

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

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

на тему: Дослідження впливу конструкції огрудкувача та режимів
огрудкування на показники агломерації

Виконав:

студент групи МТ-22-2

Владислав ЗВІРЯКА

Керівник випускної роботи

Володимир ПЛОТНИКОВ

Нормоконтролер

Володимир ПЛОТНИКОВ

Завідувач кафедри

Сергій САВЕЛЬЄВ

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

_____ Савельєв С.Г.

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до випускної атестаційної роботи бакалавра

Звіряки Владислава Сергійовича

1. Тема роботи: Дослідження впливу конструкції огрудкувача та режимів огрудкування на показники агломерації
затверджено наказом по КНУ від «__19__» ____ 02 ____ 2026 р. № 113с
2. Строк подання роботи студентом «__12__» ____ 03 ____ 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи:
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
теоретичний аналіз наукових джерел і формулювання завдань дослідження;
розроблення технологічних підходів до підвищення якості підготовки
шихтових матеріалів перед стадією агломерації; методологічні засади та
методи проведення досліджень; дослідження впливу комплексу
технологічних чинників на властивості агломераційної шихти; промислове
дослідження впливу конструктивних параметрів огрудкувача на ефективність
роботи агломераційних машин та обсяги виробництва агломерату на
аглофабриці.
5. Перелік графічного матеріалу: презентація (____ стор. формату А4)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	Загальна характеристика металургійного комбінату	січень 2026 р.
2	Теоретичний аналіз наукових джерел і формулювання завдань дослідження	лютий 2026 р.
3	Методологічні засади та методи проведення досліджень	лютий 2026 р.
4	Експериментально-дослідна частина	березень 2026 р.
5	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	березень 2026 р.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Владислав ЗВІРЯКА
(підпис)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Володимир ПЛОТНІКОВ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему:
Дослідження впливу конструкції огрудкувача та режимів огрудкування на показники
агломерації :114 с, 14 рис, 19 табл., 30 джерел.

Метою випускної роботи є дослідження впливу конструкції огрудкувача на
показники агломерації.

Дана робота містить розробку рішень по основним технологічним операціям
агломераційної фабрики, експериментальні дані впливу режимів та методів
огрудкування на показники аглопроцесу. В ній описані загальні вимоги до
сировини і готової продукції, визначені властивості агломерату при різних
підходах до огрудкування шихти.

Визначені техніко - економічні передумови застосування альтернативних
рішень щодо впровадження огрудкувачів не стандартних конструкцій.

АГЛОШИХТА, СПІКАННЯ, ПАЛИВО, ЗМІШУВАННЯ, ОГРУДКУВАННЯ,
ГОТОВИЙ АГЛОМЕРАТ, ОСНОВНІСТЬ АГЛОМЕРАТУ, ЯКІСТЬ
АГЛОМЕРАТУ.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.Р			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	РЕФЕРАТ			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв							
						Лімен	АнкVII	АнкVIII
							1	1
						MT-22-2		

[illegible]

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Загальна характеристика металургійного комбінату.....	10
1.1. Історичні аспекти становлення та етапи розвитку комбінату.....	10
1.2. Сировинна база агломераційного виробництва та її характеристика.....	14
2. Теоретичний аналіз наукових джерел і формулювання завдань дослідження.....	17
2.1. Теоретичні основи процесу огрудкування дисперсних матеріалів.....	17
2.2. Порівняльний аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду удосконалення технологій огрудкування.....	35
2.3. Оптимізація фізико-хімічних характеристик гранульованої агломераційної шихти як чинник підвищення ефективності агломераційного процесу.....	40
2.3.1. Фізико-хімічні закономірності перебігу агломераційного процесу в системі взаємодії рідкої та твердої фаз.....	40
2.3.2. Особливості огрудкування тонкодисперсних матеріалів у технологічних системах підготовки шихти.....	43
2.3.3. Трансформація гранулометричного складу агломераційної шихти в процесі спікання.....	46
2.3.4. Розроблення технологічних підходів до підвищення якості підготовки шихтових матеріалів перед стадією агломерації.....	53
3. Методологічні засади та методи проведення досліджень.....	62
3.1. Методика експериментального дослідження технологічних параметрів виробництва офлюсованого агломерату.....	62
3.2. Методичні підходи до визначення металургійних властивостей агломерату.....	66
4. Експериментально-дослідна частина.....	70
4.1. Дослідження впливу комплексу технологічних чинників на властивості агломераційної шихти.....	70
4.2. Промислове дослідження впливу конструктивних параметрів огрудкувача на ефективність роботи агломераційних машин та обсяги виробництва агломерату на аглофабриці.....	75
4.3. Узагальнення та інтерпретація отриманих експериментальних результатів.....	86

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.3			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	ЗМІСТ			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв				МТ-22-2			

4.4. Конструктивно-технологічні особливості пристрою для вібраційного огрудкування тонкоподрібнених залізрудних матеріалів.....	96
4.5. Аналіз результатів дослідження впливу технології грануляції на показники агломераційного процесу.....	104
Висновки.....	110
Список використаних джерел.....	112

ВСТУП

Подальший розвиток і технологічна інтенсифікація доменного виробництва безпосередньо пов'язані з підвищенням рівня підготовки залізорудної сировини, яка повинна відповідати комплексу суворих технологічних вимог. Насамперед така сировина має характеризуватися високою транспортабельністю та механічною стійкістю під час транспортування, перевантаження і тривалого складування, зберігаючи при цьому стабільність своїх фізичних і фізико-хімічних параметрів. Крім того, вона повинна бути достатньо міцною та структурно стабільною в умовах високотемпературного впливу і хіміко-термічних перетворень, що відбуваються під час відновлювальних процесів у доменній печі, забезпечуючи при цьому досягнення високих техніко-економічних показників процесу виплавки чавуну.

Одним із визначальних чинників формування високих металургійних властивостей підготовленої залізорудної сировини є сукупність фізико-хімічних характеристик компонентів агломераційної шихти, а також технологічні параметри та ефективність процесів її підготовки перед стадією спікання. На сучасному етапі розвитку агломераційного виробництва суттєвою особливістю є значне зростання частки тонкодисперсних залізорудних концентратів у складі шихтових матеріалів. За таких умов істотний вплив на якість кінцевого продукту — агломерату — а також на техніко-технологічні показники перебігу агломераційного процесу справляє ефективність попереднього формування гранульованої структури шихти.

Агломерація є одним із базових технологічних методів кускування дрібнодисперсної мінеральної сировини. Сутність цього процесу полягає в тому, що частинки шихтових матеріалів піддаються нагріванню за рахунок тепловиділення під час згоряння твердого палива до температур, за яких відбувається їх часткове плавлення або інтенсивне розм'якшення. Утворений унаслідок цього розплав, обволікаючи поверхню окремих зерен шихти,

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.ВС			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	ВСТУП			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв				МТ-22-2			

що не зазнали повного спікання, виконує роль зв'язувального середовища, яке забезпечує їх зчеплення та формування єдиної структурної системи. Подальше швидке охолодження призводить до кристалізації розплавленої фази та утворення агломераційного спека складного мінералогічного і хімічного складу. У результаті формується фіксована пориста структура матеріалу, що характеризується достатньою механічною міцністю та є придатною для ефективного використання в доменному плавленні.

Ефективність агломераційного процесу значною мірою визначається умовами фільтрації газоповітряного потоку крізь шар агломераційної шихти. Оптимальні значення швидкості фільтрації забезпечуються насамперед завдяки попередньому огрудкуванню шихтових компонентів перед стадією спікання. Разом із тим численні дослідження свідчать, що використання у складі шихти значних кількостей тонкоподрібнених залізорудних концентратів призводить до істотного зниження її газопроникності, що негативно позначається на стабільності перебігу агломераційного процесу та зумовлює погіршення його основних технологічних показників. За таких умов виникає необхідність застосування спеціальних технологічних заходів, спрямованих на оптимізацію гранулометричного складу агломераційної шихти перед процесом спікання.

Одним із найбільш ефективних методів вирішення зазначеної проблеми є попередня грануляція компонентів агломераційної шихти перед їх подачею на агломераційну машину. Цей процес значною мірою визначається фізико-хімічними властивостями вихідних матеріалів, а також конструктивними особливостями та технологічними параметрами роботи огрудкувального обладнання. Раціональна організація процесу грануляції дозволяє істотно поліпшити структурно-механічні характеристики шихти, підвищити її газопроникність і, відповідно, забезпечити більш стабільний та ефективний перебіг агломераційного процесу.

Саме на дослідження та вдосконалення фізико-механічних властивостей гранульованої агломераційної шихти, а також на підвищення ефективності її підготовки до спікання спрямовані наукові результати, викладені в даній роботі.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ

1.1. Історичні аспекти становлення та етапи розвитку комбінату.

Технологічна організація виробництва агломерату передбачає комплекс послідовних операцій, пов'язаних із прийманням, зберіганням, транспортуванням та підготовкою шихтових матеріалів до подальшого агломераційного спікання. Початковим етапом виробничого циклу є приймання та розвантаження вихідної сировини, яка надходить на підприємство різними видами транспорту.

Агломераційна руда після прибуття на підприємство піддається розвантаженню з подальшим направленням у приймальні бункери сумарною місткістю близько 2100 т. Вапняковий флюс та тверде паливо, що використовуються як складові компоненти агломераційної шихти, розміщуються на спеціалізованих складських майданчиках. Загальна місткість складів для зберігання вапняку становить приблизно 24 000 т, тоді як для твердого палива цей показник сягає 21 000 т.

Залізорудний концентрат надходить у шихтове відділення безпосередньо з рудозбагачувальної фабрики РЗФ-1, що забезпечує безперервність матеріального потоку та оптимізацію логістики постачання сировини в межах виробничого комплексу. Для приймання, накопичення та регулювання подачі компонентів шихти у шихтовому відділенні передбачена система бункерного господарства. Загальна місткість бункерів становить: для концентрату — 4160 т, для агломераційної руди — 2400 т, для вапняку — 1600 т, а для твердого палива — 640 т.

Транспортування сировинних матеріалів і підготовленої шихти між окремими технологічними ділянками виробництва здійснюється розгалуженою системою стрічкових конвеєрів. Загальна протяжність конвеєрних трактів, що забезпечують переміщення матеріальних потоків у межах агломераційного

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.01.ХК			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв							
					Лімен	АнкVIII	АнкVIIIІІ	
						1	7	
					MT-22-2			

виробництва, становить близько 27 000 м, що дозволяє забезпечити безперервність технологічного процесу та ефективну взаємодію всіх виробничих підрозділів.

Таблиця 1.1 – Продуктивність конвеєрних трактів.

Найменування конвеєрних трактів	Кількість конвеєрів, шт.	Продуктивність конвеєрних трактів (сумарна)
Потоки подачі шихти:		
Аглофабрика 1	2	800
Аглофабрика 2	2	800
Потоки подачі:		
Аглоруди	1	300
Вапняку	1	280
Палива	1	140
Концентрату	2	720

Таблиця 1.2 – Ємкість бункерів шихтового відділення

Найменування компонентів шихти	Число бункерів		Робоча ємкість одного потоку
	на одному потоці	всього	
Концентрат	5	20	2000
Аглоруда	2	8	400
Вапняк	2	8	400
Тверде паливо	2	8	175

Підготовка паливної складової агломераційної шихти передбачає стадію попереднього подрібнення твердого палива з метою досягнення регламентованого гранулометричного складу, необхідного для забезпечення стабільного теплового режиму процесу спікання. Зазначена операція реалізується у дробильному відділенні за допомогою семи чотиривалкових дробарок, кожна з яких характеризується номінальною продуктивністю близько 15 т/год. Використання багатовалкових дробильних агрегатів дозволяє не лише забезпечити інтенсивне руйнування частинок паливного матеріалу, а й сформувати оптимальний розподіл

фракцій, що, у свою чергу, позитивно впливає на рівномірність горіння палива у шарі агломераційної шихти та стабільність температурного профілю в зоні спікання.

Формування шихтової суміші здійснюється на основі високоточного дозування окремих компонентів, що забезпечується застосуванням спеціалізованих механізмів подачі та дозувального обладнання безперервної дії. Зокрема, подача залізорудного концентрату та агломераційної руди здійснюється за допомогою тарілчастих живильників з діаметром тарілки 2000 мм, розрахованих на продуктивність до 240 т/год. Такі пристрої забезпечують стабільність подачі сипких матеріалів та сприяють формуванню рівномірного матеріального потоку. Вапняк і тверде паливо вводяться до складу шихти за допомогою автоматичних дозаторів безперервної дії з номінальною продуктивністю відповідно 100 і 50 т/год, що дозволяє підтримувати задані пропорції компонентів та мінімізувати відхилення хімічного складу агломераційної суміші.

Важливим структуроутворювальним елементом агломераційної шихти є так зване гаряче повернення — фракція агломерату, що не відповідає вимогам за крупністю та повторно вводиться до складу шихти. Частка цього матеріалу становить у середньому 25–30 % від загальної маси шихтової суміші. Температура гарячого повернення коливається в інтервалі 600–700 °С, що суттєво впливає на тепловий стан шихти, сприяє частковому попередньому прогріванню її компонентів та інтенсифікує процеси гранулоутворення під час змішування.

Гомогенізація компонентів агломераційної шихти здійснюється у первинних барабанних змішувачах. На аглофабриці №1 застосовуються змішувачі розміром 3,2 × 8 м, тоді як на аглофабриці № 2 використовуються агрегати з геометричними параметрами 2,8 × 6 м. Частота обертання барабанів становить близько 6 об/хв, що створює оптимальні умови для інтенсивного перемішування матеріалу, рівномірного розподілу вологи та формування первинної гранульованої структури шихтової суміші.

Безпосереднє спікання підготовленої агломераційної шихти здійснюється на агломераційних машинах типу К-1-75, які належать до безперервно діючих стрічкових установок із розрідженням газового середовища під шаром матеріалу. Ініціювання процесу горіння паливної складової відбувається у зоні запалення, де використовується газова запалювальна установка (сурма), оснащена чотирма газовими пальниками. Загальна площа зони теплового впливу становить 15,2 м².

Для зовнішнього нагрівання поверхневого шару шихти застосовується багатокомпонентна газова суміш, що формується шляхом змішування природного, коксового та колошникового газів. Теплотворна здатність цієї суміші становить близько 3000 ккал/м³, тоді як її питома витрата становить приблизно 11 кг умовного газоподібного палива на 1 т виробленого агломерату. Подача повітря, необхідного для стабільного горіння газопаливної суміші, забезпечується вентиляторами типу ВВД-11.

Видалення продуктів згоряння та технологічних газів із шару шихти, що спікається, здійснюється за допомогою потужних ексгаустерів продуктивністю до 7500 м³/хв. Створюване ними розрідження забезпечує інтенсивну фільтрацію газового потоку крізь шар матеріалу, що є необхідною умовою ефективного перебігу агломераційного процесу.

Очищення газів, що відходять від агломераційної машини, здійснюється за двоступеневою схемою. На першій стадії реалізується грубе очищення у колекторі брудного газу, де відбувається осадження крупнодисперсних частинок пилу. Подальше, більш глибоке очищення здійснюється у батарейному мультициклоні, що складається з 486 циклонних елементів, які забезпечують ефективне вилучення дрібнодисперсних твердих частинок із газового потоку. Після очищення газу відводяться у атмосферу через димову трубу висотою 80 м, діаметр якої у гирлі становить 6,5 м.

Агломерат, що сходить з агломераційної стрічки, піддається подальшій механічній обробці, яка включає стадії дроблення та класифікації. Первинне дроблення здійснюється у двовалкових зубчастих дробарках, після чого матеріал

подається на стаціонарний грохот із розміром просіювальної поверхні 2840×4000 мм та щілинним отвором до 20 мм. У процесі грохочення відбувається відділення дрібної фракції, яка повертається до складу агломераційної шихти як оборотний матеріал.

Готовий товарний агломерат транспортується до складу агломерату за допомогою аглохоперів, де здійснюється його розвантаження у спеціалізовану траншею гарячого агломерату. Довжина цієї траншеї становить 340 м, і вона складається з 34 окремих комірок місткістю по 400 т кожна. Подальше навантаження агломерату споживачам здійснюється за допомогою чотирьох перевантажувачів, оснащених рудними грейферами вантажопідйомністю 30 т, при цьому їх середня продуктивність становить близько 500 т/год.

1.2. Сировинна база агломераційного виробництва та її характеристика.

Основним компонентом агломераційної шихти є залізорудний концентрат, що являє собою продукт мокрого магнітного збагачення залізистих кварцитів, отриманий на рудозбагачувальній фабриці РЗФ-1 Південного гірничо-збагачувального комбінату. Середній вміст загального заліза у концентраті становить $65,2 \pm 0,5$ %, тоді як вологість матеріалу перебуває на рівні $11,0 \pm 0,3$ %. Планова витрата концентрату у складі агломераційної шихти становить приблизно 740 кг на 1 т готового агломерату.

Додатковим залізовмісним компонентом шихти є агломераційна руда, що постачається підприємством ВАТ «Суша Балка». Вміст заліза у цій руді становить у середньому $57,0 \pm 3,0$ %. Концентрація діоксиду кремнію (SiO_2) не перевищує 20,1 % для руди шахти ім. Фрунзе та 23,0 % для руди шахти «Ювілейна». Вологість аглоруди, відповідно до технологічних вимог, не перевищує 5 %. Планова витрата цього матеріалу у складі шихти становить 221,51 кг на 1 т агломерату.

Флюсуючою складовою агломераційної суміші є вапняк. Масова частка оксиду кальцію (CaO) у цьому матеріалі становить не менше 52 %, тоді як вміст

діоксиду кремнію (SiO_2) обмежується значенням не більше 3 %. Планова витрата вапняку у шихті становить приблизно 265,53 кг на 1 т агломерату.

Паливну складову шихти формують дрібні фракції коксу — так звана коксова дрібниця, що постачається з підприємств Донецького кам'яновугільного басейну. Вміст зольних домішок у цьому матеріалі не перевищує 18 %, тоді як його вологість може досягати 24 %. Планова витрата коксової дрібниці становить близько 52 кг у натуральному вираженні на 1 т агломерату.

Крім того, у складі паливної складової використовується антрацитовий штиб марок АШ та АШС, що походить з родовищ Донецького басейну, а також продукції підприємства «Сибантрацит». Для цього матеріалу характерні такі параметри: вміст золи — не більше 18 %, вологість — до 9 %, а масова частка сірки — не більше 2 %. Планова витрата антрацитового штибу становить близько 38 кг на 1 т виробленого агломерату.

Основне технологічне устаткування

№ з/п	Найменування	Кількість, шт
1	2	3
1	Приймальні бункери руди - тарілчасті живильники ДТ-200	16шт.
2	Склад коксу - кран мостовий грейфер Q = 10т	3
3	Склад вапняку - кран мостовий грейфер Q = 15т	3
4	Корпус дроблення коксу - чотиривалкові дробарки Ø900×700	7
5	Відділення дозування - дозатори: концентрату – ДТ-200 - аглоруди – ДТ-200 - вапняку – 7422ДН 100-150-3 - твердого палива – 7422ДН 50-50-3	20 8 8 8
6	Спікальні фабрики - дозатори: повернення – ДТ-100 - шихти – ДТ-100 - барабанний змішувач Ø3,2×8 - Ø2,8×6 - барабанний огрудкувач Ø3,2×8 - машина агломераційна К-1-75 - аглоексгаустер –Д-6500-11-1	10 20 2 2 9 9 9

1	2	3
7	Склад агломерату - перевантажувачі рудних грейферів	4
8	Агловідстійники для вловлювання шламів власного виробництва - драглайн ЕО-5116	2

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.01.ХК	анк
	Анк	№ докум	підпис	дат		7

2. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ І ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Теоретичні основи процесу огрудкування дисперсних матеріалів.

У контексті сучасних уявлень про механізми формування гранульованої структури агломераційної шихти багатofракційна система сипких матеріалів розглядається як складна дисперсна суміш, у якій частинки різного гранулометричного складу виконують принципово відмінні функціональні ролі у процесі огрудкування. З позицій теорії грануляції така шихта умовно поділяється на дві взаємодіючі фракційні підсистеми — так звану огрудковану (зародкову) та огрудкувальну частини.

До огрудкованої складової відносять відносно крупні зерна матеріалу з характерним розміром у межах приблизно 2–10 мм, які виконують функцію центрів зародження гранул. Саме на поверхні цих частинок у процесі грануляції відбувається поступове нашарування дрібнодисперсної фракції. Огрудкувальна частина шихти представлена переважно ультрадисперсними частинками розміром менше 0,2–0,4 мм, які завдяки розвиненій питомій поверхні та наявності адсорбованої вологи здатні ефективно налипати на поверхню крупніших зерен, формуючи таким чином гранульовану структуру матеріалу.

