого антрациту або коксового дріб'язку) безпосередньо в склад шихти є одним із найефективніших методів зниження витрат природного газу. Це переносить джерело тепла з зовнішнього простору (горна) всередину кожного окремого окатиша.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.17
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При нагріванні шару окатишів до температури понад 800–900 °С частки вугілля всередині окатиша починають вигоряти. Це створює внутрішнє джерело тепла безпосередньо в зоні хімічних реакцій, що прискорює процес спікання та зміцнення матеріалу.

Як показує практичний досвід, кожен відсоток доданого вугілля дозволяє знизити витрату природного газу на 3-5 м³/т. При оптимальному вмісті твердого палива (близько 0,5–1,2% від маси шихти) можна досягти економії газу до 25-40%.

Крім того, оскільки тепло виділяється всередині окатиша, швидкість прогріву нижніх горизонтів шару значно зростає. Це дозволяє збільшити швидкість конвеєра та підняти продуктивність машини на 5-10%.

Проте, незважаючи на високу економічну ефективність, введення твердого палива (антрациту або коксу) безпосередньо в шихту має низку суттєвих технологічних та екологічних недоліків, серед яких можна назвати: збільшення пористості та зниження міцності; ризик відновлення заліза; екологічне навантаження (викиди сірки); складність дозування та змішування тощо. Тому він ідеально підходить для збільшення продуктивності, але потребує надточного лабораторного контролю за якістю вугілля та процесом огрудкування.

Зниження витрат палива при виробництві окатишів на випалювальних машинах можна досягти різними технічними заходами:

1. Впровадження двоступеневого спалювання з вихровими пальниками. Заміна застарілих інжекційних пальників на сучасні вихрові пристрої дозволяє розділити процес на дві стадії. На першій стадії паливо спалюється з високою інтенсивністю, а на другій – продукти згоряння змішуються з гарячим повітрям рекуперації. Це забезпечує майже 100% повноту згоряння газу (мінімізація хімічного недопалу) та дозволяє стабілізувати температуру в горні, що знижує загальну питому витрату газу на 10-15%.

2. Максимальне використання внутрішньої рециркуляції газів. Це один із найбільш дієвих способів, що базується на поверненні гарячих газів із зони

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.18
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

охолодження (з температурою 800-1000 °С) безпосередньо в зони нагріву та випалювання. Замість витрачання енергії палива на нагрівання холодного повітря, система переточних колекторів використовує фізичне тепло вже нагрітого теплоносія. Чим вищий ступінь рециркуляції, тим менше свіжого палива потрібно спалити для досягнення технологічних температур.

3. Підвищення газощільності (герметизації) агрегату. Несанкціоновані підсоси холодного атмосферного повітря через ущільнення палет знижують температуру технологічних газів і розбавляють їх. Для компенсації цього охолодження система автоматики змушена збільшувати подачу палива. Впровадження магнітних або вдосконалених пружинних ущільнень дозволяє підтримувати високий температурний потенціал газів і знижує витрату палива на 3-5%, паралельно зменшуючи навантаження на димососи.

Порівняльна таблиця 1.4 з розрахунками потенційної економії палива для кожного з наведених способів базуються на середніх показниках модернізації машин типу ОК-306 або Лургі-278 до рівня сучасних стандартів.

Найбільшу економію дає поєднання рециркуляції та вихрових пальників, оскільки вони дозволяють максимально замінити енергію газу фізичним теплом нагрітого повітря. При цьому слід зауважити, що при одночасному впровадженні кількох заходів загальна економія не є простою сумою відсотків, оскільки вони впливають на одні й ті самі складові теплового балансу. Реальний сумарний ефект модернізації зазвичай становить 25-35%.

Еволюція конструкційних рішень у випалювальних агрегатах сприяла поступовому зниженню енерговтрат із гарячою продукцією та відпрацьованими газами. Оптимізація герметичності машин та інтенсифікація охолодження шару й палет дозволили суттєво мінімізувати тепловий витік. Зменшення енергомісткості видаткової частини балансу закономірно призвело до скорочення потреби в енергії палива у прибутковій частині.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.19
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.4 – Потенційна економія палива за рахунок впровадження енергозберігаючих заходів

Спосіб оптимізації	Очікувана економія палива (газу), %	Очікуване зниження витрат (м ³ /т)	Додатковий ефект
Глибока рециркуляція газів	15 – 25%	4,0 – 7,0	Зменшення об'єму газів, що скидаються в трубу.
Вихрові пальники та форкамери	10 – 15%	2,5 – 4,5	Підвищення якості випалювання низу шару.
Підвищення газощільності (ущільнення)	3 – 5%	0,8 – 1,5	Зниження витрат електроенергії на 10-15%.
Оптимізація окиснення (екзотермія)	5 – 10%	1,2 – 2,5	Підвищення міцності готових окатишів.

Нині основна частка тепловтрат у структурі балансу все ще припадає на газові викиди та конструкційні недосконалості апаратів. Саме в утилізації потенціалу відхідних газів та вдосконаленні термоізоляції конструкцій криються головні резерви для подальшої економії палива. Підвищення частки рециркуляції газових потоків у поєднанні з використанням інноваційної вогнетривкої футеровки та теплоізоляції гарячих вузлів є ключовим шляхом до досягнення цільових показників енергоефективності.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.20
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльний аналіз різних моделей випалювальних машин як теплотехнічних комплексів представлений у табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Теплотехнічна оцінка роботи випалювальних машин

Тип машини	Показники			
	q, т/м ² ·год.	η _{ккт} , част.од.	η _{квп} , част.од.	K _п *
ОК-108	0,84	0,21	0,51	0,30
ОК-228	0,83	0,25	0,51	0,25
ОК-306	1,11	0,24	0,56	0,32
Лургі-480	0,87	0,27	0,49	0,22
ОК-520	1,15	0,33	0,58	0,25
ОК-536	0,96	0,36	0,57	0,20

K_п* - коефіцієнт втрат теплоти випалювальної машини

Очевидно, що в ході вдосконалення технологій спостерігається стабільне зростання показників теплової ефективності та одиничної продуктивності обладнання. Проте, зазначені теплотехнічні коефіцієнти не забезпечують вичерпної оцінки функціонування випалювальних агрегатів. Оскільки процес випалювання базується на споживанні не лише теплової енергії палива, а й значних обсягів електричної потужності, для комплексного аналізу витрат енергоресурсів цей фактор є обов'язковим для врахування.