Проміжна фракція з розміром частинок у діапазоні приблизно 0,4–2 мм, згідно з численними експериментальними дослідженнями, бере відносно обмежену участь у процесах гранулоутворення. Це пояснюється тим, що частинки зазначеного розміру є надто великими для ефективного налипання на поверхню зародкових центрів і водночас недостатньо крупними для виконання функції первинних ядер грануляції. Унаслідок цього їх роль у процесі огрудкування є переважно пасивною і зводиться до участі у формуванні проміжних структурних елементів гранули.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.02.ТА										
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ І ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ				Пімен		АнкVIII		АнкVIIIІв		
Розробл	Звіряка											1		45	
Перевір	Плотніков														
Н	Плотніков											МТ-22-2			
Затвер	Савельєв														

Кількісне співвідношення крупних зерен у складі агломераційної шихти суттєво впливає не стільки на кінцеві структурно-фізичні характеристики сформованого шару гранульованого матеріалу, зокрема його газопроникність, скільки на кінетичні параметри процесу грануляції. Зі збільшенням концентрації зародкових центрів у системі зростає сумарна площа поверхонь, доступних для адгезійного закріплення дрібнодисперсних частинок, що, у свою чергу, сприяє підвищенню швидкості огрудкування.

Здатність агломераційної шихти до гранулоутворення у науковій літературі зазвичай характеризується так званим коефіцієнтом швидкості грануляції, який визначається як відношення сумарної поверхні огрудкованих фракцій до об'єму огрудкувальної (дрібнодисперсної) частини матеріалу. У фізичному розумінні ця величина є обернено пропорційною середній товщині шару дрібних частинок, що нашаровується на поверхні зародкових зерен у процесі формування гранул.

Відповідно, зі зростанням значення коефіцієнта швидкості грануляції зменшується середня товщина адгезійного шару, який повинен бути сформований на поверхні зародкових частинок, що призводить до інтенсифікації процесу гранулоутворення та скорочення часу, необхідного для формування стабільної гранульованої структури агломераційної шихти.

Суттєвою особливістю процесу грануляції агломераційної шихти є те, що роль зародкових центрів у цьому випадку виконують попередньо наявні крупні частинки матеріалу — фрагменти зворотного агломерату або крупні зерна руди. На відміну від цього, у технології виробництва залізорудних окатишів процес формування гранул має інший механізм: первинні зародки утворюються безпосередньо у процесі огрудкування з тонкодисперсного матеріалу. У зв'язку з цим процес формування сирих окатишів зазвичай розглядається як послідовність трьох основних стадій: виникнення зародкових центрів, подальший ріст гранул за рахунок налипання частинок і, зрештою, масообмін між сформованими гранулами, що супроводжується їх ущільненням та перерозподілом матеріалу.

У процесі грануляції важливу роль відіграють механічні взаємодії між частинками матеріалу. Внаслідок багаторазових ударних і контактних взаємодій гранул між собою, а також із поверхнею робочих елементів обладнання (гарнісажем) і нерухомим шаром матеріалу, відбувається поступове ущільнення сформованих гранул. У ході цього процесу більш дрібні частинки переміщуються у міжзерновий простір між крупнішими фрагментами, що супроводжується витісненням надлишкової вологи на поверхню гранули.

Вивільнена таким чином волога утворює тонку рідинну плівку, яка сприяє адгезійному закріпленню нових частинок на поверхні гранули. У міру зближення зерен та ущільнення структури гранули товщина водної плівки поступово зменшується, тоді як сили зчеплення між частинками зростають. За певних умов, що визначаються співвідношенням між капілярними силами та динамічними механічними навантаженнями, досягається гранично допустима мінімальна товщина водних плівок. Після досягнення цієї межі подальше зростання гранули практично припиняється, а її механічна міцність досягає максимального значення.

Слід зазначити, що характер динамічних навантажень, які діють на гранули в процесі огрудкування, значною мірою залежить від конструктивних особливостей використовуваного обладнання. Зокрема, у чашових огрудкувачах інтенсивність динамічного впливу на частинки є вищою порівняно з барабанними агрегатами. Це пояснюється тим, що за відносно меншої довжини траєкторії перекочування гранул у чашових огрудкувачах відбувається більш інтенсивна ударна взаємодія між частинками.

Натомість у барабанних огрудкувачах умови грануляції є більш м'якими, що дозволяє ефективно переробляти шихтові суміші з підвищеною початковою вологістю, за якої стабільне формування гранул у чашових огрудкувачах є ускладненим або взагалі неможливим.

Найбільш сприятливим режимом роботи барабанного огрудкувача з точки зору формування стабільної гранульованої структури матеріалу є режим перекочування частинок. За такого режиму товщина шару матеріалу в барабані

поступово зменшується у напрямку від завантажувального торця до розвантажувального. Геометричне положення поверхні матеріалу в барабані характеризується кутом нахилу до горизонталі, який формується як сума кута нахилу осі барабана та кута між поверхнею шару матеріалу і твірною барабана.

Транспортування матеріалу вздовж осі барабана від завантажувальної до розвантажувальної частини здійснюється одночасно за рахунок двох механізмів: поступального переміщення масиву матеріалу по похилій площині та обертального руху частинок навколо умовної осі, яку у технологічній літературі інколи називають «віссю бруньки».

При цьому величина поступального зміщення матеріалу вздовж барабана за один його оберт, якщо не враховувати обертання навколо зазначеної осі, може бути оцінена співвідношенням, пропорційним добутку довжини кола барабана та тангенса кута нахилу шару матеріалу, що в узагальненому вигляді описується виразом

$2\pi R \cdot \tan \alpha$, де R — радіус барабана, а α — сумарний кут нахилу поверхні шару

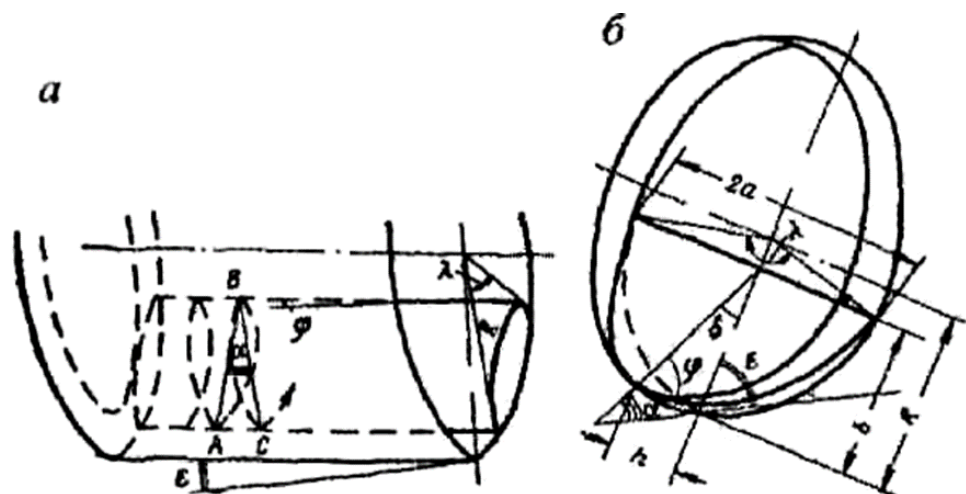


Рис. 2.1.1 Елементи об'єму матеріалу у барабанних (а) та чашевих (б) огрудкувачах:

λ, ϵ — відповідно кути центральний, між поверхнею барабану і твірною барабану, нахилу огрудкувача; R — радіус; h — висота борту; α, δ — відповідно кути нахилу поверхні матеріалу до горизонту, між поверхнею матеріалу та дном чаші; B — висота сегменту; $2a$ — довжина хорди

У процесі обертання барабанного огрудкувача кінематика переміщення частинок шихтового матеріалу визначається складною суперпозицією обертального та поступального рухів, зумовлених геометричними параметрами агрегату, режимом його роботи та характеристиками шару матеріалу. Під час руху по висхідній гілці траєкторії частинки шихти переміщуються у площині, що є перпендикулярною до твірної барабана, тоді як на низхідній ділянці траєкторії їх рух відбувається переважно у вертикальній площині. Така зміна напрямку переміщення частинок формує складний характер внутрішньосферного масопереносу та сприяє інтенсивному перерозподілу матеріалу в об'ємі грануляційної системи.

З урахуванням зазначених особливостей руху середній поступальний крок переміщення частинок шихти у напрямку розвантажувального торця за один оберт барабана може бути виражений аналітичною залежністю, що враховує геометричні та кінематичні параметри системи. У цій залежності використовуються такі величини: R — радіус барабана, м; λ — центральний кут, який відповідає сегменту кола, зайнятому шаром матеріалу, градуси; α — кут нахилу поверхні шару матеріалу відносно горизонтальної площини, градуси.

З позицій теорії грануляційних апаратів умовне передаточне число пари «барабан–матеріал», що характеризує співвідношення між швидкістю обертання барабана та ефективною швидкістю переміщення матеріалу, може бути виражене через параметр ступеня заповнення барабана матеріалом. Останній визначає гідродинамічний режим руху гранульованого середовища та суттєво впливає на характер контактних взаємодій між частинками.

Сумарне поступальне переміщення матеріалу вздовж осі барабана за один його оберт визначається сукупністю зазначених параметрів. Для подальшого аналітичного розгляду доцільно позначити вираз, що характеризує кінематичний вплив геометричних і технологічних параметрів процесу, символом N . У такому випадку час перебування матеріалу у барабані довжиною l , який обертається з

певною частотою n , визначається співвідношенням, що також враховує колову швидкість внутрішньої поверхні барабана w , м/хв.

Довжина траєкторії руху частинок у барабані, яка фактично характеризує інтенсивність процесу огрудкування і часто розглядається як так звана довжина шляху грануляції, визначається як добуток часу перебування матеріалу у барабані на середню швидкість його переміщення.

Варто зазначити, що час перебування матеріалу, розрахований на основі наведених кінематичних залежностей, як правило, дещо перевищує значення, отримане експериментальним шляхом за допомогою визначення об'єму матеріалу, що міститься у барабані, та його об'ємної продуктивності. Така різниця пояснюється тим, що у процесі огрудкування відбувається часткове розпушення шару матеріалу, внаслідок чого його фактичний об'єм зростає приблизно на 10 %. У зв'язку з цим для практичних розрахунків використовується уточнене співвідношення, у якому враховуються об'єм матеріалу у барабані V , м^3 , та його об'ємна продуктивність γ .

Експериментальні дослідження показують, що функціональна залежність між параметрами, які характеризують кінематику переміщення матеріалу, може з достатньою точністю апроксимуватися лінійною функцією. Це дозволяє використовувати спрощені аналітичні вирази для оцінювання довжини шляху огрудкування та часу перебування матеріалу в апараті.

Збільшення ступеня заповнення барабана до значень близько 0,15, що може бути досягнуто або шляхом зменшення його діаметра за незмінної продуктивності, або за рахунок підвищення продуктивності при сталому діаметрі, призводить до істотного зростання довжини шляху огрудкування. У свою чергу, це сприяє підвищенню механічної міцності сформованих гранул або окатишів. Однак при цьому спостерігається погіршення рівномірності їх гранулометричного складу, що пов'язано з інтенсифікацією процесів агломерації дрібних частинок і підвищенням ймовірності злипання гранул.

Подальше збільшення ступеня заповнення понад значення 0,15 вже не супроводжується суттєвим зростанням довжини шляху огрудкування. У зв'язку з цим у технологічній практиці оптимальним вважається ступінь заповнення барабанних огрудкувачів у межах 0,03–0,05. Максимально допустиме значення цього параметра при виробництві окатишів зазвичай знаходиться в інтервалі 0,10–0,15.

Ці значення відповідають певному допустимому навантаженню на поверхню огрудкування, яке становить приблизно $0,02\text{--}0,06 \text{ м}^3/\text{м}^2$, тоді як граничне значення цього показника може досягати близько $0,1 \text{ м}^3/\text{м}^2$.

Експериментальні результати також свідчать про те, що зі зростанням продуктивності барабанного огрудкувача довжина шляху огрудкування дещо зменшується. Така закономірність пояснюється протилежним впливом двох факторів: з одного боку, збільшення ступеня заповнення барабана сприяє зростанню довжини шляху грануляції, а з іншого — зміна кута нахилу поверхні шару матеріалу викликає протилежний ефект, що в сукупності призводить до часткової компенсації зазначених впливів.

При розрахунку повного часу перебування матеріалу та сумарної довжини шляху огрудкування у барабанному апараті необхідно також враховувати циркуляційне навантаження, пов'язане з багаторазовим поверненням частини матеріалу у процес грануляції.

У чашових огрудкувачах механіка руху окремої частинки, що знаходиться поблизу борту чаші, визначається дією тих самих основних сил, що й у барабанних апаратах, а саме сили тяжіння, відцентрової сили та сили тертя. До моменту відриву частинки від борту чаші ці сили перебувають у стані динамічної рівноваги. Відрив частинки відбувається у той момент, коли реакція борту стає рівною нулю.

Фізично це відповідає ситуації, коли проекція сили ваги частинки врівноважується сумою відцентрової сили та проекції сили тертя на напрямок радіуса чаші. У цей момент частинка втрачає контакт із бортом апарата і починає переміщуватися по поверхні дна чаші, здійснюючи перекочування у напрямку

нижньої частини грануляційної зони, що є важливим елементом механізму формування гранул у чашових огрудкувачах.

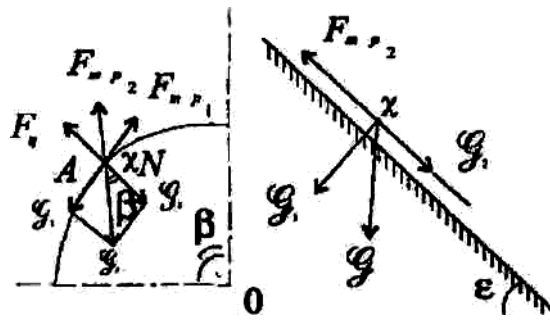


Рис. 2.1.2. Схема дії сил на обкотиші у чашовому огрудкувачі:

а — проекція зверху; б — проекція збоку

F_n — доцентрова сила; φ — сила ваги обкотиша;

φ_1 , φ_2 — проекція сили ваги відповідно на борт і дно чаші;

φ'_1 , φ'_2 — проекція проекцій сили ваги відповідно на радіус дна і дотичну до борту;

F_{np1} , F_{np2} — сили тертя обкотиша відповідно об борт та об дно;

β — кут відриву обкотиша від борту; ε — кут нахилу чаші;

x — обкотиш.

Траєкторія переміщення гранул у чашовому огрудкувачі має складний просторовий характер і, відповідно до результатів експериментальних спостережень та теоретичних узагальнень, може бути описана як своєрідна неправильна спіраль. Особливістю цієї спіралі є поступове віддалення її витків від поверхні дна апарата та одночасне зменшення їх довжини у напрямку до вершини траєкторії. Вершина такої спіралі, що звужується, локалізується поблизу борту чаші та розташовується у першому або четвертому квадранті залежно від напрямку обертання огрудкувача — відповідно проти або за годинниковою стрілкою.

Масив матеріалу, який перебуває у чашовому огрудкувачі та бере участь у процесі огрудкування, геометрично обмежений поверхнями дна та борту апарата і за своєю конфігурацією нагадує об'ємну циліндричну «підкову». Поперечний переріз цього шару є увігнутим у бік дна, що зумовлено поступовою зміною внутрішнього коефіцієнта тертя матеріалу в процесі грануляції — від первинної агломераційної шихти до сформованих окатишів. У низхідній ділянці траєкторії

руху матеріалу гранули притискаються до борту та дна чаші під дією відцентрових сил, унаслідок чого вони переміщуються по колу з кутовою швидкістю, практично рівною швидкості обертання самого огрудкувача.

Виходячи з умови нерозривності матеріального потоку, час перебування гранул у висхідній і низхідній гілках траєкторії повинен бути однаковим. Це положення лежить в основі математичного опису кінематики руху частинок у чашовому огрудкувачі та враховує такі параметри, як кут нахилу чаші до горизонту, кут відриву окатиша від борту, радіус чаші, частоту її обертання, а також коефіцієнт тертя матеріалу об гарнісажну поверхню дна.

Аналіз залежностей, отриманих у фундаментальних дослідженнях С. В. Базилевича, свідчить про те, що окатиші різної крупності, характеризуючись відмінними значеннями коефіцієнта тертя, за однакових зовнішніх умов рухаються по різних траєкторіях і відриваються від борту чаші при різних значеннях кута відриву. Із зростанням розміру гранул збільшується кут їх відриву від борту, що призводить до зменшення висоти підйому частинок у висхідній частині траєкторії. У результаті низхідна гілка траєкторії переміщується ближче до борту та зони розвантаження апарата.

Різниця у траєкторіях руху гранул різного розміру зумовлює природну класифікацію матеріалу у шарі. Найдрібніші частинки огрудкованої шихти першими потрапляють до борту та на поверхню дна чаші, формуючи нижній шар матеріалу. На них поступово нашаровуються гранули середнього розміру, тоді як найбільші окатиші концентруються у верхній частині шару. Надалі цей цикл повторюється: при досягненні критичного значення кута відриву від борту спочатку скочуються найбільші гранули, потім середні, а згодом — найдрібніші.

У міру зростання гранули її траєкторія поступово змінюється і набуває характеру неправильної спіральної лінії, в якій кожний наступний виток формується у площині, що поступово віддаляється від поверхні дна огрудкувача, тоді як низхідна гілка витка наближається до борту апарата. Такий характер руху

сприяє інтенсивному масообміну між частинками та забезпечує ефективне нашарування дрібнодисперсних фракцій на поверхню гранул.

Суттєвим параметром, що визначає гідродинамічний режим роботи чашового огрудкувача, є кут нахилу чаші відносно горизонтальної площини. Очевидно, що цей кут не може бути значно меншим за кут природного укоосу матеріалу, оскільки у такому випадку відбувається інтенсивне налипання шихти на поверхню дна, що ускладнює підтримання стабільної товщини гарнісажного шару. Водночас надмірне збільшення кута нахилу призводить до погіршення умов утримання гарнісажу на дні апарата, що може вимагати застосування спеціальної футерівки. З огляду на це оптимальним вважається такий кут нахилу чаші, який приблизно відповідає куту природного укоосу матеріалу.

Об'єм матеріалу, що перебуває у чашовому огрудкувачі, визначається геометричними параметрами апарата та кутом його нахилу. Для аналітичного опису цієї величини використовуються такі параметри: радіус чаші, центральний кут сегмента, зайнятого матеріалом, кут нахилу дна чаші, кут природного укоосу матеріалу, висота борту, висота сегмента матеріалу та половина хорди цього сегмента.

Залежність об'єму матеріалу у чашовому огрудкувачі від висоти борту за фіксованого кута нахилу є практично прямо пропорційною. Водночас висота борту не може перевищувати певного граничного значення, оскільки при цьому площа сегмента, зайнятого матеріалом, перевищуватиме половину площі дна чаші. За таких умов у низхідній частині траєкторії порушується ефективність класифікації гранул за крупністю та досягається гранично допустиме навантаження на поверхню огрудкування.

У промислових умовах для чашових і барабанних огрудкувачів характерне відносно стабільне питоме навантаження на поверхню огрудкування, яке зазвичай перебуває у межах $0,02\text{--}0,06\text{ м}^3/\text{м}^2$. Значення близько $0,1\text{ м}^3/\text{м}^2$ розглядається як граничне, перевищення якого може призвести до погіршення умов грануляції.

Експериментальні вимірювання показують, що під час зупинки огрудкувача з нього висипається приблизно 10–12 % матеріалу відносно його маси у стаціонарному стані. Це свідчить про певну динамічну нестабільність шару матеріалу у процесі обертання та підтверджує складний характер взаємодії гранул у грануляційній зоні.

Очевидно, що ефективність функціонування чашового огрудкувача безпосередньо залежить від ступеня використання його робочої поверхні. Найбільш сприятливим режимом роботи є такий, за якого дрібнодисперсні неогрудковані фракції шихти відриваються від борту чаші у його найвищій точці. Оскільки активна фаза процесу огрудкування відповідає періоду скочування матеріалу вниз по поверхні дна, то зі збільшенням кількості проходжень матеріалу через цю фазу за одиницю часу інтенсифікується ріст окатишів. Саме тому продуктивність огрудкувача знаходиться у прямій залежності від швидкості його обертання.

При цьому тривалість безпосереднього процесу росту гранул, тобто часу, необхідного для збільшення їх розміру від зародкових частинок до заданого діаметра становить приблизно половину загального часу перебування матеріалу в апараті. Останній визначається об'ємом матеріалу у чаші та її продуктивністю.

Згідно з умовою нерозривності потоку середня швидкість переміщення матеріалу в огрудкувачі дорівнює швидкості процесу огрудкування. Відповідно, довжина шляху грануляції становить приблизно половину від загальної довжини траєкторії, яку проходить матеріал протягом часу його перебування у чаші.

Зі збільшенням швидкості обертання чаші зростає відцентрова сила, що притискає гранули до борту апарата і тим самим ускладнює їх переміщення у низхідному напрямку. Для компенсації цього ефекту необхідно збільшувати кут нахилу чаші до горизонтальної площини. Це, у свою чергу, призводить до зростання швидкості скочування гранул вниз та інтенсифікації ударних взаємодій між ними і поверхнею борту.

У зв'язку з цим існує певне граничне значення кута нахилу чаші, перевищення якого перешкоджає формуванню окатишів більше визначеного розміру для даного типу матеріалу. При цьому максимальний допустимий кут нахилу чаші залежить від геометричних параметрів апарата і, як правило, зменшується зі збільшенням його діаметра.

Варто зазначити, що навіть за однакової довжини шляху огрудкування чашові та барабанні огрудкувачі можуть характеризуватися різною продуктивністю, що зумовлено відмінностями у здатності конкретної шихти до грануляції. У зв'язку з цим довжина шляху огрудкування може використовуватися як один із узагальнених критеріїв оцінювання конструктивних параметрів огрудкувачів.

Співвідношення між продуктивністю огрудкувача та довжиною шляху огрудкування, або обернена до нього величина, може служити інтегральною характеристикою здатності шихтового матеріалу до грануляції. Конструктивні параметри апарата – діаметр, висота борту, кут нахилу чаші та швидкість її обертання визначають ту довжину шляху огрудкування, яка може бути реалізована за умов ефективної класифікації гранул і допустимого навантаження на робочу поверхню.

При незмінній довжині шляху грануляції продуктивність огрудкувача буде тим вищою, чим більшою є здатність шихти до огрудкування. Ця здатність значною мірою визначається питомою поверхнею частинок матеріалу. Так, матеріали з питомою поверхнею менше приблизно $100 \text{ м}^2/\text{кг}$ і відповідною здатністю до огрудкування нижче $0,18 \text{ т}/(\text{г}\cdot\text{м})$ практично непридатні для виробництва окатишів.

Збільшення питомої поверхні шихти понад $200 \text{ м}^2/\text{кг}$ лише незначною мірою підвищує її здатність до грануляції. Інтервал значень питомої поверхні $100\text{--}130 \text{ м}^2/\text{кг}$, що відповідає здатності до огрудкування приблизно $0,15\text{--}0,25 \text{ т}/(\text{г}\cdot\text{м})$, розглядається як перехідна область між типовими агломераційними шихтами та матеріалами, придатними для ефективного виробництва окатишів.

Для шихт зі здатністю до огрудкування менше 0,18 т/(г·м) характерне утворення пухких, механічно слабких окатишів діаметром близько 5–8 мм. Натомість при значеннях цього показника понад 0,35 т/(г·м) формуються досить міцні, але неправильної форми гранули з нерівномірним гранулометричним складом. Крім того, такі окатиші характеризуються ускладненими умовами сушіння, що пов'язано з підвищеною щільністю їх структури та нерівномірністю розподілу вологи.

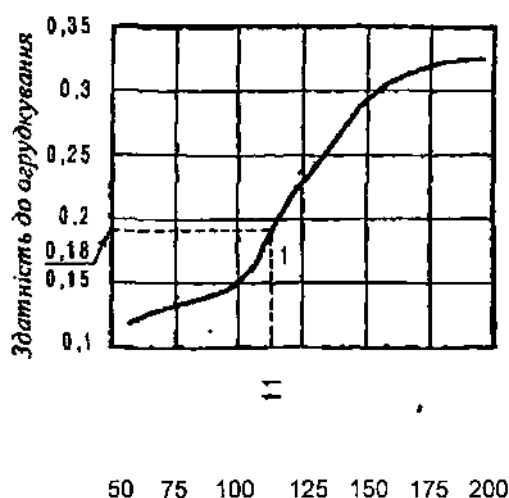


Рис. 2.1.3. Залежність здатності до огрудкування шихти від питомої поверхні:
1 – граничне значення, менше якого одержання обкотишів утруднене

Аналіз техніко-технологічних параметрів роботи грануляційного обладнання свідчить про суттєві відмінності між чашовими та барабанними огрудкувачами як за конструктивними особливостями, так і за показниками ефективності їх використання у процесі огрудкування залізорудних матеріалів. Зокрема, чашові огрудкувачі характеризуються вищою питомою продуктивністю відносно займаної виробничої площі. Для промислових агрегатів цей показник становить приблизно 1,137 т/(год·м²), тоді як для барабанних огрудкувачів він знаходиться на рівні близько 0,807 т/(год·м²). Таким чином, за умов обмеженого виробничого простору використання чашових огрудкувачів забезпечує більш ефективне використання площі грануляційної ділянки.

Крім того, конструктивна простота чашових огрудкувачів зумовлює відносно нижчу вартість їх виготовлення та експлуатації порівняно з барабанними агрегатами. Водночас особливості кінематики руху матеріалу в чашових апаратах обумовлюють більш інтенсивні динамічні навантаження на гранули у процесі їх формування. Завдяки цьому чашові огрудкувачі є більш придатними для переробки шихтових сумішей із відносно невисокою вологістю, оскільки підвищені механічні навантаження сприяють ущільненню структури сирих окатишів, що формуються за нижчих оптимальних значень вологості.

У випадку використання переволожених та важкофільтруємих залізрудних концентратів, навпаки, більш доцільним є застосування барабанних огрудкувачів. Це пояснюється тим, що такі апарати характеризуються меншою чутливістю до коливань фізико-механічних властивостей шихтових матеріалів і здатні забезпечувати стабільний перебіг процесу грануляції при більш високих оптимальних значеннях вологості шихти. Внаслідок цього барабанні огрудкувачі забезпечують більш стійку роботу за умов значних змін гранулометричного складу або вологості вихідного матеріалу.

Граничні розміри грануляційних агрегатів визначаються, зокрема, допустимими динамічними навантаженнями, які можуть діяти на сирі обкотиші без порушення їх структурної цілісності. У процесі огрудкування робота апарата може бути охарактеризована певною швидкістю передачі механічної енергії шихтовому матеріалу. Цей параметр залежить насамперед від ступеня заповнення робочого об'єму огрудкувача матеріалом, а також від швидкості його обертання.

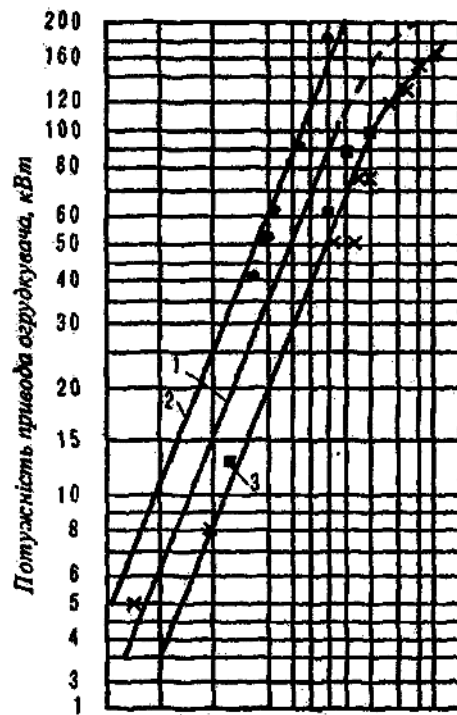
Зі збільшенням ступеня заповнення апарата матеріалом швидкість передачі енергії грануляційній системі, як правило, зменшується, що пояснюється зростанням внутрішнього тертя та обмеженням рухливості частинок у масиві матеріалу. Водночас підвищення діаметра огрудкувача та швидкості його обертання сприяє інтенсифікації енергетичного впливу на матеріал, що проявляється у збільшенні швидкості енерговіддачі гранулам.

У барабанних огрудкувачах швидкість передачі енергії матеріалу зазвичай є вищою, ніж у чашових агрегатах. Однак при цьому питомі витрати енергії, безпосередньо пов'язані з процесом огрудкування, у барабанних апаратах можуть бути у 2–3 рази меншими. Така особливість пояснюється тим, що у барабанних огрудкувачах реалізуються відносно м'якші режими механічної взаємодії між частинками, а відповідно нижчі динамічні навантаження на гранули.

Унаслідок більш інтенсивних ударно-контактних взаємодій у чашових огрудкувачах сформовані обкотиші, як правило, характеризуються більшою густиною та підвищеною механічною міцністю порівняно з гранулами, отриманими у барабанних апаратах. Це обумовлено більш ефективним ущільненням структури гранул у процесі їх багаторазових контактів із поверхнею апарата та між собою.

За однакових геометричних параметрів, зокрема, за рівних діаметрів чашових і барабанних огрудкувачів, питомі витрати електричної енергії на процес грануляції є приблизно однаковими. Це пояснюється тим, що барабанні огрудкувачі, незважаючи на більшу встановлену потужність приводу, характеризуються вищою продуктивністю.

Водночас при оцінюванні енергетичної ефективності барабанних огрудкувачів необхідно враховувати додаткові енергетичні витрати, пов'язані з роботою допоміжного обладнання. До такого обладнання належать приводи систем очищення внутрішньої поверхні барабана, віброгрохоти для класифікації матеріалу, а також транспортні конвеєри, що забезпечують циркуляційне повернення недогранульованих фракцій у технологічний цикл. Саме сукупність цих факторів визначає фактичні енергетичні показники роботи барабанних грануляційних агрегатів у промислових умовах. (рис. 2.1.4).



2 3 4 5 6 7 9 10

Рис. 2.1.4. Залежність потужності приводу огрудкувача від його діаметра:

X — для чашевих; • — для барабанних; ■ — для конусних огрудкувачів;

1 — узагальнена залежність; 2 — граничні значення для барабанних

огрудкувачів; 3 — для чатових огрудкувачів

Узагальнений аналіз експлуатаційних характеристик різних конструктивних типів огрудкувачів свідчить про те, що граничні значення колової швидкості їх робочих органів для широкого спектра огрудковуваних шихтових матеріалів перебувають у відносно вузькому інтервалі 2–3 м/с. Середньостатистична залежність величини колової швидкості чашових і барабанних огрудкувачів від геометричного параметра їх робочого простору діаметра апарата описується відповідним функціональним співвідношенням, де W характеризує колову швидкість, м/с, а D — діаметр огрудкувача, м.

Стійкість та відтворюваність процесу огрудкування значною мірою визначаються фізико-механічним станом внутрішньої робочої поверхні огрудкувача. З одного боку, ця поверхня повинна характеризуватися достатньо

високою жорсткістю та шорсткістю, що запобігає небажаному ковзанню шихтової маси, а з іншого — мати оптимально згладжений мікрорельєф, який забезпечує впорядкований режим перекочування гранул та мінімізує ризик руйнування або відривання ущільнених фрагментів шихти. Досягнення такого комплексу експлуатаційних характеристик забезпечується формуванням на робочій поверхні огрудкувача стабільного шару гарнісажу товщиною приблизно 15–20 мм, що утворюється з шихтового матеріалу за допомогою спеціалізованих технологічних пристроїв.

При виборі оптимального типу огрудкувального обладнання необхідно враховувати низку технологічних особливостей їх функціонування. Зокрема, чашові огрудкувачі у разі переробки однорідної за гранулометричним та мінералогічним складом шихти здатні забезпечувати формування обкотишів без застосування операцій грохотіння та рециркуляції матеріалу. Проте в цьому випадку технологічна схема повинна передбачати можливість повернення у вихідну шихту некондиційних гранул, що утворюються на стадіях пуску обладнання або під час порушення усталеного режиму огрудкування. Водночас забезпечення вузького гранулометричного інтервалу обкотишів більш ефективно реалізується у барабанних огрудкувачах, які працюють у замкненому технологічному циклі з грохотами. У таких умовах вміст фракції 10–15 мм у сирих обкотишах, отриманих у барабанних огрудкувачах, досягає 90–96 %, тоді як для чашових агрегатів цей показник, як правило, перебуває в межах 60–85 %.

Вібраційні грохоти, що використовуються для класифікації сирих обкотишів, функціонують при кутах нахилу робочої поверхні 15–25°, амплітуді коливань 4–6 мм та частоті 850–950 коливань за хвилину. Оптимальні значення цих параметрів визначаються експериментальним шляхом для кожного конкретного типу огрудковуваної шихти з урахуванням її гранулометричних та фізико-механічних властивостей.

За раціонально підібраних режимних характеристик у процесі роботи вібраційного грохота відбувається не лише ефективне відсівання дрібнодисперсної

фракції, але й додаткові структурні перетворення матеріалу: руйнування надмірно крупних та недостатньо міцних агломератів, а також зміцнення обкотишів кондиційної крупності внаслідок їх багаторазового перекочування. Стабільність роботи вібраційних грохотів забезпечується за умови рівномірного розподілу матеріального потоку по ширині просіювальної поверхні. Ефективність процесу грохотіння та довговічність сітчастих елементів значною мірою підвищується при використанні сит, виготовлених із нержавіючої сталі або еластомерних матеріалів, зокрема гуми.

Застосування чашових огрудкувачів у замкненому циклі з грохотами формує більш адаптивну технологічну систему, здатну ефективно функціонувати за умов варіативного складу вихідної сировини. Проте практичний досвід експлуатації таких комплексів свідчить про те, що використання вібраційних грохотів після чашових огрудкувачів не усуває необхідності попередньої підготовки шихти до процесу огрудкування. Хоча грохоти сприяють стабілізації якісних показників сирих обкотишів — зокрема їх міцності та гранулометричного складу, — у разі невідповідності властивостей шихти технологічним вимогам ефективність їх роботи істотно знижується. У таких випадках спостерігається налипання матеріалу на робочі поверхні, інтенсивне руйнування гранул та суттєве зменшення продуктивності вузла «огрудкувач–грохот».

У сучасній практиці дедалі ширшого застосування набуває заміна традиційних вібраційних грохотів роликowymi класифікаційними пристроями. Останні характеризуються істотно нижчим рівнем енергоспоживання — у 3–5 разів меншим — не потребують масивних фундаментних конструкцій і водночас забезпечують більш ефективне зміцнення сирих обкотишів у процесі їх транспортування та сортування.

Важливим аспектом промислової експлуатації є запобігання механічному руйнуванню сирих обкотишів під час їх транспортування до випалювальних агрегатів. З цією метою діаметри приводних барабанів конвеєрних систем зменшують приблизно до 300 мм, а швидкість руху стрічкових транспортерів

підтримують у межах 0,4–0,6 м/с. На ряді зарубіжних підприємств, зокрема на фабриках Adams Mine (Канада) та National Ethyl Pellet (США), у місцях перевантаження матеріалу між конвеєрами встановлюють магнітні барабани, що дозволяє істотно зменшити висоту падіння обкотишів і, відповідно, мінімізувати їх механічне пошкодження.

Дрібнодисперсний матеріал, що утворюється під час перевантажувальних операцій, перед подачею на конвеєрну випалювальну машину видаляється приблизно на 80–90 % за допомогою роликового грохота-укладника.

Отримання обкотишів підвищеної крупності (25–35 мм), призначених для подальшого випалу у шахтних печах, реалізується шляхом використання двох послідовно встановлених барабанних огрудкувачів. Перший агрегат оснащується грохотом зі щілинними отворами шириною 18–20 мм, тоді як другий — грохотом із розміром щілин 28–30 мм. Сирі обкотиші, сформовані у першому барабані, включаються до циркуляційного навантаження другого огрудкувача. Така організація технологічного процесу забезпечує формування гранул із достатнім рівнем механічної міцності, необхідним для їх подальшої термічної обробки у шахтних випалювальних агрегатах.

2.2. Порівняльний аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду удосконалення технологій огрудкування

Процеси змішування та огрудкування належать до ключових технологічних операцій у системі підготовки залізорудної шихти до агломерації. Саме від ефективності їх реалізації значною мірою залежать газопроникність шару, ступінь структурної та гранулометричної однорідності шихтової маси, а також експлуатаційна продуктивність агломераційних машин. У сучасних умовах металургійного виробництва значущість зазначених процесів істотно зростає, що обумовлено тенденцією до використання агломераційних шихт із підвищеним вмістом тонкоподрібнених компонентів, які характеризуються складними фізико-

механічними властивостями та зниженою здатністю до природного гранулоутворення.

На агломераційних фабриках металургійних підприємств країн СНД і провідних зарубіжних виробників огрудкування шихтових матеріалів переважно здійснюється у гладких барабанних огрудкувачах. З метою інтенсифікації процесів гранулоутворення та підвищення продуктивності технологічних ліній у практиці проектування обладнання широко застосовується збільшення геометричних розмірів огрудкувальних агрегатів, що забезпечує зростання часу перебування матеріалу у зоні обробки та сприяє формуванню більш стабільної гранулометричної структури шихти.

Відомо, що ефективність функціонування барабанних огрудкувачів визначається комплексом взаємопов'язаних факторів. До найважливіших з них належать конструктивні особливості барабанів, ступінь попередньої підготовки окремих компонентів шихти, використання технологічних добавок, що інтенсифікують процес грануляції, а також тривалість обробки матеріалу. Остання, у свою чергу, визначається такими параметрами, як кут нахилу барабана відносно горизонтальної площини та частота його обертання.

Дослідженню закономірностей руху шихтових матеріалів у процесі огрудкування присвячено значну кількість наукових праць. У низці досліджень, присвячених аналізу грануляції у циліндричних барабанах, відзначається, що на початкових ділянках агрегату спостерігається інтенсивне зчеплення матеріалу зі стінками апарата, у середній частині барабана рух відбувається переважно у режимі перекочування, тоді як у кінцевій зоні процес супроводжується частковим проковзуванням гранул, які переміщуються вздовж осі барабана. Проте подібні гіпотези не мають достатнього теоретичного обґрунтування та не підтверджені переконливими експериментальними даними.

У запропонованих авторами моделях руху матеріалу частинка шихти розглядається як матеріальна точка. Відповідно до такого підходу, під час обертання барабана частинка, перебуваючи у нижній зоні робочого простору,

піднімається разом із шаром матеріалу у верхню частину перерізу, після чого скочується по поверхні шару, поступово переміщуючись у напрямку розвантажувального торця під дією сили тяжіння та похилого розташування огрудкувача.

Припущення щодо виникнення інтенсивного проковзування шихти у кінцевій частині барабана видається малоімовірним, оскільки наявність гарнісажного шару на внутрішній поверхні апарата сприяє зростанню фрикційних взаємодій між матеріалом і стінками агрегату. Дискретний характер обвалення шихти цілком узгоджується з положеннями теорії, запропонованої Володимир Пузанов, згідно з якою агломераційна шихта розглядається як система структурних комплексів, параметри яких визначаються гранулометричним складом, мінералогічними характеристиками та іншими технологічними факторами.

Для опису траєкторій руху гранул у поперечному перерізі барабана-огрудкувача окремими дослідниками було отримано диференціальне рівняння руху матеріальної точки по поверхні скочування. Проте практичне застосування такого математичного апарату ускладнюється значною складністю рівнянь та обмеженою придатністю для інженерних розрахунків параметрів промислових грануляторів.

Загалом теоретичні дослідження процесу огрудкування у більшості випадків зводяться до аналізу кінематики руху окремих частинок матеріалу по робочій поверхні огрудкувача або по шару шихти. Водночас у таких роботах практично не розглядається взаємозв'язок між механічними режимами руху матеріалу та його гранулометричним чи хімічним складом, що істотно обмежує можливості практичного використання отриманих результатів.

Серед експериментальних досліджень механізму огрудкування заслуговують уваги роботи, у яких наведено результати визначення гранулометричного та хімічного складу окомкованої шихти вздовж довжини барабана та по ширині шару матеріалу у зупиненому агрегаті.

Використання ізотопних методів дослідження дозволило встановити, що швидкість переміщення дрібних фракцій шихти у барабані є меншою порівняно з

крупнішими частками. При цьому залежність швидкості руху частинок від їх крупності має майже лінійний характер.

Відомий дослідник агломераційних процесів Віктор Коротич запропонував оцінювати газодинамічні характеристики огрудкованої шихти через еквівалентний діаметр гранул, а здатність матеріалу до грануляції характеризувати коефіцієнтом швидкості огрудкування. На його думку, у поперечному перерізі барабана можуть реалізовуватися два принципово різні режими руху матеріалу: переміщення масиву шихти як квазітвердого тіла із проковзуванням по поверхні барабана або ж рух із пересипанням окремих частинок.

У першому випадку центр ваги маси матеріалу відхиляється від вертикалі на кут, менший за кут природного укосу шихти. У другому випадку відхилення центра ваги досягає величини кута природного укосу раніше, ніж рушійна сила стає рівною силі тертя, унаслідок чого надлишковий матеріал зсипається вниз, прагнучи відновити початкове положення рівноваги. Подібні висновки були отримані також у дослідженнях Сергій Андрєєв.

Дослідниками також встановлено, що під час руху матеріалу у режимі перекочування товщина шару, який зсипається, практично не залежить від частоти обертання барабана, а визначається переважно ступенем його заповнення.

Результати лабораторних експериментів дозволили визначити оптимальну тривалість огрудкування, перевищення якої не призводить до подальших змін гранулометричного складу шихти і, відповідно, не впливає на газопроникність шару. Водночас у зазначених дослідженнях практичні рекомендації щодо використання отриманих результатів у промислових умовах були сформульовані недостатньо чітко.

У подальших дослідженнях, виконаних у виробничих умовах агломераційної фабрики металургійного комплексу Новолипецький металургійний комбінат, було визначено оптимальний час огрудкування та встановлено його взаємозв'язок із продуктивністю агломераційних машин і якісними характеристиками готового агломерату. Подібні результати отримано й у низці інших досліджень, де показано,

що збільшення тривалості огрудкування сприяє підвищенню міцності гранул, зростанню продуктивності агломашин та поліпшенню якості агломерату.

З метою підвищення ефективності процесу грануляції у промисловій практиці застосовуються різні конструктивні модифікації барабанних огрудкувачів. Зокрема, на підприємстві Новолипецький металургійний комбінат експлуатуються два типи огрудкувальних агрегатів: двобарабанні установки з геометричними параметрами $3,2 \times 7,51$ м та $4 \times 5,75$ м, барабани яких обертаються в одному напрямку з трьома варіантами швидкостей, а також однобарабанні огрудкувачі розміром $3,2 \times 12,5$ м.