Енергоспоживання випалювальної машини великою мірою залежить від потужності, яку використовують тягодуттьові установки. Прямий вплив на питому витрату електрики має рівень підсосів повітря в газохідну мережу агрегату. Обсяг цих підсосів крізь поздовжні та поперечні ущільнення корелює із шириною конвеєрних палет: стороннє повітря змішується з основним газовим потоком, що проходить крізь шар, збільшуючи загальне навантаження на тягодуттьові установки.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.21
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На графіку (рис. 1.5) відображено залежність частки підсосів та витрат електроенергії від ширини обпалювальних візків.

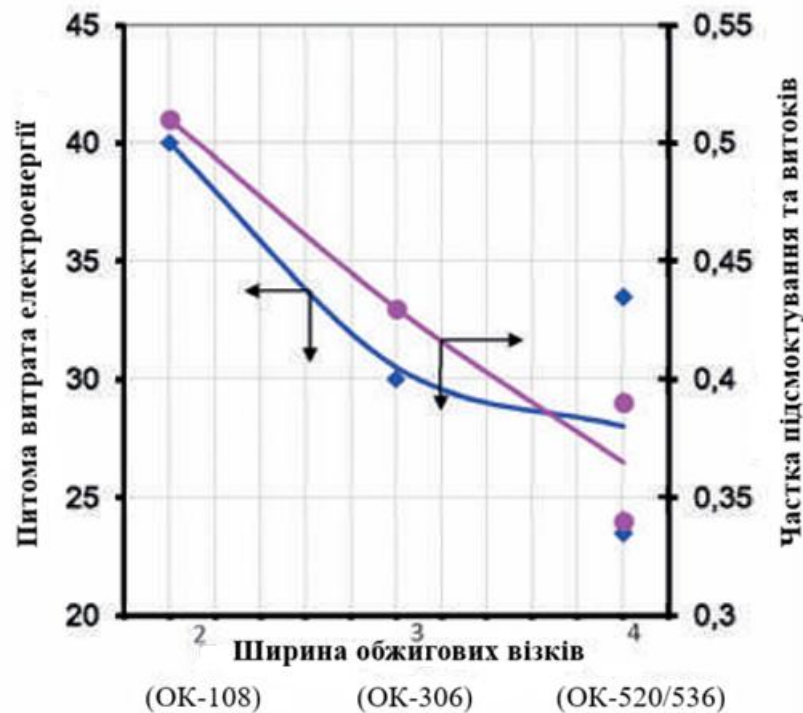


Рисунок 1.5 – Вплив ширини випалювальних візків машини на електричні витрати

Майже ідентичний вигляд кривих на графіку підтверджує: витрати електрики прямо залежать від того, наскільки герметична машина. Простіше кажучи, що більше повітря «підсмоктується» через щілини, то більше енергії витрачають вентилятори. Слід пам'ятати, що наведені дані враховують лише роботу двигунів цих вентиляторів і димососів.

Для розрахунку сумарних енерговитрат (E_{sum}) використовують поняття наскрізної енергоємності, де споживання електроенергії приводиться до паливного еквіваленту (умовного палива).

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.22

Сумарні витрати розраховуються за формулою:

$$E_{sum} = B_{gas} + (W_{el} \cdot k),$$

де B_{gas} – питома витрата палива (кг умовного палива на тонну окатишів, кг у.п./т.);

W_{el} – питома витрата електроенергії (кВт·год/т);

k – коефіцієнт переводу електроенергії в умовне паливо (в середньому 0,123 кг у.п. за 1 кВт·год).

Орієнтовні дані енерговитрат випалювальних машин різних поколінь приведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Порівняння енерговитрат агрегатів різних поколінь

Показник	ОК-108 (1-ше покоління)	ОК-536 (4-те покоління)
Витрати газу (м ³ /т)	28-32	16-19
Питоме паливо (B_{gas}), кг у.п./т.	~40	~24
Електроенергія (W_{el}), кВт·год.	35-45	28-32
Сумарні витрати (E_{sum}), кг у.п./т.	~45	~28

При застосуванні технічних рішень щодо зменшення витрати паливних ресурсів дуже важливо враховувати також електроенергію з декількох причин:

1. Навантаження на тягодуттвові пристрої: понад 80% електроенергії споживають димососи та вентилятори. Якщо збільшувати рециркуляцію для економії газу, опір шару зростає, що підвищує витрати електрики.

2. Газодинамічний опір: сучасні випалювальні машини (ОК-536) мають більшу площу, але завдяки оптимізації висоти шару та конструкції палет

вдається знизити витрати електроенергії на 20-30% порівняно зі старими зразками.

3. Економічний баланс: іноді надмірна економія газу призводить до такого зростання споживання електрики, що сумарна собівартість продукції зростає. Оптимальною є точка мінімуму сумарних енерговитрат.

Тому можна пропонувати при будівництві нових фабрик з виробництва окатишів або під час модернізації існуючих цехів перехід до машин 4-го покоління, який дозволяє знизити сумарну енергоємність майже в 1,6 раза, переважно за рахунок ефективної теплової схеми та зменшення обсягів газів, які потрібно перекачувати.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.01.ТОПВЗО	Аркуш
						1.24
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРАХУНОК ВИТРАТИ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ

2.1 Визначення питомої витрати матеріалів, що входять до складу шихти

Елементний склад досліджуваної сировини встановлювали за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрометра EXPERT 4L (рис. 2.1). Дослідний процес реалізовували в умовах лабораторії: попередньо підготовлені зразки розміщували у вимірювальному відсіку приладу для подальшого сканування.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вид рентгенофлуоресцентного аналізатора EXPERT 4L для визначення хімічного складу шихтових матеріалів

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО		
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Стахеев				Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош					2.1	10
Рецензент					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош						
Затвердив	Бабощко						
					РОЗРАХУНОК ВИТРАТИ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ		

Результати аналізу хімічного складу вихідних компонентів шихти наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Показники вмісту основних компонентів у складниках шихти

Матеріали	Вміст компонентів, %						
	Fe _{заг}	S _{заг}	P	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Залізорудний концентрат	68,5	0,04	-	28,0	66,75	2,8	0,2
Бентоніт	4,55	0,04	0,01	-	6,50	58,08	14,0
Вапняк	-	-	-	-	-	2,1	0,6

Продовження табл. 2.1

Вміст компонентів, %					
CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
0,15	0,01	-	0,1	1,99	-
4,5	2,3	0,02	0,1	3,0	11,5
53,0	1,5	-	-	0,3	42,5

Для визначення питомої витрати матеріалів, що входять до складу шихти, а також хімічного складу окатишів використовується спеціальна методика.