На металургійному підприємстві Орсько-Халіловський металургійний комбінат було випробувано циліндричний огрудкувач, у внутрішній порожнині якого на відстані приблизно третини довжини від розвантажувального торця встановлено додаткові барабани малого діаметра.

Для запобігання потраплянню надмірно крупних гранул (понад 0,010 м) на спікальний візок розроблено спосіб калібрувального руйнування великих фракцій безпосередньо у барабані-огрудкувачі за допомогою металевої труби. Однак подібна технологія має істотний недолік: процес роздавлювання супроводжується утворенням значної кількості дрібнодисперсних частинок, які негативно впливають на газодинамічні характеристики шару шихти під час її спікання.

Відомі також конструкції барабанних огрудкувачів із внутрішніми спіральними елементами висотою 0,2–0,25 м і кроком, що становить 0,4–0,5 діаметра барабана, спрямованими проти руху шихтового потоку. Проте внаслідок інтенсивного заростання внутрішнього простору барабана шихтовими нашаруваннями подібні конструкції не набули широкого промислового поширення.

Останніми роками у зв'язку зі зростанням частки тонкодисперсних компонентів в агломераційних шихтах спостерігається тенденція до збільшення габаритів огрудкувальних агрегатів. Так, для комплектації агломераційної машини типу МАК-600 було розроблено огрудкувач типу ОБ1-4,2 $\times$ 24.

Попри високу ефективність зазначеної конструкції, під час огрудкування шихт із підвищеним вмістом концентрату спостерігається утворення значної кількості як надмірно дрібних фракцій (менше 0,003 м), так і крупних гранул (понад 0,007–0,010 м). У обох випадках подібна гранулометрична неоднорідність негативно впливає на газодинамічний режим процесу спікання шихти.

Таким чином, результати попередніх досліджень свідчать про те, що низка встановлених закономірностей процесу огрудкування агломераційних шихт потребує подальшого уточнення та поглибленого наукового обґрунтування. У зв'язку з цим удосконалення конструкцій огрудкувального обладнання та оптимізація режимів його роботи залишаються актуальними завданнями сучасної теорії й практики агломераційного виробництва.

2.3. Оптимізація фізико-хімічних характеристик гранульованої агломераційної шихти як чинник підвищення ефективності агломераційного процесу

2.3.1. Фізико-хімічні закономірності перебігу агломераційного процесу в системі взаємодії рідкої та твердої фаз

Залізорудні концентрати характеризуються різним ступенем здатності до формування міцних гранул у процесі огрудкування, тобто мають неоднакові показники грудкуємості. У широкому науковому розумінні під грудкуємістю слід розуміти комплексну здатність матеріалу до зародження, подальшого зростання гранул та поступового підвищення їх механічної міцності в умовах грануляції. Оскільки швидкість формування гранул визначається інтенсивністю сил зчеплення між окремими частинками дисперсної системи, грудкуємість матеріалу значною мірою обумовлюється його фізико-хімічними характеристиками, а також технологічними параметрами процесу грануляції.

Поверхня будь-якої рідини або твердого тіла характеризується наявністю енергетичного (силового) поля, здатного притягувати та утримувати сторонні

атоми і молекули. Аналогічні сили міжмолекулярної взаємодії можуть виникати і між двома макроскопічними тілами у випадку, коли їх поверхні зближуються на надзвичайно малі відстані. Однак на практиці реалізація такого безпосереднього контакту ускладнюється через наявність мікрорельєфу поверхонь, який перешкоджає їх зближенню до відстаней, на яких проявляється дія молекулярних сил притягання.

Теоретичні основи міжмолекулярної взаємодії між твердими частинками були розроблені Борис Дерягін. Згідно з його теорією, сила взаємодії між двома частинками визначається добутком двох множників, один з яких характеризує геометрію контакту поверхонь частинок, а інший враховує властивості проміжної фази, що знаходиться між ними. Проведені дослідником розрахунки переконливо продемонстрували, що безпосередня молекулярна взаємодія між частинками реальних шихтових матеріалів є недостатньою для забезпечення сили зчеплення, необхідної для формування стабільних гранул.

Водночас силовим молекулярним полем володіє і поверхня будь-якої рідини, завдяки чому вона здатна взаємодіяти з іншими речовинами, зокрема з поверхнями твердих тіл. На відміну від твердих тіл, рідина має здатність змінювати форму своєї поверхні, повторюючи мікрорельєф твердої частинки. Унаслідок цього сили взаємодії між поверхнею твердої частинки та тонкою плівкою рідини можуть досягати значної величини і проявлятися на відносно великих відстанях. Таким чином, шар рідини виконує функцію своєрідного зв'язувального середовища, здатного об'єднувати тверді частинки в єдину структуровану систему. Для ефективної реалізації такого механізму необхідно, щоб сили взаємодії були достатньо високими як між рідиною та поверхнею твердої частинки, так і між молекулами самої рідини. Особливими властивостями — підвищеною густиною та в'язкістю — характеризується шар рідини, що безпосередньо прилягає до поверхні твердого тіла. Саме цей адсорбційний шар проявляє виражені «склеювальні» властивості та відіграє ключову роль у формуванні гранул.

Переважна більшість залізорудних концентратів належить до групи гідрофільних матеріалів, які добре змочуються водою. Для таких систем крайовий кут змочування наближається до нульового значення, що свідчить про високу змочуваність їх поверхні та сприятливі умови для формування водних плівок на поверхні частинок.

У процесі грудкування найбільше значення мають два типи вологи — адсорбційно зв'язана та капілярна. Капілярна вода сприяє зближенню тонкодисперсних частинок одна з одною, тоді як адсорбційно зв'язана вода, завдяки специфічним фізико-хімічним властивостям, забезпечує їх утримання у взаємному контакті, формуючи структурну основу гранули.

Середня товщина плівки адсорбційно зв'язаної води залежить від ряду факторів, серед яких важливе значення мають розміри частинок, їх мінералогічний та хімічний склад, концентрація і природа адсорбованих іонів, а також зовнішні умови середовища — відносна вологість повітря, температура, тиск тощо. За даними численних експериментальних досліджень, товщина водної плівки, адсорбованої на поверхні твердих частинок, може змінюватися у межах приблизно $5 \cdot 10^{-65} \cdot 10^{-6} - 75 \cdot 10^{-675} \cdot 10^{-6}$ мм. Найбільш міцно зв'язана вода, яка проявляє виражені адгезійні властивості, характеризується товщиною близько $5 \cdot 10^{-65} \cdot 10^{-6} - 75 \cdot 10^{-675} \cdot 10^{-6}$ мм.

Капілярна вода за своїми фізичними характеристиками практично відповідає звичайній вільній воді. Основна відмінність полягає у тому, що в капілярному стані вона перебуває під дією негативного тиску, що зумовлює виникнення так званих стягувальних капілярних сил. Такі сили виникають під час змочування водою вузьких капілярів або поверхонь твердих частинок, які розташовані на невеликій відстані одна від одної, і є результируючим ефектом дії сил поверхневого натягу рідини та молекулярних сил взаємодії між рідкою і твердою фазами.

Інтенсивність капілярного зчеплення суттєво зростає зі зменшенням розміру частинок. У разі незначного вмісту дрібнодисперсних фракцій у сипкому матеріалі поровий простір між великими зернами залишається практично незаповненим, що

обумовлює відносно великі середні відстані між частинками і, відповідно, низьку міцність їх взаємного зчеплення. Додавання невеликої кількості тонкодисперсного матеріалу суттєво не змінює загальної структури системи: найдрібніші частинки залишаються ізольованими включеннями у масиві вільної води, яка заповнює пори між крупними зернами, тому взаємозв'язок між ними практично не посилюється.

За достатнього вмісту дрібних фракцій структура матеріалу набуває значно більшої щільності. У такій системі крупні зерна виконують функцію своєрідного каркасного елемента, що забезпечує підвищену стійкість матеріалу до статичних і динамічних навантажень. Найдрібніші частинки, заповнюючи міжзернові проміжки, зв'язують великі зерна між собою завдяки плівкам адсорбційно зв'язаної води та дії капілярних сил.

Отже, лише за певного, оптимального для кожного конкретного виду шихти співвідношення крупних і дрібних частинок досягається найбільш щільне пакування зерен, що забезпечує максимальну силу міжчастинкового зчеплення у зволоженому матеріалі та створює сприятливі умови для формування міцних гранул.

2.3.2. Особливості огрудкування тонкодисперсних матеріалів у технологічних системах підготовки шихти

Для забезпечення стабільного розвитку процесу грануляції тонкоподрібнених матеріалів у масиві шихти необхідною умовою є наявність певних локальних неоднорідностей флуктуацій густини та вологості, які виконують функцію зародкових центрів формування гранул. У більшості випадків такими центрами виступають дрібні грудочки матеріалу, поровий простір яких насичений водою. Завдяки відносно значній масі (порядку декількох грамів) подібні утворення під час пересипання матеріалу у грануляторі набувають достатнього запасу кінетичної енергії, що забезпечує перебудову їх внутрішньої структури та подальший розвиток процесу гранулоутворення.

Механізм зародження гранул і формування первинних грудочок у разі так званого «сухого» гранулювання тобто коли до огрудкувача подається матеріал із вологістю, нижчою за оптимальну може бути описаний таким чином. Краплі води, що потрапляють у шар відносно сухого дисперсного матеріалу, під дією капілярних сил швидко поширюються у міжчастинковому просторі, заповнюючи пори між окремими зернами. Граничний розмір сформованих грудочок у цьому випадку прямо пропорційний об'єму водяної краплі та обернено пропорційний пористості шару матеріалу.

У разі «мокрого» гранулювання, коли до огрудкувача подається шихта з вологістю, що перевищує оптимальну, а також певна кількість сухого матеріалу, зародкові центри формуються переважно внаслідок руйнування так званих «сухарів» — частково зневоднених агломератів концентрату. Надалі утворені грудочки в процесі багаторазових пересипань і ударних взаємодій із нерухомим шаром матеріалу та внутрішніми поверхнями гранулятора поступово ущільнюються. У результаті цього відбувається взаємне переміщення частинок і формування більш щільного їх укладання.

У ході такого ущільнення надлишкова волога витісняється на поверхню грудочки, де вона сприяє приєднанню нових сухих частинок. У міру зближення частинок товщина водяної плівки між ними зменшується, що супроводжується зростанням сил міжчастинкового зчеплення. Під дією зовнішніх динамічних навантажень долається пружний опір водяної плівки, і частинки потрапляють у своєрідну «молекулярну пастку», що забезпечує їх взаємне притягання. Подальше зближення частинок, пов'язане зі зменшенням товщини гідратних оболонок і зростанням розмірів гранул, можливе лише за наявності достатніх динамічних впливів, коли витіснена вода поглинається поверхнею гранули внаслідок приєднання нових частинок матеріалу.

Кожному технологічному режиму грануляції відповідає певна мінімальна товщина водяних плівок на поверхні частинок, яка визначається величиною динамічних навантажень, що генеруються гранулятором. Після досягнення цього

граничного стану подальше ущільнення структури грудочки шляхом зближення частинок практично припиняється, а її механічна міцність досягає максимального значення.

Важливим чинником, що суттєво впливає на процес огрудкування, є природа матеріалу, який піддається грануляції. Це проявляється у відмінностях розмірів і форми частинок, а також у специфіці їх хіміко-мінералогічного складу. Хімічні та мінералогічні особливості матеріалів визначають величину сил зчеплення між частинками через зміну змочуваності твердої поверхні. Мінерали з відносно низькою міцністю кристалічної ґратки, такі як бентоніт або вапно, при взаємодії з водою інтенсивно руйнуються з утворенням дрібнодисперсних частинок, що проявляють колоїдні властивості або збагачують рідку фазу різноманітними іонами. Подібні процеси істотно впливають на механізм гранулоутворення та на величину сил зчеплення між частинками у структурі гранули.

Експериментальні дослідження підтверджують наявність прямої залежності між питомою поверхнею огрудковуваних матеріалів і опором гранул до руйнування при стисканні, а також між величиною капілярних сил і граничною міцністю гранули при роздавлюванні. Дослідник Віктор Коротич, підкреслюючи важливу роль капілярних сил у механізмі формування гранул, зазначав, що ці сили проявляються лише у трифазних системах. Тобто обов'язковою умовою їх виникнення є одночасна наявність у структурі гранули трьох компонентів твердої фази, рідини та повітря.

Значний вплив на величину сил зчеплення між частинками тонкодисперсного матеріалу має вологість системи. Залежність міцності гранул від вмісту вологи носить екстремальний характер. Значення вологості, при якому досягається максимальна міцність гранул, у кожному конкретному випадку визначається властивостями твердої фази її гранулометричним складом, фізико-хімічним станом поверхні частинок, а також кінематикою процесу грануляції, що формує внутрішню структуру грудочок.

Варто зазначити, що за умов відхилення вологості шихти від оптимального значення спостерігаються суттєві коливання гранулометричного складу огрудкованого матеріалу. За недостатньої вологості переважає утворення дрібних фракцій, тоді як за надмірної формується значна кількість надто крупних гранул.

У більшості традиційних огрудкувальних агрегатів швидкість зростання гранул значно перевищує швидкість їх структурного ущільнення. Унаслідок цього сформована огрудкована шихта часто характеризується недостатньою механічною міцністю та може частково руйнуватися під час транспортування або під час укладання на агломераційну машину.

З огляду на це одним із перспективних напрямів підвищення якості гранульованої агломераційної шихти є вдосконалення конструкції огрудкувальних апаратів. Основними підходами до вирішення цієї задачі є збільшення рівня динамічних навантажень у процесі грануляції або подовження часу перебування матеріалу у зоні огрудкування. Одним із практично доцільних рішень у цьому напрямі є модифікація конструкції огрудкувача з метою збільшення тривалості грануляції, що і розглядається як один із можливих підходів у межах даного дослідження.

2.3.3. Трансформація гранулометричного складу агломераційної шихти в процесі спікання

З метою встановлення закономірностей деструкції гранульованих утворень у процесі транспортування шихтового матеріалу, його міжопераційних перевантажень, а також безпосередньо у структурі шару, що піддається термічній агломераційній обробці, було проведено комплексне експериментальне дослідження, спрямоване на аналіз трансформації гранулометричного складу шихти на різних ділянках технологічного тракту її подачі до агломераційних машин. Окрім цього, об'єктом дослідження виступав вплив ущільнювального навантаження, індукованого дією розрідження під колосниковими ґратами, а також морфологічні та структурні зміни гранульованої шихти у характерних

функціональних зонах шару — зокрема в областях інтенсивного сушіння та вторинного зволоження.

Кількісну оцінку ступеня руйнування гранул під впливом ущільнювальних навантажень здійснювали шляхом витримування спікального візка разом із розміщеним на ньому шаром неспеченої шихти в умовах стабілізованого вакууму, протягом чотирьох хвилин. Для реалізації експериментальної процедури спікальний візок відбирали з центральної частини робочої гілки агломераційної стрічки, що забезпечувало репрезентативність отриманих результатів. З метою виключення можливості передчасного займання шихтового матеріалу у процесі проведення досліду припиняли подачу газу до запалювальних фурм, а також послідовно перекривали шиберні заслінки вакуумних камер у міру переміщення візка вздовж робочої ділянки агломераційної машини.

Після вилучення спікального візка шихтовий шар, що знаходився на його поверхні, піддавали пошаровому аналізу. Для цього його умовно поділяли на три горизонтальні сегменти (I–III), відлік яких здійснювали від поверхні колосникових ґрат. Із кожного з виділених шарів відбирали репрезентативні проби масою 50–55 кг, які піддавали детальному лабораторному аналізу, що включав розсівання для встановлення гранулометричного складу та визначення фактичної вологості матеріалу.

Для дослідження характеру руйнування гранульованих утворень у специфічних функціональних зонах агломераційного шару — а саме у зонах сушіння та вторинного зволоження — спікальний візок разом із шихтовим матеріалом вилучали з агломераційної стрічки через чотири хвилини після початку процесу запалення. Зазначений часовий інтервал відповідав приблизно 30 % загальної тривалості циклу агломерації. Після цього з поверхні шару видаляли верхній пласт частково спеченої маси товщиною близько 70–80 мм, а решту шихтового матеріалу поділяли на два рівновисотні горизонти, умовно позначені як Іа та Іа. Із кожного із зазначених шарів здійснювали відбір проб для подальшого визначення гранулометричного складу та вологості матеріалу.

Експериментальні спостереження засвідчили, що шар Іа, який безпосередньо межує із зоною горіння палива, характеризується складною внутрішньою структурою та фактично складається з двох чітко диференційованих зон — зони сушіння та зони перезволоження. Товщина зони сушіння становила приблизно 20–30 мм, тоді як зона перезволоження мала потужність близько 50–60 мм. Відмінності між цими зонами чітко фіксувалися за візуальними характеристиками, насамперед за кольором шихтового матеріалу, що свідчило про суттєві відмінності у фізико-хімічному стані шару. Із кожної з зазначених зон також проводився окремий відбір проб для виконання гранулометричного аналізу та визначення вмісту води.

Варто підкреслити, що протягом усього періоду проведення експериментальних досліджень основні технологічні параметри агломераційного процесу підтримувалися на постійному рівні з метою забезпечення коректності інтерпретації результатів. Зокрема, стабілізували величину розрідження у вакуумних камерах та колекторі, температуру запалення, а також склад і початкову вологість шихтового матеріалу. Початкова висота шару шихти, сформованого на агломераційній машині, становила 280 мм; однак у результаті ущільнення, спричиненого дією вакууму, вона зменшувалася до приблизно 240 мм.

У таблиці 2.3.3.1 наведено результати визначення гранулометричного складу шихтового матеріалу на різних ділянках технологічного тракту його подачі до агломераційних машин, а також зміни гранулометричних характеристик у процесі безпосереднього протікання агломераційного процесу. Ці дані дозволяють простежити закономірності еволюції структури гранульованої шихти під впливом механічних, гідродинамічних та термічних факторів, що діють у межах агломераційного шару.

Таблиця 2.3.3.1 – Зміна гранульованого складу шихти в процесі підготовки її до спікання

Ділянки		Вихід класів %					
		Менше 1,6 мм	1,6- 3,0 мм	3,0- 5,0 мм	5,0- 9,0 мм	9,0- 15,0 мм	15,0- 20,0 мм
До огрудкування		71,45	6,63	3,50	10,13	8,29	–
Після огрудкування		21,85	40,32	14,6	6,98	8,8	7,45
Після укладання на спікальні візки по шарах	Середній	44,7	29,4	6,2	7,6	9,3	2,8
	I	34,0	16,9	7,9	16,1	19,5	5,6
	II	46,5	33,1	6,1	5,0	7,2	2,1
	III	53,6	38,2	4,6	1,8	1,1	0,7
Після чотирьоххвилинної витримки під вакуумом по шарах	Середній	49,95	26,9	5,4	7,0	8,8	2,4
	I	42,5	12,4	6,4	14,9	18,7	5,1
	II	50,7	30,7	5,5	4,5	6,8	1,8
	III	55,4	37,5	4,2	1,5	0,9	0,5
Опісля чотири хвилини від початку запалення	Ia	45,8	10,1	6,0	14,6	18,5	5,0
	IIa	66,95	19,25	4,05	3,6	5,3	1,35
	Середній						
У зоні перезволоження		63,4	20,1	4,3	4,0	6,5	1,7
У зоні сушки		70,5	18,4	3,8	3,2	4,1	–

Аналіз експериментальних результатів, наведених у таблиці 2.3.3.1, свідчить про те, що застосування барабаних огрудкувачів забезпечує достатньо високий ступінь грануляції агломераційної шихти. Зокрема, встановлено, що в процесі огрудкування відбувається істотне зменшення частки дрібнодисперсної фракції: вміст матеріалу з розміром частинок менше 1,6 мм знижується приблизно у 3,2 раза порівняно з початковим станом шихти. Разом із тим отримані гранульовані утворення характеризуються недостатнім рівнем механічної міцності, внаслідок

чого у процесі транспортування матеріалу, його міжопераційних перевантажень та подальшого укладання на агломераційну стрічку відбувається інтенсивна деструкція сформованих гранул. У результаті цього вміст дрібної фракції в шихті, що надходить безпосередньо на стадію спікання, виявляється лише у 1,6 раза меншим порівняно з її початковим станом до огрудкування. Характерною особливістю є те, що найбільшою мірою до руйнування схильні гранули крупних фракцій, передусім класу 15,0–20,0 мм.

З аналізу тих самих експериментальних даних також випливає, що в процесі завантаження шихтового матеріалу на агломераційну стрічку відбувається його виражений гранулометричний перерозподіл у межах шару, зумовлений явищем сегрегації. Унаслідок цього дрібнодисперсний матеріал переважно концентрується у верхній частині шару (горизонт III), тоді як відносно цілі гранульовані утворення локалізуються здебільшого в його нижніх горизонтах (шар I). Незважаючи на значну інтенсивність сегрегаційних процесів, вміст дрібної фракції (класу <1,6 мм) у верхньому шарі III ще до початку стадії спікання досягає приблизно 34 %. Така висока концентрація дрібнодисперсного матеріалу є однією з ключових причин часткового закупорювання міжкокосникового простору шихтовими частинками, що, у свою чергу, призводить до зростання газодинамічного опору шару. Отримані результати в цілому якісно узгоджуються з даними, представленими у низці попередніх досліджень.