Рівняння матеріального балансу має вид:

$$G_o = P \cdot K_p + \Phi \cdot K_\Phi + B \cdot K_B + П \cdot K_\Pi \pm O_2,$$

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

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

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2.2

K_p, K_ϕ, K_b, K_π – коефіцієнти виходу випаленої маси з сухої маси відповідно рудного, флюсового, бентонітового і паливного 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.

Визначення питомого виходу готової (випаленої) маси щодо вихідної сухої маси для окремих складових шихти проводиться за такою залежністю:

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

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

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

Враховуючи прийняті параметри – 71% для видалення сірки та 100% для втрат при прожарюванні, отримуємо наступні результати:

$$K_p^0 = 0,01(100 - 0,71 \cdot 0,04 - 0) = 0,9997.$$

$$K_b^0 = 0,01(100 - 0,71 \cdot 0,04 - 11,5) = 0,8847.$$

$$K_\pi^0 = 0,01(100 - 0,71 \cdot 0 - 42,5) = 0,575.$$

Середня зміна маси шихти внаслідок окислювально-відновних реакцій оксидів заліза під час випалу окатишів:

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left(\frac{P \cdot FeO_p^0}{100} + \frac{\Phi \cdot FeO_\phi^0}{100} + \frac{\Pi \cdot FeO_\Pi^0}{100} + \frac{Б \cdot FeO_B^0}{100} - FeO_{a(0)}^0 \right), \text{ кг/т,}$$

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

Якщо прийняти вміст FeO в окатишах на рівні 1,2%, зміна маси шихтових матеріалів дорівнюватиме:

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left(\frac{P \cdot 28,0}{100} + \frac{\Phi \cdot 0}{100} + \frac{Б \cdot 0}{100} - 1,2 \right) = 0,0311 \cdot P - 0,1333.$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2.3

Складаємо рівняння матеріального балансу з урахуванням зміни маси під час термообробки на випалювальній машині:

$$1000 = 0,9997 \cdot P + 0,575 \cdot \Phi + 0,8847 \cdot B + 0,0311 \cdot P - 0,1333.$$

$$1000,1333 = 1,0308 \cdot P + 0,575 \cdot \Phi + 0,8847 \cdot B.$$

Вираз для обчислення основності з урахуванням головних основних і кислих оксидів шихтових матеріалів має вид:

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

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.

$$0,75 = \frac{(0,15 + 0,01) P_{\Sigma} + (53,0 + 1,5) \Phi_{\Sigma} + (4,5 + 2,3) B_{\Sigma}}{(2,8 + 0,2) P_{\Sigma} + (2,1 + 0,6) \Phi_{\Sigma} + (58,08 + 14,0) B_{\Sigma}}$$

$$2,09 P_{\Sigma} - 52,475 \Phi_{\Sigma} + 47,26 B_{\Sigma} = 0.$$

Розрахунок питомих витрат компонентів шихти базується на сумісному розв'язанні рівнянь матеріального балансу та заданої основності:

$$\begin{cases} 1000,1333 = 1,0308 \cdot P + 0,575 \cdot \Phi + 0,8847 \cdot B \\ 2,09 \cdot P - 52,475 \cdot \Phi + 47,26 \cdot B = 0. \end{cases}$$

У промисловій практиці виробництва залізорудних окатишів оптимальне дозування бентонітової глини зазвичай становить 0,7–1,0% від маси сухого концентрату. Даний діапазон є достатнім для більшості магнетитових концентратів, оскільки забезпечує необхідну пластичність шихти та механічну міцність сирих окатишів (на удар та стискання), не призводячи при цьому до суттєвого розубоження залізорудної сировини пустою породою бентоніту. Прийmemo витрату бентоніту 8,5 кг на 1000 кг окатишів.

$$\begin{cases} 1000,1333 = 1,0308 \cdot P + 0,575 \cdot \Phi + 0,8847 \cdot B \\ 2,09 \cdot P - 52,475 \cdot \Phi + 47,26 \cdot B = 0 \end{cases}$$

$$1000,1333 = 1,0308 \cdot P + 0,575 \cdot \Phi + 0,8847 \cdot 8,5.$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2.4

$$1,0308 \cdot P + 0,575 \cdot \Phi = 992,6134.$$

$$\begin{cases} 1,0308 \cdot P + 0,575 \cdot \Phi = 992,6134 \\ 52,475 \cdot \Phi - 2,09 \cdot P = 401,74 \end{cases}$$

Визначення питомої витрати кожного складника суміші (у сухому вигляді) проводиться з метою оптимізації розходу сировини та енергетичних витрат на термічну обробку. Дані показники відображають масове співвідношення компонентів шихти, яке гарантує досягнення заданої основності та необхідних металургійних властивостей кінцевого продукту:

$$P = 937,8484 \text{ кг/т};$$

$$\Phi = 45,0089 \text{ кг/т};$$

$$B = 8,5 \text{ кг/т}.$$

Загальна кількість сухих компонентів шихти – 991,3573 кг/т.

2.2 Визначення розрахункового хімічного складу готових окатишів

На основі встановлених питомих витрат компонентів шихти та їхніх індивідуальних характеристик виконано розрахунок хімічного складу готових окатишів. Даний етап дозволяє спрогнозувати вміст заліза, основних оксидів та шкідливих домішок у кінцевому продукті, що є критично важливим для оцінки його металургійної цінності та відповідності вимогам доменного виробництва.