Проведені експериментальні дослідження показали, що додатковим фактором руйнування гранул виступає процес ущільнення шихтового шару під дією вакууму. При цьому встановлено характерну закономірність: зі зменшенням розміру гранул їх здатність протистояти деструктивним механічним навантаженням, що виникають у процесі ущільнення, суттєво знижується. Крім того, інтенсивність руйнування гранул залежить від їхнього розташування у шарі — гранульовані утворення нижніх горизонтів зазнають більш значних руйнівних впливів порівняно з гранулами верхніх частин шару. Зокрема, вміст гранул фракції 1,6–3,0 мм у результаті ущільнення шихти в нижньому шарі I зменшився на 4,5 %, тоді як у

верхньому шарі ІІІ аналогічне зниження становило лише 0,7 %. Водночас частка крупних гранул (15,0–20,0 мм) зменшилася відповідно на 0,5 % та 0,2 %. Загалом унаслідок вакуумного ущільнення вміст дрібнодисперсної фракції (<1,6 мм) у шихті зріс на 4,8 %, тоді як висота шару зменшилася з початкових 280 мм до приблизно 240–245 мм.

Сегрегаційний перерозподіл матеріалу в межах шару супроводжувався також формуванням градієнта вологості. Зокрема, у нижньому шарі І вологість становила 7,6 %, тоді як у шарах ІІ та ІІІ відповідно зростала до 8,1 % і 8,6 %.

Результати гранулометричного аналізу шихти шарів Іа та ІІа, виконаного через чотири хвилини після початку запалення (табл. 2.3.3.1), свідчать про те, що найбільш інтенсивна деструкція гранульованих утворень відбувається безпосередньо в процесі спікання. Якщо після стадії вакуумного ущільнення середній вміст дрібнодисперсної фракції у шарах І та ІІ становив приблизно 46,6 %, то вже через чотири хвилини після початку запалення цей показник зріс до 66,95 %, тобто збільшився на 20,35 %. При цьому вміст дрібної фракції у нижньому шарі І зріс відносно незначно — приблизно на 3,3 %, тоді як вологість цього шару знизилася до 7,0 %. Основне збільшення частки дрібнодисперсного матеріалу пов'язане з інтенсивною деструкцією гранул шару ІІа, який безпосередньо прилягає до зони горіння палива.

Крім того, встановлено, що всередині шару ІІа спостерігається значна неоднорідність як за гранулометричним складом, так і за вологісними характеристиками, що зумовлено процесами волого переносу та різною інтенсивністю впливу зон сушіння і перезволоження на механічну стійкість гранул. Як випливає з даних таблиці, у зоні перезволоження найбільш інтенсивно руйнуються дрібні гранули фракції 1,6–3,0 мм, вміст яких зменшується більш ніж у 1,5 рази, тоді як вологість матеріалу в цій зоні зростає до приблизно 10,6 %.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що у процесі формування зони перезволоження кількість води, яка конденсується в шарі, визначається не лише початковою температурою шихтового матеріалу, але й

величиною питомої поверхні гранул. Зменшення діаметра гранул супроводжується зростанням їх питомої поверхні, що, у свою чергу, зумовлює збільшення відносної кількості вологи, яка конденсується на поверхні частинок. Саме цим, імовірно, пояснюється підвищена схильність дрібних гранул до руйнування у зоні перезволоження.

Водночас у зоні сушіння спостерігається інший характер руйнування гранульованих утворень. Як свідчать дані таблиці 2.3.3.1, у цій зоні інтенсивно руйнуються переважно великі гранули, сформовані у процесі огрудкування, передусім фракції 15,0–20,0 мм, тоді як вміст дрібних гранул класу 1,6–3,0 мм зменшується незначною мірою (приблизно на 1,7 %). Отримані результати якісно узгоджуються з даними попередніх експериментальних досліджень, проведених авторами.

Загалом проведений комплекс експериментальних досліджень дає підстави стверджувати, що відносно низька продуктивність агломераційних машин під час спікання шихт із підвищеним вмістом магнетитових концентратів значною мірою зумовлена інтенсивною деструкцією гранул, яка відбувається практично на всіх стадіях технологічного процесу — починаючи від виходу гранульованої шихти з огрудкувача і закінчуючи підходом фронту горіння палива. Найбільш інтенсивно цей процес проявляється у функціональних зонах сушіння та перезволоження.

Унаслідок руйнування гранульованих утворень газодинамічний опір шару, що спікається, зростає не лише в результаті зміни його структурної організації, але й унаслідок підвищеної конденсації вологи в нижніх горизонтах шару. Це пояснюється тим, що деструкція гранул супроводжується значним збільшенням сумарної поверхні шихтового матеріалу, яка контактує з потоком вологих газів, що проходять крізь шар.

У зв'язку з цим попередній підігрів шихти до температури 50–55 °С виявляється ефективним лише у випадку спікання відносно грубозернистих шихтових систем. Із зростанням частки тонкодисперсних концентратів у складі шихти оптимальна температура її попереднього підігріву підвищується до 80–90

°С. Разом із тим відомо, що збільшення вмісту грубозернистих компонентів (передусім агломераційних руд) призводить до зниження концентрації заліза в агломераті, тоді як підвищення температури попереднього підігріву шихти негативно впливає на процес її огрудкування.

За цих умов виникає об'єктивна необхідність у розробленні нових технологічних підходів, спрямованих не лише на інтенсифікацію процесу грануляції агломераційної шихти, але й на істотне підвищення механічної міцності сформованих гранульованих утворень.

2.3.4. Розроблення технологічних підходів до підвищення якості підготовки шихтових матеріалів перед стадією агломерації

Одним із найбільш досліджених і технологічно ефективних методів інтенсифікації процесу грануляції агломераційної шихти та підвищення механічної міцності сформованих гранул вважається введення до її складу вапняковмісних добавок. Проте широке впровадження цього підходу у промислових умовах обмежується низкою суттєвих техніко-економічних чинників. Передусім це пов'язано зі значними капітальними витратами, необхідними для спорудження та експлуатації випалювальних агрегатів, відносно низьким ступенем термічного розкладання вапняку, а також недостатньо високою продуктивністю відповідного обладнання. Додаткові технологічні труднощі виникають у зв'язку з необхідністю подачі на стадію випалення вапняку певного гранулометричного складу (переважно фракції 3,0–10,0 мм), що ускладнює його підготовку та транспортування. Крім того, наявність у структурі агломерату включень незреагованого вільного вапна негативно впливає на його механічні характеристики, знижуючи загальну міцність кінцевого продукту.

Результати експериментальних досліджень, проведених на підприємстві Південний гірничо-збагачувальний комбінат, також свідчать про обмежену ефективність використання традиційних органічних добавок, зокрема сульфітно-спиртова барда, у складі агломераційної шихти. Було встановлено, що внаслідок

інтенсивного руйнування гранул у зоні перезволоження шару агломераційної шихти очікуваний ефект від введення зазначеної добавки виявляється незначним.

Водночас у сучасній технологічній практиці розроблено низку методів, спрямованих на формування стійких і практично необоротних структурних зв'язків у сипких матеріалах із використанням сульфітно-спиртової барди. Найбільш радикальним і надійним підходом вважається введення зазначеної добавки у поєднанні з окиснювальними компонентами, зокрема солями хромової кислоти або сполуками тривалентного хрому, такими як оксид хрому. У присутності таких окиснювачів відбувається інтенсифікація процесів полімеризації та формування стабільних структурних зв'язків між частинками шихти.

Виходячи з сучасних вимог до фізико-механічних характеристик сирих окатишів та гранул агломераційної шихти, у даній роботі запропоновано альтернативні технологічні підходи до інтенсифікації процесу огрудкування, які ґрунтуються на використанні як зв'язувальних добавок полімерних композицій. Зокрема, пропонується застосування карбамідні смоли у поєднанні з отверджувачами, а також лігносульфонати кальцію (що входять до складу сульфітно-спиртової барди) у комбінації з окиснювальними агентами.

У запропонованих технологічних схемах зволоження шихтового матеріалу здійснюється водними розчинами зазначених зв'язувальних речовин. Висока розчинність карбамідних смол і лігносульфонатів кальцію у водному середовищі дозволяє отримувати розчини практично будь-якої концентрації, що забезпечує можливість регулювання їх вмісту у шихті відповідно до заданих вимог до фізико-механічних характеристик сирих гранул.

Інтенсифікація процесу грануляції та зміцнення гранульованих утворень при використанні зазначених зв'язувальних компонентів обумовлюється їх здатністю до формування високоміцних гелеподібних структур, які ефективно зв'язують частинки шихти у компактні агрегати. Механізм дії таких добавок полягає в тому, що під час зволоження шихтового матеріалу водними розчинами зв'язувальних речовин навколо окремих частинок формується тонка рідка плівка відповідного

композиційного складу. Через певний проміжок часу ця плівка поступово трансформується спочатку у драглистий гелеподібний стан, а згодом твердне, формуючи міжчастинкові зв'язки, які забезпечують утворення механічно стійких агрегатів.

Однією з принципово важливих особливостей зазначених зв'язувальних систем є їх здатність до самостійного структуроутворення. Іншими словами, процес формування гелевих структур може відбуватися незалежно від специфічних властивостей поверхні шихтових матеріалів, що істотно розширює можливості їх технологічного застосування.

Швидкість твердіння гелевих структур визначається концентрацією отверджувачів або окиснювачів, введених до складу шихти, і зростає зі збільшенням їхнього вмісту. При цьому відповідні реагенти можуть вводитися як безпосередньо у суміші із зв'язувальними речовинами, так і шляхом попередньої обробки окремих компонентів шихтового матеріалу.

Оцінювання ефективності запропонованих технологічних підходів здійснювалося у промислових умовах агломераційного виробництва підприємства Південний гірничо-збагачувальний комбінат, зокрема в агломераційному цеху №1. Приготування водних розчинів зв'язувальних речовин здійснювалося на технологічному майданчику розподілу шихти по агломераційних машинах (позначка +36 м) за спеціально розробленою схемою.

З ємності об'ємом 5,5 м³ зв'язувальна добавка через дозувальний пристрій із автоматичними засувками подавалася до змішувачів об'ємом по 10,8 м³ кожний. Одночасно до змішувачів трубопроводом подавалася технічна вода, а також отверджувачі або окиснювачі, що дозувалися зі спеціального скляного резервуара, оснащеного градуйованою шкалою. Процес змішування здійснювався за допомогою механічної мішалки з вертикально розташованим валом і чотирма зігнутими лопатями шириною 100 мм та довжиною 535 мм.

Привід мішалки здійснювався електродвигуном потужністю 7 кВт через редуктор типу ЦД2-35 та конічну зубчасту передачу. Частота обертання мішалки становила приблизно 65 об/хв.

У процесі експлуатації один із змішувачів використовувався для приготування розчину, тоді як з іншого вже готовий розчин подавався до збірного зумпфа, звідки насосним агрегатом транспортувався трубопроводом безпосередньо до огрудкувача. Зволоження шихти здійснювалося через перфоровану трубу, встановлену приблизно на третині довжини огрудкувача. Об'єм розчину, що подавався до шихтового матеріалу, залежно від продуктивності агломераційної машини та умов проведення випробувань змінювався у межах 2,8–3,2 м³/год. У разі спікання шихти без використання зв'язувальних добавок подача технічної води до огрудкувача здійснювалася через зумпф.

Аналіз ефективності роботи агломераційної машини проводився шляхом порівняння двох технологічних режимів: спікання шихти, зволоженої технічною водою (переддослідний період), та спікання шихти, обробленої водними розчинами зв'язувальних речовин (дослідний період). Склад шихтового матеріалу у обох випадках залишався незмінним, а тривалість кожного експериментального циклу становила 16 годин.

У першій серії експериментів як зв'язувальний компонент використовувалася карбамідна смола, що виробляється підприємством Прилуцький завод «Пластмас». Смола являла собою однорідну масу білого кольору з вмістом сухого залишку близько 70 %. Для її полімеризації застосовували 5-відсотковий розчин соляна кислота у кількості 5–20 % від витрати смоли.

У другій серії експериментів використовували сульфітно-спиртову барду, що містила приблизно 30 % сухого залишку. Для окиснення лігносульфонатів кальцію, які входять до її складу, застосовували біхромат натрію.

У процесі промислових випробувань проводили визначення гранулометричного складу огрудкованої шихти, а також аналіз його змін у процесі

транспортування, укладання на агломераційну стрічку та подальшого проходження матеріалу через зони сушіння і перезволоження.

Аналіз залежності гранулометричного складу шихти від витрати зв'язувальних речовин показав, що зі збільшенням їх концентрації вміст дрібнодисперсної фракції ($<1,6$ мм) в огрудкованому матеріалі поступово зменшується. При цьому введення зв'язувальних добавок у кількості до $1,0\text{--}1,5$ кг/т агломерату практично не впливає на вихід дрібної фракції. У цьому випадку збільшення частки крупних гранул відбувається переважно за рахунок агрегації частинок проміжних фракцій, насамперед класу $1,6\text{--}3,0$ мм.

Подальше збільшення витрати зв'язувальних компонентів до рівня $3,0\text{--}3,5$ кг/т агломерату супроводжується інтенсивним переходом частинок фракції $<1,6$ мм до складу гранул проміжних класів ($1,6\text{--}5,0$ мм). Це пояснюється більш рівномірним розподілом зв'язувальної речовини на поверхні частинок шихти, що істотно підвищує ймовірність їхнього взаємного злипання.

Водночас подальше збільшення витрати зв'язувальних речовин понад $3,0\text{--}3,5$ кг/т агломерату призводить до агломерації гранул фракцій $1,6\text{--}3,0$ та $3,0\text{--}5,0$ мм із формуванням надмірно крупних утворень розміром $15,0\text{--}20,0$ мм. Зазначений ефект особливо виражений у випадку використання карбамідних смол як зв'язувального компонента.

Узагальнений і взаємоузгоджений аналіз результатів експериментального визначення гранулометричного складу огрудкованої агломераційної шихти за умов модифікації її складу органічними зв'язувальними компонентами — карбамідною смолою та сульфітно-спиртовою бардою — свідчить про наявність певних відмінностей у характері формування грануляційної структури системи залежно від фізико-хімічної природи використаної зв'язувальної добавки. Встановлено, що за однакових питомих витрат сухого залишку зазначених реагентів дещо більш сприятливі показники структурної стабільності гранульованої шихти формуються у випадку застосування карбамідної смоли. Зокрема, при введенні її сухого залишку у кількості $3,0$ кг/т агломерату частка дрібнодисперсної фракції з розміром

частинок менше 1,6 мм у складі огрудкованої шихти становила 10,1 %, тоді як вміст основної технологічно придатної фракції гранул розміром 1,6–9,0 мм досягав 84,7 %. Для порівняння, за використання сульфітно-спиртової барди у еквівалентній кількості сухого залишку відповідні показники склали 15,1 % та 80,3 % відповідно, що свідчить про дещо нижчу ефективність цієї речовини у формуванні оптимальної грануляційної структури шихтової суміші.

Аналіз експериментальних даних, представлених на відповідному рисунку, який ілюструє залежність вмісту фракції менше 1,6 мм від питомої витрати зв'язувальних компонентів на різних стадіях підготовки шихти до спікання, дозволяє зробити висновок, що за умов однакової кількості сухого залишку зв'язувальних речовин концентрація дрібнодисперсної фракції у шихтовому матеріалі змінюється у відносно вузькому інтервалі значень. Разом з тим спостерігається виразне підвищення здатності гранул протистояти руйнівним механічним впливам, що виникають у процесі технологічного транспортування та термічної підготовки шихти. Найбільш інтенсивне зростання механічної стабільності гранул відзначається у зонах сушіння та перезволоження агломераційної машини, де на матеріал діють значні термомеханічні та гідродинамічні навантаження.

Встановлено також, що зі збільшенням питомої витрати сухого залишку зв'язувальних компонентів до рівня 3 кг/т агломерату вологість шихти у зоні перезволоження зменшується до 9,2 %. Зазначене явище може бути пояснене комплексною дією двох взаємопов'язаних факторів: по-перше, зменшенням частки дрібнодисперсної фракції, яка характеризується підвищеною водоутримувальною здатністю, і, по-друге, формуванням більш міцних і структурно стабільних гранул, що мають підвищену стійкість до руйнування та вторинного диспергування під впливом механічних навантажень.

Результати проведених експериментальних досліджень переконливо демонструють, що підвищення витрати зв'язувальних реагентів у складі шихтової суміші безпосередньо корелює зі зростанням механічної міцності сформованих

гранул. З аналізу експериментальних залежностей випливає, що найбільш суттєве зниження вмісту дрібної фракції (менше 1,6 мм) у шихті спостерігається в інтервалі збільшення витрати сухого залишку зв'язувальних речовин від 1 до 3 кг/т агломерату, що свідчить про наявність характерної області найбільш ефективної дії зв'язувальних агентів у процесі формування грануляційної структури шихти.

З метою визначення економічної доцільності впровадження запропонованих технологічних підходів до підготовки агломераційної шихти перед стадією огрудкування було здійснено комплекс експериментальних визначень продуктивності агломераційних машин, а також кількісної оцінки вмісту дрібної фракції (класу 0–5 мм) у готовому агломераті. Визначення продуктивності агрегатів проводилося шляхом систематичного зважування хоперів з агломератом, що відвантажується, тоді як гранулометричний склад продукту оцінювали методом розсіву великогабаритних проб масою 1,2–1,5 т на механічному гуркоті. Відбір проб здійснювали за допомогою грейферного крана з подальшим лабораторним аналізом.

Отримані результати, узагальнені на відповідному рисунку, демонструють, що при збільшенні питомої витрати сухого залишку зв'язувальних компонентів до 3,0 кг/т агломерату продуктивність агломераційної машини зростає приблизно на 5,2 %, тоді як частка дрібної фракції у готовому агломераті зменшується на 1,7 %. Зазначені зміни свідчать про покращення гранулометричної структури агломераційного продукту та підвищення ефективності функціонування агломераційного процесу в цілому.

За умов питомої витрати сухого залишку зв'язувальних речовин на рівні 3 кг/т агломерату фактична витрата карбамідної смоли становить 3,85 кг/т агломерату, тоді як для сульфітно-спиртової барди відповідний показник досягає 10 кг/т агломерату, що відображає різницю у концентрації сухих речовин у складі зазначених реагентів.

Комплексна економічна оцінка ефективності впровадження запропонованих способів підготовки шихти до спікання може бути виконана лише після

розроблення детального технічного завдання на проектування відповідного технологічного комплексу. При цьому необхідно врахувати обсяги капітальних вкладень, пов'язаних зі створенням інфраструктури для зберігання зв'язувальних реагентів, організації процесу приготування їх водних розчинів, а також транспортування і дозованого введення цих розчинів безпосередньо в зону роботи окомковувальних агрегатів.

Висновки

1. У результаті комплексного експериментального дослідження встановлено кінетичні закономірності процесу огрудкування агломераційних шихт, сформованих на основі тонкодисперсних магнетитових концентратів. Показано, що розвиток процесу грануляції характеризується поступовим і послідовним збільшенням середнього розміру гранул у часі. На основі отриманих експериментальних даних запропоновано методичний підхід до розрахункового визначення гранулометричного складу огрудкованої шихти.

2. На основі дослідження речовинного та структурного складу гранул встановлено основні закономірності формування грануляційної структури агломераційної шихти. Виявлено існування критичного класу крупних добавок, присутність якого призводить до зниження швидкості огрудкування магнетитових концентратів. Величина цієї фракції визначається сукупністю структурно-механічних і поверхнево-енергетичних характеристик концентратів та добавок, а також їх співвідношенням у шихтовій суміші. Встановлено також гранулюючу активність окремих типів добавок.

3. Розроблено методику та створено конструкцію експериментального пристрою, призначеного для визначення механічної міцності гранул, що формується у процесі огрудкування.

4. Досліджено кінетичні особливості зміцнення гранул у процесі огрудкування шихти. Показано, що зростання їх механічної міцності відбувається протягом усього періоду грануляції. Запропоновано аналітичний підхід до розрахункового визначення міцності гранул залежно від їх крупності.

5. Експериментально доведено, що залежність механічної міцності гранул від вологості шихтової суміші має виражений екстремальний характер. Значення вологості, за якого досягається максимум міцності гранул, а також абсолютна величина цього максимуму визначаються гранулометричними характеристиками концентратів і добавок та істотно варіюють залежно від їх фізико-хімічної природи.

6. Запропоновано стохастичну модель процесу огрудкування та розроблено систему критеріїв оцінювання ефективності грануляції шихтових матеріалів, що дозволяє здійснювати розрахунок оптимальних технологічних режимів та кількісно оцінювати вплив поверхневих властивостей частинок і вологості шихти на швидкість гранулоутворення та міцність сформованих гранул. Задовільна узгодженість результатів розрахунків із експериментальними даними, наведеними у науковій літературі, дозволяє рекомендувати запропоновані критерії для практичного використання.