Для формування розрахункового хімічного складу окатишів визначено сумарну масу оксидів та елементів, що вносяться в шихту разом із концентратом, бентонітом та флюсом:

$$Fe_{\text{заг}} = 937,8484 \cdot 0,685 + 45,0089 \cdot 0 + 8,5 \cdot 0,0455 = 642,813 \text{ кг};$$

$$S_{\text{заг}} = 937,8484 \cdot 0,0004 + 45,0089 \cdot 0 + 8,5 \cdot 0,0004 = 0,378 \text{ кг};$$

$$FeO = 937,8484 \cdot 0,28 + 45,0089 \cdot 0 + 8,5 \cdot 0 = 262,598 \text{ кг};$$

$$Fe_2O_3 = 937,8484 \cdot 0,6675 + 45,0089 \cdot 0 + 8,5 \cdot 0,065 = 626,566 \text{ кг};$$

$$SiO_2 = 937,8484 \cdot 0,028 + 45,0089 \cdot 0,021 + 8,5 \cdot 0,5808 = 32,142 \text{ кг};$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2.5

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 937,8484 \cdot 0,002 + 45,0089 \cdot 0,006 + 8,5 \cdot 0,14 = 3,336 \text{ кг};$$

$$\text{CaO} = 937,8484 \cdot 0,0015 + 45,0089 \cdot 0,53 + 8,5 \cdot 0,045 = 25,644 \text{ кг};$$

$$\text{MgO} = 937,8484 \cdot 0,0001 + 45,0089 \cdot 0,015 + 8,5 \cdot 0,023 = 0,964 \text{ кг};$$

$$\text{SO}_3 = 937,8484 \cdot 0,001 + 45,0089 \cdot 0 + 8,5 \cdot 0,001 = 0,946 \text{ кг};$$

$$\text{Інші} = 937,8484 \cdot 0,0199 + 45,0089 \cdot 0,003 + 8,5 \cdot 0,03 = 19,053 \text{ кг};$$

$$\text{ВПП} = 937,8484 \cdot 0 + 45,0089 \cdot 0,425 + 8,5 \cdot 0,115 = 20,106 \text{ кг}.$$

Аналіз надходження компонентів та зміна хімічного складу при випалюванні: при визначенні хімічного складу готової продукції враховується, що більшість оксидів та елементів (зокрема SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) є термічно стабільними й переходять із шихти в окатиші без зміни своєї маси. Водночас кінцевий вміст компонентів зазнає змін через процеси декарбонізації, видалення вологи та окислювально-відновних реакцій.

До елементів та сполук, маса яких змінюється в процесі термообробки, належать:

- сірка та вуглець – вигорають з утворенням газоподібних фаз;
- втрати при прокалюванні – зумовлені видаленням вологи та розкладом карбонатів;
- оксиди заліза (FeO) та (Fe_2O_3) – їхня маса змінюється внаслідок переходу закису заліза в оксид (окиснення магнетиту).

Розрахунок масової частки кожного компонента у випалених окатишах виконується за наступними формулами:

$$Fe_{зага(o)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot Fe_{P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Pi_{\Sigma}}^0 + Б_{\Sigma} \cdot Fe_{Б_{\Sigma}}^0}{G_{a(o)}}, \% \quad (2.8)$$

$$SiO_{2a(o)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot SiO_{2P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Pi_{\Sigma}}^0 + Б_{\Sigma} \cdot SiO_{2Б_{\Sigma}}^0}{G_{a(o)}}, \% \quad (2.9)$$

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

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2.6

У процесі термічної обробки окатишів відбувається зміна маси оксидів заліза внаслідок окислювально-відновних перетворень. Цей показник розраховується як різниця між вмістом FeO у вихідній шихті та його залишковою кількістю у випаленому продукті. Окиснення магнетиту супроводжується приростом маси за рахунок приєднання кисню (позначається знаком « \rightarrow » у розрахунках втрат), тоді як відновлення призводить до втрати кисню (позначається знаком « $+$ »).

$$G_{FeO} = G_{FeO_{ш}} - G_{FeO_{a(o)}}, \text{ кг/т аглом. (окат.)}; \quad (2.10)$$

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

$$G_{FeO} = 1000 \cdot 0,012 - 262,598 = -250,598 \text{ кг.}$$

Даний показник дозволяє розрахувати кількість новоутвореного оксиду заліза (III) внаслідок повного окиснення магнетиту або закису заліза шихти (позначається знаком « $+$ »). У випадку протікання відновних процесів, що супроводжуються зменшенням частки вищого оксиду, значення приймається зі знаком « \rightarrow ». Отримані дані дозволяють точно визначити фінальну масу залізородної фази в окатишах:

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

$$G_{Fe_2O_3} = \frac{250,598 \cdot 160}{144} = +278,442 \text{ кг.}$$

Усі результати обчислень для кожного компонента шихти систематизовано та занесено до балансової таблиці 2.2.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО	Аркуш
						2.7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Матеріальний баланс компонентів шихти та розрахунковий хімічний склад окатишів

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	68,5	642,426	0,04	0,375	28,0	262,598	66,75	626,014	2,8	26,260	0,2	1,876
Бентоніт	4,55	0,387	0,04	0,003	-	0	6,50	0,553	58,08	4,937	14,0	1,19
Вапняк	-	0	-	0	-	0	-	0	2,1	0,945	0,6	0,270
Всього шихти	64,84	642,813	0,04	0,378	26,49	262,598	63,20	626,566	3,24	32,142	0,34	3,336
Приріст (+) втрата (-) маси				-0,269		-250,598		+278,442				
Окатиші	64,38	642,813	0,01	0,109	1,20	12	90,64	905,008	3,22	32,142	0,33	3,336

Вим.

Арк.

№ докум.

Підпис

Дата

КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО

2.8

Архив

Продовження табл. 2.2

Вміст компонентів, %												Витрата сухих шихтових матеріалів, кг/т
CaO		MgO		P ₂ O ₅		SO ₃		Інші		ВПП		
%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	
0,15	1,407	0,01	0,094	-	0	0,1	0,938	1,99	18,663	-	0	937,8484
4,5	0,383	2,3	0,195	0,02	0,002	0,1	0,009	4,7	0,255	11,5	0,978	8,5
53,0	23,855	1,5	0,675	-	0	-	0	0,3	0,135	42,5	19,129	45,0089
2,59	25,644	0,10	0,964	0,00	0,002	0,10	0,946	1,92	19,053	2,03	20,106	991,3573
							-0,672				- 20,106	
2,57	25,644	0,10	0,964	-	0,002	0,03	0,274	1,91	19,053	-	-	998,424

Вим.

Арк.

№ докум.

Підпис

Дата

КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО

2.9

Архив

Підсумкові результати обчислень хімічних показників готової продукції представлені у вигляді зведеної характеристики складу окатишів (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розрахункова фізико-хімічна характеристика випалених окатишів

Компоненти	Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Вміст, %	64,38	0,01	1,20	90,64	3,22	0,33

Продовження табл. 2.3

Компоненти	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
Вміст, %	2,57	0,10	-	0,03	1,91	-

$$O_{CH} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{2,57 + 0,10}{3,22 + 0,33} = 0,75 \text{ част. од.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.02.РВШМВО	Аркуш
						2.10
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

Вибір та технічне обґрунтування схеми виробництва окускованих продуктів базуються на фізико-хімічних характеристиках вихідної сировини: мінералогічному складі, гранулометрії (крупності) та вологості компонентів. Ці параметри є визначальними для проектування стадій підготовки шихти до огрудкування. Подальші технологічні операції (змішування, формування окатишів, термообробка) обґрунтовуються на основі типових проектних рішень, апробованих на сучасних фабриках огрудкування.

Базові показники для розрахунку технологічних параметрів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні характеристики та питомі витрати вихідних матеріалів шихти

Компоненти шихти	Питомі витрати $M_{\text{сyx.}}$, кг/т окатишів	Вміст вологи, %	Крупність, мм
Залізорудний концентрат	937,8484	10,1	-0,055
Бентоніт	8,5	26,8	-100
Вапняк	45,0089	7,5	-100

- 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-05.03.ОПРТЛВО		
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Стахєєв				Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош					3.1	5
Рецензент					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош						
Затвердив	Бабошко						
					ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ		

5) Механічні втрати компонентів шихти в процесі виробництва окускованого матеріалу – 2,1%.

Для коректного дозування та налаштування ваговимірjuвального обладнання необхідно розрахувати фактичну масу вологих компонентів. Цей розрахунок базується на раніше визначених питомих витратах сухої маси, фактичній вологості сировини та коефіцієнті, що враховує неминучі механічні втрати матеріалів під час їхнього транспортування та перевантаження:

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

де W – вміст води в матеріалі, %.

Втр. – механічні втрати компонентів шихти, %.

Розрахункова наважка вологого залізородного концентрату: визначається як основний компонент шихти, що формує базис маси окатишів:

$$M_{\text{з.к.}} = \frac{937,8484 \cdot 10^4}{(100 - 10,1)(100 - 2,1)} = 1065,6 \text{ кг.}$$

Маса вологої бентонітової глини розраховується з урахуванням її високої гігроскопічності та ролі як зв'язуючої добавки:

$$M_{\text{б.}} = \frac{8,5 \cdot 10^4}{(100 - 26,8)(100 - 2,1)} = 11,9 \text{ кг.}$$

Маса флюсуєчого вапняку обчислюється для забезпечення заданого рівня основності готового продукту в умовах фактичної вологості флюсу:

$$M_{\text{в.}} = \frac{45,0089 \cdot 10^4}{(100 - 7,5)(100 - 2,1)} = 49,7 \text{ кг.}$$

Маса бентонітового зв'язуючого після стадії попередньої термообробки до залишкового вмісту води 12%. Цей показник характеризує проміжний стан матеріалу після первинного сушіння, що необхідно для стабілізації властивостей глини перед її подальшим транспортуванням та переробкою в системі підготовки шихти:

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.03.ОПРТЛВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3.2

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

$$M_{\text{б.підс.}} = 11,9 - 11,9 \cdot \frac{26,8 - 12}{100} = 10,1 \text{ кг.}$$

Кількість підготовленого бентоніту заданої дисперсності з цільовим рівнем вологості 4%. Дана величина відображає масу готового до дозування сполучного. Глибоке підсушування до 4% у поєднанні з подрібненням забезпечує рівномірний розподіл бентоніту в об'ємі концентрату та його максимальну поглинальну здатність під час змішування:

$$M_{\text{б.подр.}} = 10,1 - 10,1 \cdot \frac{12 - 4}{100} = 9,3 \text{ кг.}$$

Масова кількість флюсоуючої добавки (вапняку) після механічної дезінтеграції та сушіння до вологості 2,5%. Розрахунок маси вапняку з низьким вмістом води є критичним для забезпечення точності дозування СаО. Це дозволяє уникнути злипання дрібних фракцій флюсу та гарантує стабільну основність окатишів, що виготовлятимуться:

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

$$M_{\text{в.подр.}} = 49,7 - 49,7 \cdot \frac{7,5 - 2,5}{100} = 47,2 \text{ кг.}$$

Кількість зворотних сухих продуктів (відсіву), розрахована за математичною залежністю. Показник враховує частку дрібних фракцій та зруйнованих окатишів, які виділяються з технологічного потоку і повертаються на повторну переробку, що є важливим для розрахунку циркуляційного навантаження схеми:

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

де $M_{\text{ок}}$ – маса випалених окатишів, кг; Відсів – вихід відсівання, %.

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

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.03.ОПРТЛВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3.3

Загальна вага шихтових матеріалів з додаванням маси сухого повернення. Цей параметр визначає фактичне навантаження на змішувальне обладнання, оскільки до складу свіжої сировини додається сухий відсів, що безпосередньо впливає на підсумковий об'ємний баланс матеріалів:

$$M_{\text{вих.}} = 1065,6 + 9,3 + 47,2 + 10 = 1132,1 \text{ кг.}$$

Розрахунковий показник вологості багатокomпонентної шихти визначається на основі масових часток та індивідуальної вологості кожного складника (концентрату, бентоніту, флюсу). Він слугує базою для розрахунку додаткової кількості води, необхідної для процесу огрудкування та обчислюється за формулою:

$$W_{\text{сер.}} = W_1 \cdot \frac{M_1}{\sum M_i} + W_2 \cdot \frac{M_2}{\sum M_i} + W_3 \cdot \frac{M_3}{\sum M_i} + \dots + W_i \cdot \frac{M_i}{\sum M_i}, \quad (3.5)$$

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.

$$W_{\text{сер.}} = 10,1 \frac{1065,6}{1132,1} + 4 \frac{9,3}{1132,1} + 2,5 \frac{47,2}{1132,1} + 0 \frac{10}{1132,1} = 9,6\%.$$