7. У промислових умовах досліджено вплив окремих технологічних факторів на здатність агломераційної шихти до огрудкування та визначено раціональні параметри функціонування окомковувальних агрегатів. Встановлено, що підігрів шихти за рахунок введення гарячого повернення негативно впливає на її огрудковуваність, причому цей ефект істотно посилюється при температурі повернення, що перевищує 250 °С.

8. Експериментально встановлено, що зниження швидкості спікання агломераційних шихт з підвищеним вмістом тонкодисперсних магнетитових концентратів зумовлене руйнуванням гранул у процесі транспортування шихти, причому найбільш інтенсивно цей процес відбувається у зонах сушіння та перезволоження агломераційної машини. Запропоновано комплекс технологічних заходів підготовки шихти до спікання, реалізація яких забезпечує інтенсифікацію процесу огрудкування та підвищення вологостійкості і термічної стабільності гранул.

3. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Методика експериментального дослідження технологічних параметрів виробництва офлюсованого агломерату.

Експериментальні дослідження процесу спікання агломераційної шихти здійснювалися на лабораторній установці чашового типу, робочим елементом якої була циліндрична агломераційна чаша діаметром 300 мм, що відповідало ефективній площі спікання 0,07 м². Формування шару шихти проводили до висоти 335 мм. Початковий газодинамічний режим забезпечувався створенням розрідження під колосниковими ґратами на рівні 980 мм водяного стовпа. Необхідна величина вакууму підтримувалася вентиляторною установкою з плавно регульованою характеристикою, що давало змогу стабілізувати режим руху газового потоку протягом усього періоду спікання.

Ініціювання процесу запалювання паливної складової шихти здійснювали за допомогою пальникового пристрою, що працював на природному газі. Тривалість стадії запалювання становила одну хвилину, при цьому розрідження під колосниковими ґратами під час запалювання підтримувалося на рівні 600 мм водяного стовпа. Такий режим забезпечував стабільне формування фронту горіння у верхній частині шару агломераційної шихти.

Залізорудна складова досліджуваної шихтової суміші формувалася з урахуванням технологічних умов промислового виробництва агломерату в агломераційному цеху Південного гірничо-збагачувального комбінату. Її склад включав 80 % магнетитового концентрату та 20 % агломераційної руди. Кількість флюсуючих матеріалів, зокрема доломітизованого вапняку, а також твердої паливної складової визначали розрахунковим шляхом відповідно до заданого рівня основності агломерату та теплового балансу процесу спікання.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.03.МД			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв							
					Лімен	АнкVIII	АнкVIIIІІ	
						1	8	
					МТ-22-2			

Як тверде паливо застосовували суміш коксового дріб'язку та антрацитового штибу у масовому співвідношенні один до одного. Такий склад паливної суміші забезпечував необхідні теплотехнічні характеристики процесу. Хімічний та гранулометричний склад вихідних шихтових матеріалів наведено у таблицях 3.1.1 та 3.1.2. Підготовка шихти до спікання здійснювалася за регламентованою методикою, що включала операції змішування, зволоження та огрудкування компонентів. Попередньо зважені матеріали пошарово завантажували до змішувального барабана закритого типу діаметром 700 мм і довжиною 1200 мм. Інтенсивне перемішування виконували протягом двадцяти хвилин при швидкості обертання барабана 24 оберти за хвилину, що забезпечувало рівномірний розподіл компонентів у загальній масі шихти.

Після завершення змішування отриману суміш зволожували на металевому листі до досягнення заданого рівня відносної вологості. Зволожену шихту ретельно перемішували для забезпечення однорідності розподілу вологи, після чого здійснювали процес огрудкування у тому ж барабанному агрегаті протягом однієї хвилини. Такий режим дозволяв сформувати гранульовану структуру шихти з достатньою механічною міцністю та рівномірним розподілом вологи в об'ємі гранул.

Підготовлену огрудковану шихту зважували та завантажували до агломераційної чаші. У всіх експериментальних серіях застосовували постіль, сформовану з придатного агломерату фракції 10–20 мм, який попередньо виділяли шляхом розсіву. Середня висота шару постелі становила приблизно 15 мм, що створювало сприятливі умови для рівномірного проходження газового потоку через шар шихти та стабілізації процесу спікання.

У ході проведення експериментів здійснювався систематичний контроль основних технологічних параметрів процесу. Температуру відхідних газів під колосниковими ґратами реєстрували автоматично, тоді як величину розрідження у вакуум-камері фіксували через кожну хвилину. Схема лабораторної установки наведена на рисунку 3.1.1.

Момент завершення процесу спікання визначали за досягненням максимальної температури відхідних газів, що фіксувалася за допомогою термопари та потенціометра типу ЕПП-09. Під час визначення загальної тривалості процесу враховували також час, витрачений на запалювання шихти, який становив одну хвилину.

Після завершення спікання вимірювали висоту сформованого агломераційного пирога. Далі агломерат вивантажували на металевий профіль, після чого пиріг розколювали вздовж осі на три-чотири частини. Отриманий матеріал залишали для природного охолодження на відкритому повітрі приблизно протягом тридцяти хвилин, що забезпечувало зниження температури агломерату приблизно до 100 °С та створювало умови для подальшого проведення механічного аналізу. Продуктивність лабораторної агломераційної установки оцінювали за двома показниками: за кількістю отриманого спеченого продукту та за масою придатного агломерату. У першому випадку показник продуктивності визначали шляхом віднесення маси утвореного спеку до площі спікання та тривалості процесу. У другому випадку продуктивність за придатним агломератом встановлювали з урахуванням частки кондиційного продукту, тобто виходу придатної фракції, яка визначалася після розсіву агломерату.

Таблиця 3.1.1 – Хімічний склад складників агломераційної шихти

Складники агломераційної шихти	Склад, %									
	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	M	Al ₂ O ₃	P	S	C _T
Магнетитовий концентрат	65,0	27,6	62,2	8,5	0,04	0,92	0,13	0,036	0,02	-
Агломераційна руда	53,0	0,7	75,0	17,0	0,7	0,3	3,8	0,05	0,046	-
Доломітезовани й вапняк	1,2	-	1,7	1,46	45,5	7,5	0,13	-	-	-
Коксовий дріб'язок (зола A ^c =12,6%)	8,0	-	11,4	43,0	6,1	1,4	22,0	0,17	2,0	-
Антрацитовий штиб	6,0	-	8,6	49,2	3,2	1,2	22,5	0,06	2,0	-

Таблиця 3.1.2 – Технічний аналіз палива

Вид палива	Склад, %				
	A ^c	V ^c	S ^c	C _{нел}	W ^p
Коксовий дріб'язок	12,6	4,4	2,0	81,2	2,0
Антрацитовий штиб	17,0	3,5	2,0	77,6	4,6

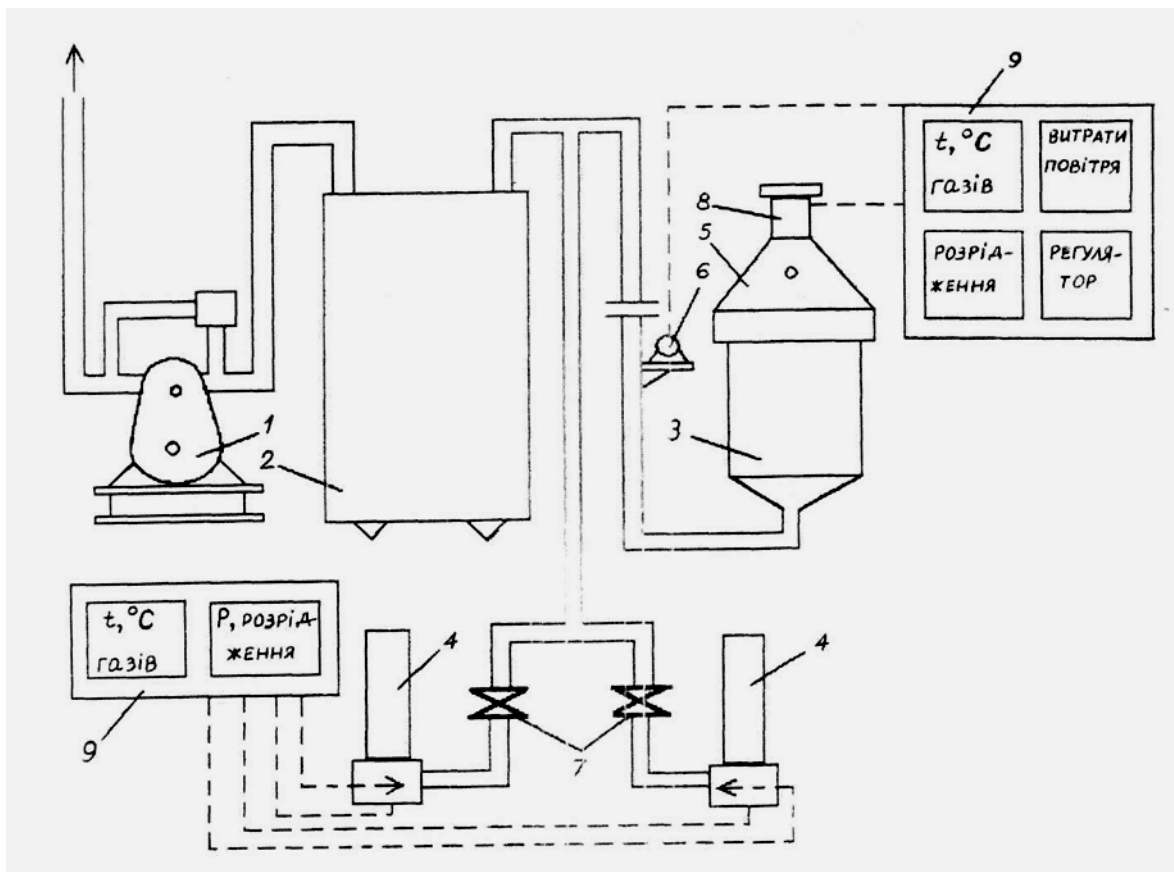


Рис.3.1.1. Схема лабораторної агломераційної установки:

1 - газодувка; 2- скруббер; 3- аглочаша 0,1 м ; 4- аглочаша $\phi = 100$ мм; 5- газовий пальник; 6- регулятор; 7- вентиль; 8- вимірювальна шайба; 9- щит КВП.

3.2. Методичні підходи до визначення металургійних властивостей агломерату.

Однією з найважливіших вимог до якості залізорудної складової доменної шихти є забезпечення оптимального гранулометричного складу матеріалів, що завантажуються до доменної печі. Зокрема, у складі шихтових матеріалів практично не допускається наявність фракції крупністю менше 5 мм. Найбільш раціональний діапазон крупності шматків залізорудної сировини — до якої належать руда, агломерат та окатиші — становить приблизно 10–40 мм, оскільки саме такий гранулометричний склад забезпечує сприятливі умови для проходження

газового потоку крізь шихтовий стовп і стабільність газодинамічного режиму в доменній печі.

Наявність значної кількості дрібної фракції у складі шихтових матеріалів негативно впливає на перебіг доменного процесу. Тому дріб'язок повинен бути ретельно видалений під час підготовки матеріалів, щоб його вміст у скіпах, які подаються до доменної печі, не перевищував 3–5 % за масою. Механічна стійкість агломерату до руйнування під час транспортування, перевантаження та завантаження у доменну піч характеризується показником так званої холодної міцності.

Разом з тим у реальних умовах доменного процесу шматки залізорудної сировини зазнають додаткового руйнування внаслідок впливу підвищених температур, відновлювального газового середовища та значних механічних навантажень, зумовлених тиском стовпа шихтових матеріалів. У процесі нагрівання та відновлення структура агломерату послаблюється, що призводить до подальшого дроблення матеріалу та утворення додаткової дрібної фракції. Особливу небезпеку становить дрібнодисперсний матеріал, який утворюється безпосередньо в доменній печі, оскільки він не може бути попередньо відсіяний і видалений зі складу шихти. Здатність шматків руди, агломерату та окатишів зберігати цілісність у цих умовах характеризується показником гарячої міцності.

Визначення холодної міцності агломерату здійснювали методом стандартних барабанних випробувань відповідно до вимог державного стандарту, а також із застосуванням барабана конструкції Рубіна. У стандартному варіанті випробувань пробу матеріалу визначеної крупності завантажували до обертового барабана глухого типу, який обертвся з постійною частотою протягом встановленого часу. Барабан мав діаметр один метр і ширину пів метра. На внутрішній поверхні його циліндричної частини були закріплені сталеві куточки, розташовані симетрично по діаметру барабана, що забезпечувало інтенсивну дію ударних і абразивних навантажень на матеріал у процесі обертання.

Під час випробування пробу агломерату масою приблизно 15 кг, попередньо відібрану у відповідному гранулометричному інтервалі, піддавали механічному впливу внаслідок багаторазового піднімання і падіння шматків матеріалу всередині барабана. Тривалість досліду становила вісім хвилин, що відповідало приблизно двомстам обертам барабана. Після завершення випробування матеріал піддавали розсіву для визначення кількості фракцій різної крупності. Показником механічної міцності агломерату вважали частку матеріалу крупністю більше 5 мм, тоді як кількість фракції менше 5 мм характеризувала ступінь стирання та руйнування матеріалу під час випробування.

Альтернативним методом оцінювання холодної міцності є випробування у барабані конструкції П.Г. Рубіна. У цьому випадку використовується барабан діаметром 1000 мм і шириною 600 мм, на внутрішній поверхні якого розміщені три полиці, розташовані під кутом 120° одна до одної. Така конструкція створює більш інтенсивний механічний вплив на зразки під час обертання барабана. Для проведення випробування використовували пробу агломерату масою близько 20 кг із фракцією крупністю 25–100 мм. Барабан обертали зі швидкістю приблизно 25 обертів за хвилину протягом чотирьох хвилин. Після завершення досліду матеріал піддавали розсіву, а показником міцності вважали кількість утвореної дрібної фракції крупністю менше 5 мм.

Оцінювання гарячої міцності агломерату, руди та окатишів здійснювали відповідно до вимог державного стандарту шляхом проведення випробувань у спеціальній установці з обертовим барабаном, розміщеним у високотемпературній печі. Під час досліду через робочий простір установки безперервно подавали газову суміш відновлювального складу, що містила оксид вуглецю, азот і незначну кількість діоксиду вуглецю. Такий газовий склад моделював умови відновлювального середовища, характерного для верхніх зон доменної печі.

Температурний режим випробування формували поступово. Спочатку температуру в печі підвищували до приблизно 600 °С із відносно високою швидкістю нагрівання, після чого нагрівання продовжували значно повільніше до

досягнення кінцевої температури близько 800 °С. Загальна тривалість дослідів становила понад три години.

Барабан випробувальної установки мав відносно невеликі розміри — приблизно 145 мм у діаметрі та 500 мм у довжину — і був обладнаний чотирма внутрішніми полицями, що забезпечували перемішування та механічне навантаження на матеріал під час обертання. У процесі дослідів барабан оберталося з частотою близько десяти обертів за хвилину протягом усього періоду випробування. На завершальній стадії дослідів, після вимкнення електропечі, вміст барабана додатково охолоджували потоком газу до температури приблизно 400–500 °С.

Після завершення випробування отриманий матеріал піддавали гранулометричному аналізу. Основними показниками гарячої міцності вважали частку матеріалу, що зберіг крупність більше 10 мм, кількість середньої фракції крупністю приблизно від 0,5 до 5 мм, а також вміст дрібнодисперсного пилоподібного матеріалу крупністю менше 0,5 мм. Початкова проба для проведення випробувань мала масу близько 500 г і складалася з частинок розміром приблизно 10–15 мм. Саме співвідношення зазначених фракцій після термомеханічного впливу дозволяло оцінити здатність агломерату зберігати структурну цілісність у умовах, максимально наближених до реальних параметрів доменного процесу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.03.МД	анк
	Анк	№ докум	підпис	дат		з

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1. Дослідження впливу комплексу технологічних чинників на властивості агломераційної шихти.

Аналіз виробничого досвіду функціонування агломераційних фабрик України, а також результати експериментальних досліджень структури та фізико-хімічних характеристик агломераційного пирога по висоті та ширині спікального візка свідчать про наявність суттєвої неоднорідності властивостей сформованого агломерату. Подібна неоднорідність обумовлена, передусім, нерівномірним просторовим розподілом окремих компонентів у об'ємі шихти, що піддається спіканню. У свою чергу, ця обставина значною мірою визначає варіацію гранулометричних, механічних і термохімічних характеристик агломераційного матеріалу на різних ділянках шару.

Численні експериментальні та теоретичні дослідження, присвячені оптимізації процесів підготовки агломераційної шихти, показують, що подальше вдосконалення технологічних операцій змішування та огрудкування доцільно здійснювати не шляхом збільшення геометричних параметрів змішувального обладнання, а шляхом підвищення ефективності функціонування існуючих агрегатів. Практичний досвід експлуатації барабанних змішувачів і огрудкувачів свідчить про те, що подальше збільшення їхніх габаритних розмірів не забезпечує суттєвого покращення однорідності шихтової суміші. Це пояснюється складною кінематикою руху сипких матеріалів у барабанах, що обертаються.

Під час взаємодії зернистого матеріалу зі стінками стандартного барабанного змішувача відбувається часткове прослизання частинок уздовж внутрішньої поверхні барабана.

Одночасно у шарі матеріалу виникають процеси сегрегації, пов'язані з відмінностями у щільності, розмірах та формі частинок різних компонентів шихти.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.04.ЕДЧ			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- ДОСЛІДНА ЧАСТИНА			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв							
						Пімен	Анквн	Анквннв
							1	40
						МТ-22-2		

У наслідок цього в об'ємі рухомого шару відбувається перерозподіл частинок за висотою та радіусом барабана, що призводить до формування локальних зон із різним співвідношенням компонентів.

З метою кількісної оцінки зазначених явищ, а також для встановлення характеру впливу конструктивних параметрів барабана, що обертається, на поведінку сипкого середовища та ефективність роботи змішувальних агрегатів у лабораторії кускування НКГОКа було проведено спеціальний комплекс експериментальних досліджень. У межах цих досліджень також було виконано якісну та кількісну оцінку зміни часу перебування окремих компонентів у зоні змішування та їхнього співвідношення у кінцевому складі суміші. Особливу увагу приділяли вивченню впливу підпірної перегородки, встановленої у звичайному барабанному змішувачі, на інтенсивність перемішування та характер руху матеріалу.

Кількісне визначення параметрів руху сипкого матеріалу у поперечному перерізі барабана, що обертається, здійснювали на лабораторному змішувачі, конструкція якого включала горизонтально розташований барабан розмірами приблизно 0,35 м у довжину та 0,125 м у діаметрі. Для забезпечення можливості безпосереднього візуального спостереження за переміщенням частинок одна з торцевих стінок барабана була виконана з прозорого матеріалу. Схематичне зображення експериментальної установки наведено на рисунку 1.

Методика лабораторних досліджень передбачала визначення параметрів переміщення спеціальних індикаторних частинок, які вводилися до рухомого шару матеріалу визначеного об'єму. Об'єм завантаження барабана задавався таким чином, щоб забезпечити певний ступінь його заповнення, характерний для промислових умов роботи змішувачів.

Для забезпечення коректності порівняльного аналізу використовувалися сипкі матеріали з вузькими інтервалами крупності. Зокрема, досліджувалися фракції з розміром частинок приблизно 8–5 мм, 5–3 мм та менше 3 мм. Додатково вивчався вплив вологості матеріалу на характер руху частинок у шарі, оскільки

зміна вологості істотно впливає на сили міжчастинкової взаємодії та, відповідно, на кінематичні параметри руху зернистого середовища.

Кількісне визначення положення окремих компонентів шихти у циркулюючому зернистому шарі здійснювали шляхом вимірювання глибини занурення індикаторної частинки у матеріал під час її підйому разом із шаром, що рухається. Відлік положення індикатора проводили відносно внутрішньої поверхні стінки барабана, яку приймали за початкову точку координат. Такий підхід дозволяв визначити характер переміщення частинок у поперечному перерізі барабана та встановити закономірності формування циркуляційних потоків у зернистому середовищі.

Для кількісної оцінки ступеня прослизання зернистого матеріалу відносно внутрішньої поверхні барабана, що обертається, використовували спеціальний показник, який характеризує співвідношення між амплітудою коливального переміщення індикаторної частинки у поперечному перерізі шару та довжиною шляху, який проходить поверхня барабана за той самий інтервал часу. Іншими словами, цей показник відображає, наскільки реальний рух частинок у шарі відрізняється від руху, який би відбувався за умов повного зчеплення матеріалу зі стінкою барабана.

Амплітудою коливального руху індикатора вважали величину переміщення індикаторної частинки у поперечному перерізі шару під час її циркуляції разом із зернистим матеріалом. Другий параметр характеризував довжину шляху, яку проходить внутрішня поверхня барабана протягом одного циклу такого коливального переміщення індикатора. Співвідношення цих двох величин дозволяло оцінити ступінь взаємодії між зернистим матеріалом і стінкою барабана, а також інтенсивність прослизання частинок у процесі обертання змішувача.

Отримані експериментальні дані дали змогу встановити характер руху зернистого середовища у барабані, що обертається, а також оцінити ефективність роботи змішувального обладнання з точки зору забезпечення однорідності агломераційної шихти та рівномірності розподілу її компонентів.