Сумарна витрата матеріалу на стадію огрудкування, що включає масу кондиційної шихти та повернення сирих зруйнованих окатишів. При розрахунку враховується потік сирих окатишів, які не пройшли грохочення за крупністю або були відсіяні безпосередньо перед завантаженням на випалювальні візки. Це дозволяє точно визначити продуктивність пристроїв для огрудкування. Сумарна кількість матеріалу визначається за формулою:

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

де $B_{\text{с.ок.}}$ – частка вологого повернення при грохоченні та завантаженні сирих окатишів на випалювальну машину (% від маси).

$$M_{\text{ш.огр.}} = 1132,1 \left(1 + \frac{5}{100} \right) = 1188,7 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.03.ОПРТЛВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3.4

Кількість готової випаленої продукції на виході з агрегату з урахуванням маси захисної постелі та технологічного відсіву розраховується як сума маси кондиційних окатишів, циркулюючого шару постелі (яка захищає колосники) та дрібної фракції, що утворилася внаслідок термічних напружень під час випалу:

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

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

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

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.03.ОПРТЛВО	Аркуш
						3.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

4.1 Визначення годинної потужності комплексу з виробництва окатишів

На цьому етапі встановлюється фактична продуктивність цеху (т/год), яка є базовим показником для подальшого вибору потужності транспортних систем, змішувачів та випалювальних агрегатів:

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

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 добу».

$$P_o = \frac{5200000}{0,85 \cdot 365 \cdot 24} = 698,36 \text{ т/год.}$$

4.2 Визначення погодинної потреби в сировинних компонентах шихти

Розрахунок базується на питомих витратах кожного складника (у перерахунку на 1 тону готової продукції) та їхній вхідній вологості, значення яких були обґрунтовані в розділі 3. Це дозволяє встановити необхідний масовий потік вологого концентрату, бентоніту та флюсу для безперебійної роботи фабрики.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.04.ОВПОТО			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Стахеев				ОБРУНТУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						4.1	9
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

Формула для розрахунку:

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

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

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

$$P_{з.к.} = 698,36 \cdot 1,0656 = 744,17 \text{ т/год.}$$

$$P_{б.} = 698,36 \cdot 0,0119 = 8,31 \text{ т/год.}$$

$$P_{в.} = 698,36 \cdot 0,0497 = 34,71 \text{ т/год.}$$

4.3 Визначення необхідної кількості бункерів для вихідних шихтових матеріалів

Кількість бункерів визначається на основі максимального погодинного споживання сировини та встановленого нормативного запасу, необхідного для компенсації можливих перебоїв у постачанні:

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

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.

Методологічні принципи розрахунку:

Отримане розрахункове значення кількості бункерів округлюється до найближчого цілого числа в бік збільшення.

З огляду на необхідність забезпечення паралельної роботи двох технологічних потоків, фінальна кількість бункерів приймається парною.

$$n_{з.к.} = \frac{744,17 \cdot 10}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 19,6.$$

$$n_{б.} = \frac{8,31 \cdot 10}{0,93 \cdot 200 \cdot 0,85} = 0,5.$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.04.ОВПОТО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4.2

$$n_{в.} = \frac{34,71 \cdot 10}{1,51 \cdot 200 \cdot 0,85} = 1,4.$$

Прийняті проектні рішення щодо кількості бункерів:

- для залізорудного концентрату: зважаючи на великий об'єм основного компонента, приймаємо 20 бункерів;
- для бентоніту: виходячи з розрахункової потреби, приймаємо 2 бункери;
- для флюсу: для підтримання заданої основності шихти приймаємо 2 бункери.

4.4 Визначення потреби в обладнанні для дроблення та подрібнення

Підготовка шихти за фракційним складом здійснюється за допомогою дробарок та вентиляваних кульових млинів. У технологічній схемі виробництва окатишів також передбачено сушильний барабан: він необхідний для зниження вологості бентонітової глини з початкових 25–30 % до цільових 12-15 %.

Вибір конкретних агрегатів залежить від типу сировини та її характеристик:

- для крупних флюсів та палива (понад 10 мм) використовують молоткові дробарки ДМРИЭ-1450×1300, які забезпечують продуктивність на рівні 250 т/год.;

- для вологої бентонітової глини застосовують самоочисні молоткові дробарки СМД-102. Їхня потужність варіюється від 150 до 500 т/год, а на виході отримується матеріал фракцією 0-30 мм;

- тонке подрібнення шихтових матеріалів виконується у вентиляваних кульових млинах ШБМ-370/850, продуктивність яких становить 40-50 т/год.

Кількість дробарок і млинів розраховується за формулою:

$$n = \frac{P_{в.}}{q}, \quad (4.4)$$

$$n = \frac{P_{б.}}{q}, \quad (4.5)$$

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

q – продуктивність дробарки або млина, т/год.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.04.ОВПОТО	Аркуш
						4.3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Остаточне число дробильних та змелювальних агрегатів визначається шляхом округлення отриманих розрахункових значень до найближчого більшого цілого. З метою створення технічного резерву на період проведення планових ремонтів або технічного обслуговування, до отриманої кількості додається по одній одиниці обладнання кожного типу.

$$n_{\text{др.б.}} = \frac{8,31}{150} = 0,06.$$

$$n_{\text{др.в.}} = \frac{34,71}{250} = 0,14.$$

$$n_{\text{мл.б.}} = \frac{8,31}{50} = 0,17.$$

$$n_{\text{мл.ф.}} = \frac{34,71}{50} = 0,7.$$

Відповідно до зазначеного принципу, для технологічної лінії прийнято наступний склад обладнання:

- молоткові дробарки для бентоніту: 2 одиниці;
- молоткові дробарки для вапняку: 2 одиниці;
- кульові млини для бентоніту: 2 одиниці;
- кульові млини для вапняку: 2 одиниці.

4.5 Розрахунок та підбір устаткування для термічної обробки сирих окатишів

Основним агрегатом для зміцнення сирих окатишів є конвеєрна випалювальна машина. Її тип та необхідна кількість у складі цеху визначаються обсягами річної виробничої програми та показником питомої продуктивності на одиницю площі за годину роботи. При проектуванні дотримуються умови, що загальна кількість машин у корпусі має становити від 2 до 10 одиниць.

Ефективність роботи випалювальних машин безпосередньо корелює зі складом шихти, зокрема з вмістом флюсу та паливних складових. Встановлено, що додавання кожних 10 кілограмів флюсу на тонну шихти, призводить до зниження продуктивності агрегату на 0,83% (що еквівалентно 0,0079 т/м²·год).

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.04.ОВПОТО	Аркуш
						4.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі уточненого показника питомої продуктивності розраховують загальну необхідну площу зони термообробки за наступною формулою:

$$S_{\Sigma} = \frac{P_0}{q}, \text{ м}^2, \quad (4.6)$$

де P_0 – годинне виробництво окатишів цехом, т/год;

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

Показник питомої продуктивності випалювальної установки безпосередньо залежить від фізико-хімічних характеристик шихти, зокрема від ступеня її офлюсування. Згідно з технологічними розрахунками, при питомій витраті вапняку на рівні 49,7 кг на тонну готової продукції, прогнозована продуктивність конвеєрної машини становитиме $q = 0,9117$ т/(м²·год).

Така інтенсивність процесу термообробки зумовлена впливом карбонатів на кінетику зміцнення окатишів та тепловий баланс у зоні спікання. Дане значення питомої продуктивності є базовим параметром для подальшого визначення необхідної площі фільтрації та вибору типорозміру випалювальної машини (наприклад, серії ОК), що забезпечить виконання заданого плану річного випуску.

$$S_{\Sigma} = \frac{698,36}{0,9117} = 766 \text{ м}^2.$$

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що найбільш ефективним вибором для сучасного виробництва є обпалювальні машини четвертого покоління (типу ОКМ-520).

Такий вибір обґрунтований наступними перевагами:

1. П'ятизонна схема термообробки (сушіння, нагрів, випалювання, рекуперація, охолодження) забезпечує стабільно високу міцність окатишів (2-4 кН/окат) та низький вміст закису заліза.

2. Використання вихрових пальників та форкамер у поєднанні з глибокою рекуперацією тепла дозволяє знизити витрату газу на 15-20% порівняно з машинами попередніх поколінь.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.04.ОВПОТО	Аркуш
						4.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Сучасні машини мають збільшену ширину палет та вдосконалені ущільнення, що мінімізує підсоси повітря. Це дозволяє димососам працювати ефективніше, знижуючи питомі витрати електроенергії.

4. Високий ступінь рециркуляції газів не тільки економить паливо, але й значно зменшує обсяг шкідливих викидів в атмосферу через димову трубу.

Тому, незважаючи на високі капітальні інвестиції в машини нового покоління, вони окупаються за рахунок значного зниження сумарної енергоємності (паливо + електрика) на кожну тону готової продукції.

Кількість випалювальних машин розраховується за формулою:

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

де N_o – кількість машин;

S_M – корисна площа обраної машини, m^2 .

Результат обчислення кількості випалювальних агрегатів підлягає округленню до найближчого більшого цілого значення. Важливо зазначити, що встановлення додаткових резервних машин у цьому вузлі технологічної схеми не передбачається.

$$N_o = \frac{766}{520} = 1,5.$$

Відповідно до розрахунків, для забезпечення виробничої програми прийнято до встановлення 2 випалювальні машини.

Наступним етапом є визначення годинної продуктивності обладнання для термообробки залізородних окатишів:

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

$$P_M = 520 \cdot 0,9117 = 474,1 \text{ т/год.}$$

4.6 Визначення необхідної кількості огрудкувачів

Для формування сирих окатишів обрано чашеві огрудкувачі діаметром 7,5 м. Технічна продуктивність такого обладнання за придатним класом (фракція 8-18 мм) становить 100-120 т/год.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.04.ОВПОТО	Аркуш
						4.6
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формула для визначення необхідної кількості огрудкувачів має вид:

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

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 забезпечення безперебійної роботи однієї випалювальної машини враховуються такі чинники:

1. Матеріальний баланс. Для отримання 998,424 кг готової продукції витрачається 1127,2 кг вологих шихтових матеріалів. Коефіцієнт виходу 1 тони продукції розраховується як відношення маси готового продукту до маси шихти і становитиме:

$$K = \frac{998,424}{1127,2} = 0,886.$$

$$n_{\text{огр.}} = \frac{474,1}{0,886 \cdot 120} = 4,5.$$

2. Резервування. Розрахункове число агрегатів округляється у більшу сторону. Крім того, для підтримки стабільності процесу під час планових ремонтів чи обслуговування, передбачається одна додаткова одиниця обладнання (резерв).

Згідно з виконаними розрахунками, для кожної технологічної лінії прийнято 6 огрудкувачів.

Загальна кількість огрудкувачів:

$$n_{\Sigma \text{огр.}} = N_0 \cdot n_{\text{огр.}}, \quad (4.10)$$

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

N_0 – кількість випалювальних машин, 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-05.04.ОВПОТО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4.7

4.7 Підсумкові показники роботи проектного комплексу з виробництва окатишів

Таблиця 4.1 – Зведена відомість витрат сировинних матеріалів та компонентів шихти

Компоненти шихти	Питома витрата, кг/т окатишів	Годинна витрата, т/год	Добова витрата, т/добу	Річна витрата, т/рік
Залізорудний концентрат	1065,6	744,17	17860,08	5541089,82
Бентоніт	11,9	8,31	199,44	61876,26
Вапняк	49,7	34,71	833,04	258450,66
Разом вологої шихти	1127,2	787,19	18892,56	5861416,74

Таблиця 4.2 – Обсяги виробництва кондиційних окатишів

Продукція	Годинне виробництво, т/год.	Добове виробництво, т/добу	Річне виробництво, т/рік
Окатиші	698,36	16760,64	5199989

Таблиця 4.3 – Основне технологічне обладнання

Найменування обладнання	Кількість, шт.	Тип	Продуктивність, т/год.
Витратні бункери концентрату	20	200 м ³	-
Витратні бункери бентоніту	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 вентилявані млини	4	ШБМ-3700/850	50
Огрудкувачі	12	Чашові Ø 7,5 м	120
Випалювальні машини	2	520 м ²	-

Таблиця 4.4 – Фізико-хімічні показники якості випаленої продукції

Компоненти	Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Вміст, %	64,38	0,01	1,20	90,64	3,22	0,33

Продовження табл. 4.4

Компоненти	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
Вміст, %	2,57	0,10	-	0,03	1,91	-

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.04.ОВПОТО	Аркуш
						4.9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Формування якісних показників. Встановлено, що кінцеві металургійні властивості окатишів (міцність на стискання 2–4 кН/окат та вміст FeO 0,5–1,8%) критично залежать від температурно-часового режиму в зонах нагріву та випалювання, де завершуються процеси рідкофазного спікання та окиснення магнетиту.