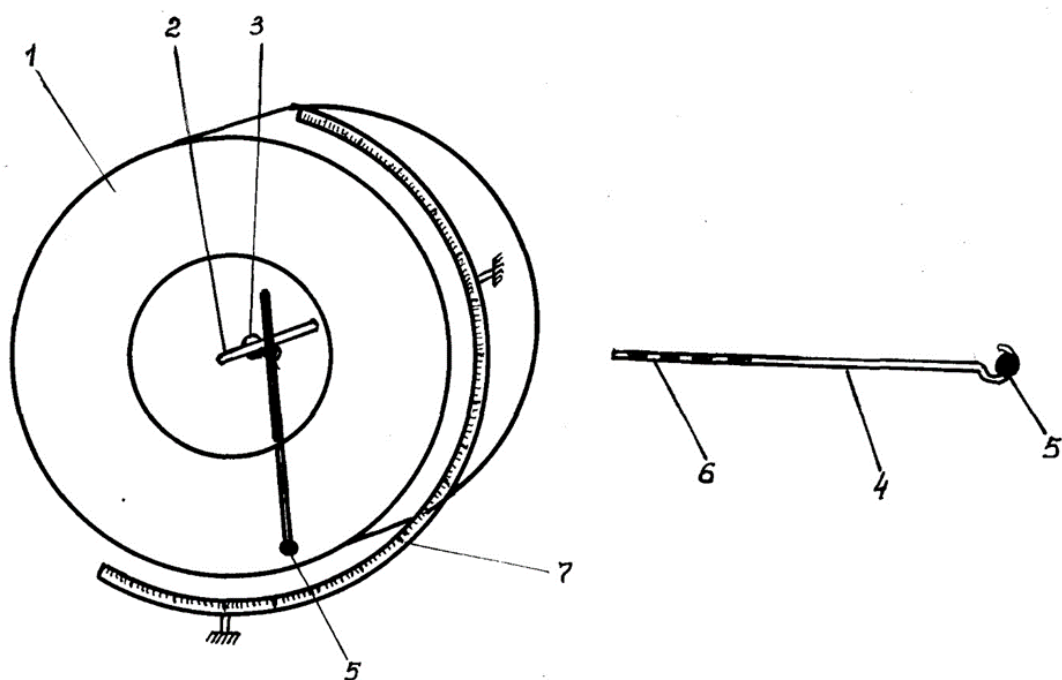


Рис. 4.1.1. Схема лабораторної установки змішувача:

1 – барабан; 2 – вісь; 3 – сережка; 4 – куліса; 5 – індикатор; 6 – шкала індикатора; 7 – шкала барабана.

У зв'язку з тим, що кінематичні характеристики руху окремих частинок у зернистому середовищі, яке циркулює в барабані, що обертається, визначаються суттєвою асиметрією часових параметрів фаз підйому та подальшого падіння частинок, під час аналізу їхнього коливального переміщення було враховано, що тривалість переміщення частинки разом із підйомною гілкою циркуляційного потоку перевищує час її вільного падіння в зоні розвантаження. З огляду на це при аналітичній інтерпретації параметрів коливального руху індикаторних частинок впливом фази падіння знехтували, що дозволило спростити розрахункову схему без істотного зниження достовірності кількісної оцінки кінематичних характеристик зернистого шару.

Ефективність процесу змішування, який у реальних умовах функціонування барабанних змішувально-огрудкувальних агрегатів супроводжується зміною

просторового співвідношення окремих компонентів шихтової суміші, досліджували на модельній системі, сформованій із матеріалів, що відрізнялися як за фізичною густиною, так і за гранулометричними характеристиками. У якості базових компонентів використовували агломераційну руду фракції приблизно 9–3 мм та тверде паливо — коксовий дріб'язок крупністю менше 3 мм. Початкове масове співвідношення аглоруди та твердого палива становило приблизно 90:10, що відтворює типовий склад агломераційної шихти, характерний для умов промислової підготовки матеріалів до процесу спікання.

Підготовлену суміш завантажували до лабораторного барабанного змішувача, геометричні параметри якого становили приблизно 130 мм у діаметрі та 300 мм у довжину. Процес змішування здійснювали за умов обертання барабана зі швидкістю близько 24 обертів за хвилину, що забезпечувало формування стійкого циркуляційного режиму переміщення зернистого матеріалу в робочому об'ємі агрегату. У ході експерименту після досягнення стаціонарного режиму руху, за якого співвідношення аглоруди та твердого палива у матеріалі, що надходив до змішувача, практично дорівнювало їхньому співвідношенню у матеріалі, який залишав робочий об'єм барабана, проводили повний відбір суміші з подальшим гранулометричним аналізом. Розділення компонентів здійснювали методом розсіву на ситі з розміром комірок приблизно 3 мм, що дозволяло відокремити крупнішу аглорудну фракцію від дрібнішого паливного компоненту.

З метою визначення часу перебування частинок окремих компонентів у зоні змішування використовували спеціальні індикаторні частинки, які вводилися до шихтової суміші на початковій стадії експерименту. Реєстрація переміщення цих індикаторів у процесі циркуляції зернистого шару дозволяла оцінити середню тривалість перебування частинок аглоруди та твердого палива у робочому об'ємі змішувача, а також встановити відмінності у кінематичних режимах руху компонентів, що характеризуються різними фізико-механічними властивостями.

Для оцінки впливу конструктивних елементів барабанного змішувача на характер перерозподілу компонентів шихти у процесі їх переміщення в робочому

об'ємі агрегату було проведено серію експериментів із використанням підпирних перегородок, які встановлювали у розвантажувальній зоні барабана. Застосування таких елементів дозволяло модифікувати гідродинамічні умови руху зернистого середовища та здійснювати вибірковий відбір суміші з різних ділянок потоку. Площа встановлюваних перегородок становила приблизно 5, 10 та 20 % від площі поперечного перерізу барабана. Зміна цього параметра дозволяла дослідити вплив ступеня часткового перекриття потоку матеріалу на середній час перебування компонентів у зоні змішування та на їхнє співвідношення у суміші, що вивантажується з барабана.

Отримані результати експериментальних досліджень дали можливість встановити характерні закономірності переміщення компонентів агломераційної шихти у барабані, що обертається, а також оцінити ступінь сегрегації матеріалів, які відрізняються за густиною та гранулометричним складом.

4.2. Промислове дослідження впливу конструктивних параметрів огрудкувача на ефективність роботи агломераційних машин та обсяги виробництва агломерату на аглофабриці.

Проблема оптимізації конструктивних параметрів змішувально-огрудкувальних агрегатів, призначених для підготовки агломераційної шихти до процесу спікання, є одним із ключових напрямів підвищення ефективності агломераційного виробництва. Пошук технічних рішень, здатних забезпечити більш інтенсивне перемішування компонентів шихти, зменшення ступеня їхньої сегрегації та підвищення однорідності гранульованої структури матеріалу, зумовив застосування на агломераційній фабриці Південного гірничо-збагачувального комбінату кількох конструктивних різновидів барабанних змішувачів-огрудкувачів.

Зокрема, у виробничих умовах підприємства експлуатувалися три основні типи барабанних агрегатів: традиційні циліндричні барабани з гладкою внутрішньою поверхнею, барабани, оснащені внутрішніми колосниковими елементами, а також модифіковані барабани, обладнані кільцевими підпирними

пристроями, що створюють додаткові зони затримки матеріалу та сприяють підвищенню інтенсивності його перемішування. Конструктивні особливості зазначених агрегатів наведено на відповідних схемах (рис. 4.2.1 та 4.2.2).

З метою визначення найбільш раціональної конструкції огрудкувача-змішувача було організовано комплекс промислових досліджень на агломераційній фабриці ПГЗК. У межах цих досліджень здійснювали порівняльний аналіз технологічних показників роботи агломераційних машин, обладнаних різними типами змішувально-огрудкувального устаткування.

Зокрема, було проаналізовано роботу агломераційних машин №1 та №2 аглофабрики №1, на яких використовувалися стандартні барабанні змішувачі традиційної конструкції. Для порівняльної оцінки також досліджували технологічні параметри роботи агломераційних машин №4 та №5 аглофабрики №2, де застосовувалися як типові барабанні агрегати, так і модернізовані огрудкувачі, оснащені кільцевими підпірними елементами. Схематичні зображення зазначених конструкцій наведені на рисунках 4.2.2 та 4.2.3.

Проведені промислові дослідження дозволили встановити вплив конструктивних особливостей огрудкувачів-змішувачів на характер підготовки агломераційної шихти, рівномірність розподілу її компонентів, стабільність технологічного режиму роботи агломераційних машин, а також на кількісний вихід придатного агломерату, отриманого в результаті спікання. Отримані результати стали основою для подальшої оцінки ефективності різних конструкцій змішувально-огрудкувальних агрегатів та визначення напрямів удосконалення технології підготовки агломераційної шихти у промислових умовах.

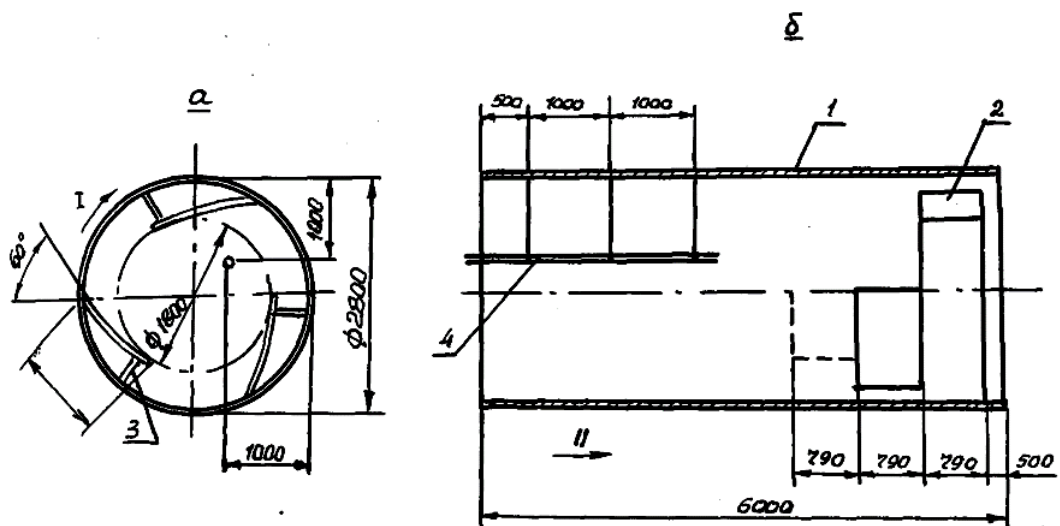


Рис.4.2.1. Схема лопатевого змішувача.

1-барабан; 2-лопасти; 3-опори лопатей; 4-система зволоження; I-направлення руху шихти; а)- вигляд з торця змішувача. б) - подовжній розріз змішувача.

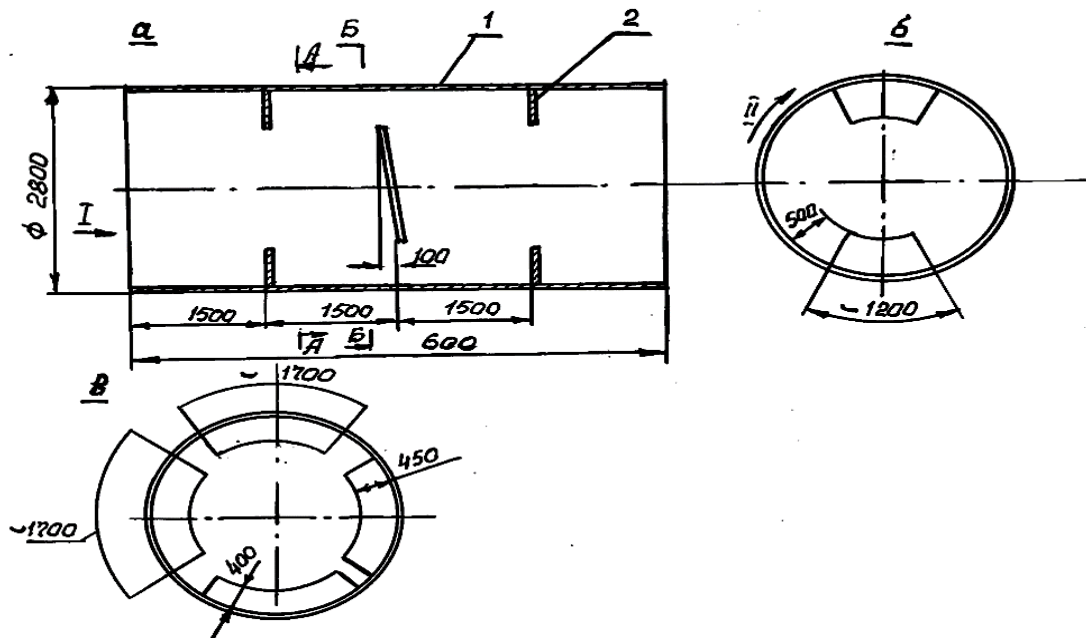


Рис. 4.2.2. Схема, змішувача з кільцевими підпірними елементами.

1-барабан; 2-кільцеві елементи; II - напрям руху матеріалу; III-напрямок обертання барабану: а-продольний перетин змішувача; б-перетин А-А; в - перетин Б-Б.

Оцінювання ефективності процесу огрудкування агломераційної шихти здійснювали шляхом порівняльного гранулометричного аналізу матеріалу, відібраного на різних стадіях технологічного циклу — безпосередньо перед надходженням до огрудкувального агрегату та після завершення процесу огрудкування. Відібрані проби піддавали розсіву з метою визначення їхнього гранулометричного складу, що дозволяло встановити характер змін розподілу частинок за крупністю внаслідок дії механізмів гранулоутворення у барабанному огрудкувачі.

З метою детальнішої оцінки структурної стійкості сформованих гранул фракції кожного гранулометричного класу додатково піддавали випробуванням на механічну міцність. Для цього використовували лабораторний ребристий барабан діаметром приблизно 220 мм, який забезпечував інтенсивну дію ударно-абразивних навантажень на гранули у процесі його обертання. Частота обертання барабана становила близько 40 обертів за хвилину. Для кожного випробування формували навішування масою приблизно 500 г, а тривалість впливу механічного навантаження складала дві хвилини. Така методика дозволяла оцінити здатність гранул різної крупності зберігати структурну цілісність під дією механічних факторів, характерних для процесів транспортування та завантаження шихти.

Швидкість фільтрації повітряного потоку крізь шар агломераційної шихти визначали експериментально за допомогою анемометра, змонтованого у спеціальній сушильній підставці. Вимірювальний прилад встановлювали у центральній частині спікального візка, що забезпечувало отримання репрезентативних значень швидкості газового потоку, характерних для умов проходження повітря через шар шихтового матеріалу під час процесу спікання.

Вміст дрібної фракції крупністю менше 5 мм, а також механічну міцність агломерату, отриманого на агломераційних машинах №1 та №2 аглофабрики №1, визначали на основі результатів періодичних разових відборів проб, які здійснювали відповідно до вимог чинних державних стандартів. Для цього агломерат, що надходив із хоперів, розвантажували у траншею складського

відділення, де матеріал витримувався протягом приблизно однієї доби. Після завершення періоду зберігання агломерат за допомогою грейферного крана завантажували у залізничні вагони.

У процесі виконання досліджень відбір крупногабаритних проб масою приблизно 1,5–1,6 т здійснювали також із використанням грейферного крана. Такий підхід дозволяв отримати достатньо репрезентативні проби матеріалу, що відображали реальний гранулометричний склад агломерату, сформованого у виробничих умовах.

Гранулометричний склад агломераційної шихти визначали після відбору проб безпосередньо з тарілчастих живильників та човникових розподільників шихти, які забезпечують рівномірний розподіл матеріалу по поверхні спікального візка. Подальший аналіз відібраних зразків дозволяв встановити характер розподілу частинок за крупністю на стадії подачі шихти до агломераційної машини та оцінити вплив попередніх технологічних операцій підготовки матеріалу на формування гранулометричної структури шару.

Таблиця 4.2.1 – Вплив конструкції змішувачів на якість гранульованої шихти

№\ № машин	Тип змішувача - окомкователя	Вихід класів, мм, %				
		>9,0	5-9,0	3,0-5,0	1,6-3,0	<1,6
1	типовий	21,4	23,7	20,4	26,5	8,0
2	з лопатями	15,6	24,3	34,6	21,2	4,3
4	типовий	24,3	25,3	28,6	14,4	7,4
5	з підпірними кільцями	18,9	27,3	24,3	23,4	6,1

Аналіз результатів гранулометричного розсіву, представлених у таблиці 4.2.1, свідчить про істотне підвищення ефективності підготовки агломераційної шихти при використанні лопатевого змішувача-огрудкувача порівняно з типовими барабанними змішувачами. Зокрема, частка некондиційної дрібної фракції (<1,6 мм) у шихті, обробленій лопатевим агрегатом, виявилася на 3,61 % нижчою, ніж у суміші, підготовленій у стандартному змішувачі. При цьому, коли шихту

підготовлювали у змішувачі-огрудкувачі, оснащеному кільцевими підпірними елементами, вміст дрібної фракції зменшувався на 1,34 % порівняно з типовим варіантом.

У обох варіантах модернізованого огрудкування зниження частки некондиційної дрібної фракції супроводжувалося пропорційним збільшенням виходу інших гранулометричних класів у складі гранульованої шихти, що свідчить про більш рівномірний розподіл частинок та підвищення однорідності матеріалу.

Додатково, результати випробувань гранул на механічну міцність узагальнені у таблиці 4.2.2, де наочно відображено вплив конструктивних особливостей змішувачів-огрудкувачів на здатність гранул протистояти механічним навантаженням, характерним для транспортування та подальшого спікання агломерату. Ці дані дозволяють зробити висновок про тісний зв'язок між гранулометричною структурою шихти та її механічною стійкістю, а також про важливість конструктивної оптимізації огрудкувальних агрегатів для підвищення якості підготовки агломераційного матеріалу.

Таблиця 4.2.2 – Вплив конструкції змішувача на міцність окремих фракцій озерненої шихти

№\ № машин	Тип змішувача	Велика класів, мм							
		>9,0		5-9,0		3,0-5,0		1,6-3,0	
		Вихід класу-1,6	К-ть не разр. гранул	Вихід класу-1,6	К-ть не разр. гранул	Вихід класу-1,6	К-ть не разр. гранул	Вихід класу-1,6	К-ть не разр. гранул
2	лопастной	28,8	55,4	1,0	89,0	8,0	78	18,0	82,0
1	типовий	32,0	52,0	6,4	83,6	8,0	80,0	30	70
5	типовий	20,6	39,0	5,2	64,6	8,4	70,8	32,0	68,0
4	з підпірними кільцями	22,6	37,6	5,0	65,0	12,0	67,2	41,9	58,2

Згідно з узагальненими експериментальними даними, наведеними у табл. 4.2.2, встановлено, що застосування лопатевого змішувача-огрудкувача на стадії

підготовки шихтових матеріалів сприяє суттєвому підвищенню міцнісних характеристик сформованих гранул порівняно з аналогічними показниками, отриманими під час використання типового грануляційного обладнання. Зокрема, частка гранул фракційного класу 3–1,6 мм, які зберігають структурну цілісність після механічного впливу, зростає приблизно на 17 %, що свідчить про інтенсифікацію процесів ущільнення та агрегації частинок у шихтовій масі.

Водночас експлуатація змішувача-огрудкувача, конструктивно оснащеного підпірними елементами, характеризується дещо нижчим рівнем ефективності гранулоутворення: вихід незруйнованих гранул зазначеного фракційного інтервалу в цьому випадку становить близько 14,4 %. Це може бути зумовлено специфікою гідродинамічного режиму перемішування та особливостями механічного впливу робочих органів на шихтову масу, що визначає інтенсивність процесів агломерації та зміцнення гранульованих структур.

Експериментальні результати, що характеризують тривалість перебування шихтового матеріалу в огрудкувачах різних конструктивних типів, систематизовано та наведено у табл. 4.2.3 і 4.2.4. Ці дані дозволяють кількісно оцінити вплив конструкційних особливостей апаратів на кінетику процесу огрудкування та сформулювати уявлення про характер перебігу грануляційних перетворень у досліджуваних технологічних умовах.

Таблиця 4.2.3 – Час перебування індикаторів в лопатевому змішувачі і типовому

Конструкція змішувачів	Індикатори	Час перебування в змішувачі, с.	Середнє значення, с
Лопастной	Вапняк 45-30мм	135,140,145	140
	Аглоруда 9-5,0 мм	180,175	178
	Вапняк 9-5,0 мм	140,145,150	145
Типовий	Вапняк 45-30 мм	135,135	135
	Аглоруда 9-5,0 мм	155,165	160

Таблиця 4.2.4 – Час перебування індикаторів в змішувачі з підпірними кільцями і типовому

Конструкція змішувачів	Індикатори	Час проходження, с	Середнє значення, з
З кільцями підпірними елементами	Кокс 8-5,0 мм	135,150,173	153
	Аглоруда 8-5,0 мм	150,160,165,172	163
Типовий	Кокс 8-5,0 мм	138,152	145
	Аглоруда 8-5,0 мм	125,130,133,135,138,141,145,165,169,149	148

Аналіз експериментальних результатів, систематизованих у табл. 4.2.3, свідчить про те, що наявність лопатевих робочих органів істотно впливає на тривалість перебування шихтового матеріалу в робочому об'ємі змішувача. При цьому простежується чітко виражена тенденція до зростання часу утримання частинок у апараті зі зменшенням їх гранулометричних розмірів, що використовувалися як індикаторні фракції. Зокрема, для вапняку крупністю 45–30 мм різниця у тривалості перебування становить близько 5 с, тоді як для аглоруди фракційного інтервалу 9–5 мм цей показник зростає до 18 с. Отримані результати свідчать про те, що дрібнодисперсні компоненти шихти піддаються більш інтенсивному перемішуванню та довше утримуються в зоні активного механічного впливу лопатей.