2. Переваги модернізації пальникових систем. Порівняльний аналіз показав, що вихрові пальники з двоступеневою схемою спалювання є значно ефективнішими за інжекційні, оскільки вони забезпечують вищу повноту згоряння палива та дозволяють активніше підмішувати високотемпературний рекуперат, знижуючи питому витрату газу.

3. Роль вторинних енергоресурсів. Енергетична ефективність сучасних машин четвертого покоління (ОКМ-592) базується на глибокій рециркуляції газів, де теплоносій із температурою понад 900 °С повертається в цикл, що дозволяє замінити значну частину хімічної енергії палива фізичним теплом.

4. Вплив герметичності на енергоспоживання. Доведено пряму кореляцію між рівнем несанкціонованих підсосів повітря та витратами електроенергії на приводи тягодуттьових установок; мінімізація підсосів крізь ущільнення палет є ключовим інструментом зниження собівартості електроенергії.

5. Впровадження інноваційних матеріалів. Застосування монолітних вогнетривких бетонів та багатошарової ізоляції з керамічного волокна не лише знижує конструктивні втрати тепла в навколишнє середовище, а й зменшує теплову інерцію агрегату, полегшуючи перехід між різними режимами роботи.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.В		
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ Кафедра МЧМЛІВ гр. ЗМТ-22-1		
Розробив	Стахеев						
Перевірив	Ярош						
Рецензент							
Н. контр.	Ярош						
Затвердив	Бабощко				Літ.	Аркуш	Аркушів
						1	2

6. Екологічна трансформація. Оптимізація теплової схеми та збільшення ступеня рециркуляції дозволяють зменшити обсяг відпрацьованих газів, що скидаються через димову трубу, суттєво знижуючи викиди оксидів азоту та сірки.

7. Комплексний підхід до ефективності. Для повної оцінки роботи випалювальних машин конвеєрного типу необхідно використовувати показник сумарної енергоємності (паливо + електроенергія), оскільки лише мінімізація обох видів енергії гарантує найвищі техніко-економічні показники виробництва.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.В	Аркуш
						2
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 136 «Металургія» усіх форм навчання / С.Г. Савельєв, Л.Н. Саїтгарєєв, В.А. Чубенко, Т.П. Ярош, І.Е. Скідін, А.А. Хіноцька. Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2022. 32 с.

2. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Теорія і технологія процесів окускування» / уклад. С.Г. Савельєв, О.В. Бабаєвська. Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2023. 52 с.

3. <http://www.nbuv.gov.ua> (Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського).

4. 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.

5. Патент №93303 Україна. МПК F27B 21/00 Агломераційна конвеєрна машина / Рудь Ю.С., Кучер В.Г.; Власник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – u 2014 04257; заяв. 22.04.2014; опубл. 25.09.2014. - Бюл. № 18.

6. Основи металургії: виробництво чавуну: підручник / О. М. Смірнов, А.Ю. Семенко, Ю.П. Скоробагатько, М.С. Горюк. Одеса: Олді+, 2023. 192 с.

7. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський, С.Г. Грищенко, В.М. Шифрін. Київ: Вища школа, 2006. 503 с.

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

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

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.Л					
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ЛІТЕРАТУРА					
Розробив	Стахеєв							Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош								1	3
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош									
Затвердив	Бабошко									

10. Бережний М.М., Мовчан В.П. Збагачення та окускування сировини: монографія. Кривий Ріг: ЦГЗК, 2000. 368 с.
11. Білецький В.С., Смирнов В.О. Переробка і якість корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. 324. ISBN 966-7804-96-8.
12. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Т 32 Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина III. Заклучні процеси. Кривий Ріг: Криворізький національний університет. 2019. 230 с. ISBN 978-617-7553-97-6.
13. Русанов І.Ф., Петрушов С.М. Конструкції і обладнання агломераційних фабрик: навчальний посібник. Алчевськ: ДДТУ, 2010. 272 с.
14. 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.
15. Ліщинський Ігор Орестович. Агломераційні форми просторової організації виробництва в країнах Європи [Текст]: дис. ... канд. екон. наук: 08.00.02 / Ігор Орестович Ліщинський. Тернопіль: ТНЕУ, 2011. 247 с.
16. Металургійна галузь України: фактори зростання та напрями державного регулювання: монографія (2022). В.В. Венгер; НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України». Київ. V/ 324. URL: http://ief.org.ua/wpcontent/uploads/2022/06/Металургійна-галузь_України.pdf.
17. Техноекологія: підручник / за ред. М. С. Мальований. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2014. – 616 с.
18. Rudobashta S. P. (2010) Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 4, P. 753–759.
19. Mytrofanov O. Improvement of the control process of the heat treatment of iron ore pellets in the preheating area of the conveyor-type roasting machine. Technology audit and production reserves. 2020. № 6/1 (56). С. 34 – 39.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.Л	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

20. Pomerleau D., Desbiens A., Hodouin D. (2013) A first principle simulator of an iron oxide pellet induration furnace – an application to optimal. Canadian Metallurgical Quarterly. 44. P. 571–582.

21. ДСТУ 8811.0:2019 Руди залізні, концентрати, агломерати, окатки та брикети. Загальні вимоги до методів хімічного аналізування; прийнято від 15.07.2019 р.; дійсний з 01.07.2020 р; ДП «УкрНДНЦ». 11 с.

22. ДСТУ 8811.1:2018 Руди залізні, концентрати, агломерати, окатки та брикети. Метод визначення загального заліза; прийнято від 18.10.2018 р.; дійсний з 01.01.2019 р.; ДП «УкрНДНЦ». 12 с.

					КНУ.РБ.136.26.114с-05.Л	Аркуш
						3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		