Водночас аналіз даних, наведених у табл. 4.2.4, демонструє, що застосування змішувача-огрудкувача, конструктивно оснащеного кільцевими підпірними елементами, також спричиняє збільшення тривалості перебування шихти в апараті порівняно з типовими агрегатами. За результатами вимірювань, цей приріст становить у середньому від 8 до 26 с. Підвищення часу перебування матеріалу в лопатевому барабані, а також у барабані з кільцевими підпірними елементами, може бути частково пояснене зміною гідродинамічного режиму руху шихтової маси, що сприяє інтенсифікації процесів перемішування, ущільнення та гранулоутворення. У свою чергу, це позитивно позначається на якості підготовки агломераційної шихти та підвищенні міцності сформованих гранул.

Експериментальні дані, що характеризують зміну газопроникності агломераційної шихти за досліджуваних умов, наведені у табл. 4.2.5.

Таблиця 4.2.5 – Зміна швидкості фільтрації повітря в шарі аглошихти залежно від шихтопідготовки

Висота шару, мм	Швидкість фільтрації, м/с		
	Типовий змішувач	Змішувач з підпірними кільцями	Змішувач з лопатями
210	0,55	0,60	0,66
250	0,50	0,53	0,59
290	0,48	0,48	0,53

Поглиблений аналіз експериментальних результатів, систематизованих у табл. 4.2.5, свідчить про наявність чітко вираженої закономірності зміни газодинамічних характеристик агломераційної шихти залежно від конструктивних особливостей застосовуваного змішувально-огрудкувального обладнання. Зокрема, встановлено, що агломераційна шихта, підготовлена у лопатевому змішувачі за висоти сформованого шару 250 мм, характеризується більш сприятливими показниками газопроникності порівняно з матеріалом, підготовленим у типовому змішувальному агрегаті за ідентичних технологічних умов. Кількісна оцінка зазначеного ефекту демонструє зростання газопроникності приблизно на 6 %, що, імовірно, обумовлено формуванням більш упорядкованої гранульованої структури шихтового шару та підвищенням рівня структурної стабільності утворених гранул.

Разом із тим встановлено, що за аналогічних умов ведення процесу шихта, підготовлена у змішувачі-огрудкувачі, оснащеному кільцевими підпірними елементами, також демонструє покращення газопроникності, проте інтенсивність цього ефекту є дещо нижчою і становить близько 5,2 %. Подібна відмінність може бути зумовлена специфікою механізму взаємодії частинок шихтового матеріалу з робочими органами апарата, а також характером формування внутрішньосферного порового простору, який визначає газодинамічну проникність агломераційного шару.

Сукупність отриманих експериментальних результатів дозволяє зробити узагальнений висновок про те, що рівень ефективності підготовки агломераційної шихти в умовах використання лопатевого змішувача є вищим, ніж у випадку застосування змішувача, обладнаного кільцевими підпірними елементами. Такий висновок підтверджується не лише аналізом показників газопроникності, але й результатами ситового аналізу гранулометричного складу підготовленої шихти, оцінкою механічної міцності гранульованих утворень, а також узагальненими даними, наведеними у табл. 9. Встановлено, що поліпшення газодинамічних властивостей агломераційної шихти, сформованої у лопатевому змішувачі та у змішувачі з кільцевими підпірними елементами, супроводжується підвищенням якісних характеристик кінцевого продукту агломераційного процесу — агломерату. Водночас необхідно підкреслити, що використання лопатевих змішувачів забезпечує більш виражений позитивний ефект, що свідчить про вищу ефективність інтенсифікації процесів гранулоутворення та структурної стабілізації шихтового шару.

З метою комплексної оцінки експлуатаційних властивостей отриманого продукту було проведено випробування агломерату на механічну міцність, сформованого із шихти, підготовленої у лопатевому та типовому змішувачах. Випробування здійснювалися відповідно до вимог нормативного документа ГОСТ, що регламентує методику визначення міцнісних характеристик агломерату. За результатами проведених досліджень встановлено, що використання лопатевого змішувача на стадії підготовки шихтових матеріалів забезпечує підвищення виходу фракції агломерату розміром понад 5,0 мм з 60,1 до 61,6 %, що відповідає приросту приблизно на 1,5 %.

Додатково було виконано промислові дослідження, спрямовані на визначення разового вмісту дрібної фракції в агломераті, отриманому на агломераційних машинах №1 та №2, після його вивантаження у траншею складу агломерату, подальшого добового зберігання та наступного транспортування шляхом навантаження у вагони залізничного транспорту. Результати проведених

вимірювань засвідчили, що застосування лопатевих змішувачів у технологічній схемі підготовки шихти сприяє зниженню частки дріб'язку розміром менше 5 мм у середньому на 1,09 %, що є важливим фактором підвищення технологічної придатності агломерату для подальшого доменного переділу.

Подальша промислова експлуатація лопатевих елементів підтвердила стабільність отриманих результатів: встановлено, що сумарна кількість дрібної фракції в агломераті, перерахована на загальний обсяг виробництва, зменшилася приблизно на 0,2 %. Водночас результати візуального та технічного огляду внутрішніх поверхонь дослідних агрегатів продемонстрували, що гарнісажний шар формується рівномірно по всій поверхні лопатей, упорів та кільцевих конструктивних елементів. Сформований гарнісаж не порушує початкової геометричної конфігурації робочих органів і не призводить до зміни конструктивних параметрів обладнання, що свідчить про стабільність гідродинамічного режиму роботи агрегатів та їхню технологічну надійність у тривалому режимі експлуатації.

Таблиця 4.2.6 – Результати спікань аглошихти огрудкованої різними способами

№/№ п/п	Висота шаруюч и, мм	Час спікання, мін	Вихід придатно го %	Швидкість спікання, мм/мін	Питома продуктив ність, т/м2ч	Вихід класу після барабана %	
						>25,0 мм	<5,0 мм
Типовий змішувач							
1	270	10,2	76,0	26,5	1,52	13,4	21,4
Змішувач з кільцями							
2	270	9,4	80,1	28,7	1,66	9,8	18,0
Змішувач з лопатями							
3	270	8,7	82,4	31,0	1,78	7,6	17,4

Упродовж усього періоду промислової експлуатації змішувачів-огрудкувачів не зафіксовано жодних ознак деформаційних змін, викривлення або порушення

цілісності конструктивних вузлів кріплення лопатевих робочих органів і кільцевих елементів. Відсутність будь-яких деструктивних проявів у зазначених елементах конструкції свідчить про їхню достатню механічну жорсткість, конструкційну стійкість до динамічних навантажень та відповідність прийнятих технічних рішень умовам реальної експлуатації. Сукупність цих факторів дозволяє констатувати високий рівень експлуатаційної надійності досліджуваних змішувально-огрудкувальних агрегатів, а також їхню здатність забезпечувати стабільність технологічного процесу підготовки агломераційної шихти впродовж тривалого періоду роботи без погіршення конструкційно-функціональних характеристик обладнання.

4.3. Узагальнення та інтерпретація отриманих експериментальних результатів.

На рис. 4.3.1 та рис. 4.3.2 наведено експериментальні результати дослідження просторового розподілу зернистого матеріалу в поперечному перерізі обертового барабана. Узагальнення та інтерпретація отриманих даних засвідчують наявність виражених процесів сегрегації частинок, обумовлених відмінностями їхніх гранулометричних характеристик, а також щільності (масових параметрів) окремих компонентів шихтової суміші.

Проведений аналіз дозволяє встановити, що в умовах обертального руху барабана частинки різного розміру та густини схильні до просторового розшарування, внаслідок чого формується неоднорідна структура шихтового шару. При цьому більш крупні або важкі частинки мають тенденцію до локалізації в певних зонах поперечного перерізу, тоді як дрібніші фракції концентруються в інших ділянках шару. Подібний характер розподілу свідчить про домінування механізмів сегрегаційного перерозподілу матеріалу над процесами його інтенсивного перемішування.

Зазначені явища значною мірою зумовлені хаотичним, недостатньо керованим характером руху частинок у барабанах-змішувачах традиційної

конструкції, де переважають гравітаційні механізми пересипання і ковзання шару матеріалу. У результаті таких кінематичних умов ефективність масообміну між компонентами шихти виявляється обмеженою, що, у свою чергу, негативно позначається на ступені гомогенізації суміші.

Аналіз промислових даних також показує, що навіть суттєве збільшення конструктивної довжини змішувальних барабанів — до 8 і навіть до 11 м — не забезпечує принципового підвищення інтенсивності процесу змішування. Це свідчить про те, що сама кінематична схема руху матеріалу в барабанних змішувачах типової конструкції не створює достатніх передумов для ефективного руйнування сегрегаційних структур та формування однорідної шихтової суміші.

Таким чином, результати проведених досліджень підтверджують обмеженість змішувальної здатності традиційних барабанних агрегатів і обґрунтовують необхідність пошуку нових конструктивно-технологічних рішень, спрямованих на інтенсифікацію процесів перемішування та підвищення ступеня однорідності агломераційної шихти.

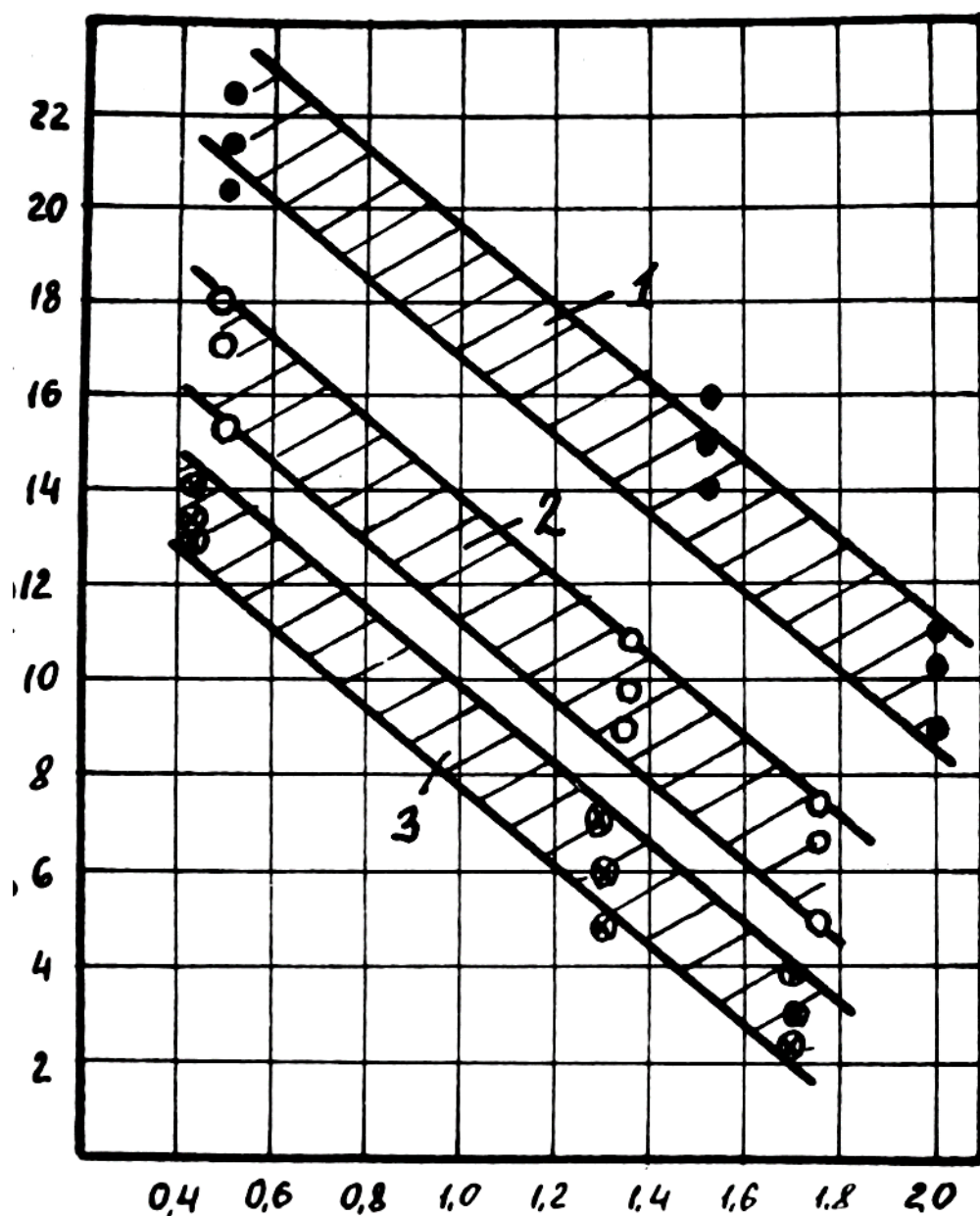


Рис. 4.3.1. Залежність глибини занурення індикатора від насипної ваги компонентів шихти при русі їх в поперечному перетині барабана, що обертається.

1 – крупність 8–5 мм; 2 – крупність 5–3 мм; крупність 3–0 мм.

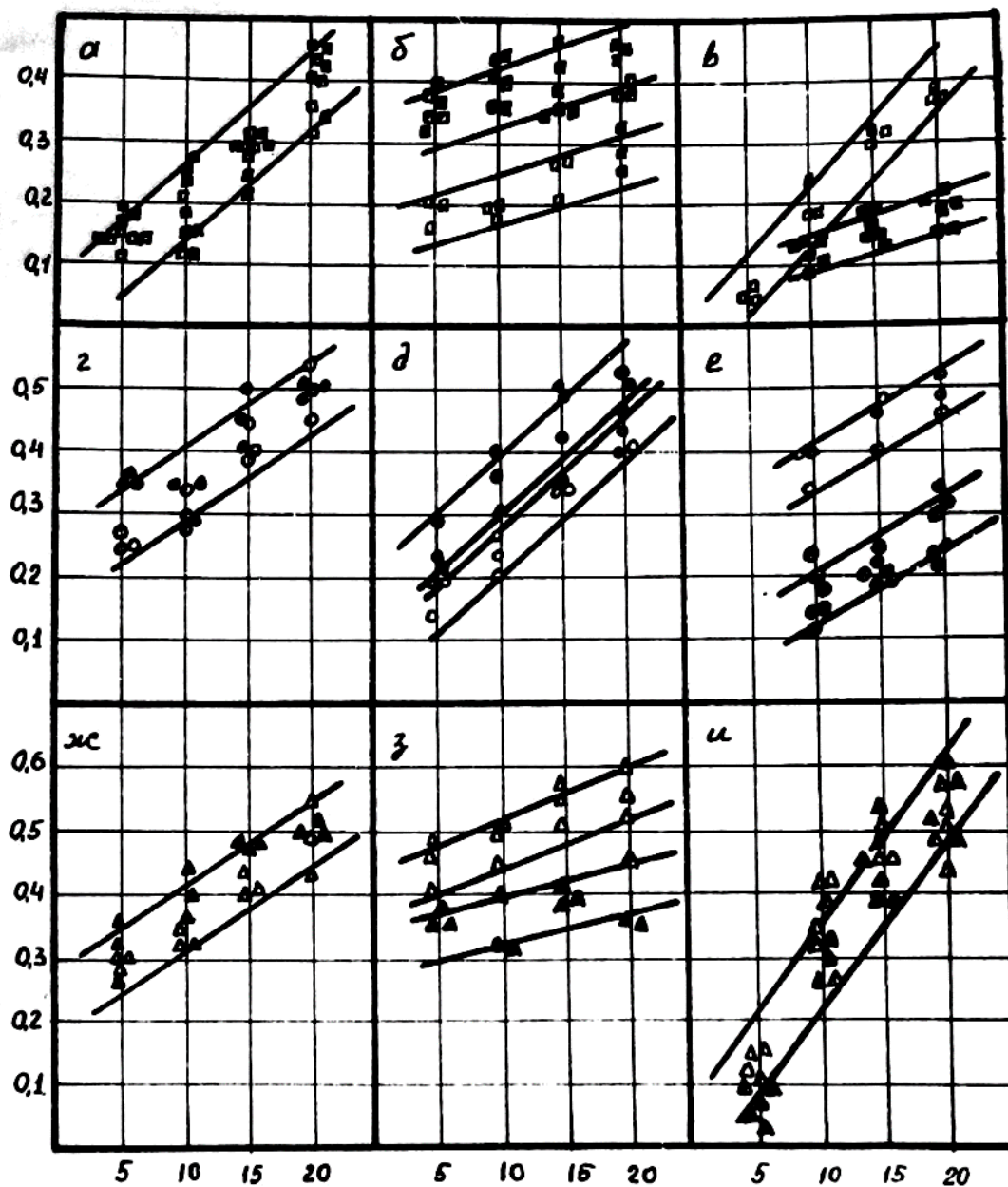


Рис.4.3.2 Залежність коефіцієнтів зщеплення між компонентами шихти та внутрішньою поверхнею обертаємого барабану.

а,б,в – кокс; г,д,е – вапняк; ж,з,и – аглоруда;

а,г,ж – крупність 8–5 мм; б,д,з – крупність 5–3 мм; в,е,и – крупність 3–0 мм;

□ ▤ ▥ ▦ ☒ – кокс, вологістю 0, 5, 9, 10, 18% відповідно;

○ ● ⊗ ⊕ ⊖ – вапняк вологістю 0, 2, 3, 4, 6 % відповідно;

△ ▲ ▴ ▵ – аглоруда вологістю 0, 4, 6, 8 % відповідно.

На рис. 4.3.2 представлено експериментально встановлену залежність коефіцієнта зчеплення шихтового матеріалу зі стінкою барабана від ступеня його заповнення. Аналіз отриманих результатів свідчить про наявність практично лінійного характеру цієї залежності, що проявляється для всіх досліджених варіантів співвідношення компонентів шихтової суміші. При цьому зі збільшенням ступеня завантаження змішувача спостерігається закономірне зростання значення коефіцієнта зчеплення, що відображає підвищення інтенсивності контактної взаємодії між частинками матеріалу та внутрішньою поверхнею барабана.

Разом із тим встановлено, що в умовах, характерних для промислової експлуатації барабанних змішувачів-огрудкувачів, за ступеня заповнення агрегату в межах 5–10 % спостерігаються мінімальні значення коефіцієнта зчеплення компонентів шихти з внутрішньою поверхнею барабана. Подібна ситуація зумовлює обмежену ефективність передачі механічного імпульсу від обертової стінки апарата до шару зернистого матеріалу, що, у свою чергу, сприяє переважанню процесів ковзання та пересипання частинок над механізмами їх активного перемішування.

З урахуванням зазначених закономірностей можна зробити висновок, що підвищення ефективності змішування шихтового матеріалу в барабанному агрегаті доцільно здійснювати шляхом інтенсифікації взаємодії між частинками суміші та внутрішньою поверхнею барабана. Одним із можливих шляхів досягнення цього є формування на внутрішній поверхні апарата спеціальних конструктивних елементів, здатних утримувати піднятий у процесі обертання зернистий шар від передчасного сповзання, тим самим збільшуючи тривалість його перебування у піднятому стані та сприяючи більш інтенсивному перемішуванню.

Беручи до уваги результати проведених експериментальних досліджень, а також відомі з літературних джерел дані щодо ефективності використання роторних елементів і різноманітних внутрішніх перегородок у барабанних апаратах, було запропоновано удосконалену конструкцію барабанного змішувача-огрудкувача, внутрішня поверхня якого оснащена лопатевими елементами.

Передбачається, що встановлення таких лопатей забезпечить інтенсифікацію процесу перемішування шихтової суміші за рахунок комплексного впливу кількох факторів, серед яких: зменшення сегрегації потоку шихти в робочому об'ємі огрудкувача, підвищення коефіцієнта зчеплення між шихтовим матеріалом і стінкою барабана, а також формування додаткової активної поверхні огрудкування, створюваної лопатевими елементами. Сукупна дія зазначених механізмів сприяє підвищенню інтенсивності гранулоутворення, покращенню структурної однорідності шихтової маси та, як наслідок, зростанню міцнісних характеристик сформованих гранул.

У табл. 4.3.1 наведено результати експериментального визначення часу перебування агломераційної руди та твердого палива в робочому об'ємі барабана, а також співвідношення цих компонентів у продуктах розвантаження при змішуванні шихти в барабані без підпірної перегородки та в барабані, оснащеному відповідним внутрішнім конструктивним елементом. Отримані дані дозволяють оцінити вплив наявності підпірної перегородки на кінематичні умови руху матеріалу та характер його компонентного розподілу в процесі змішування.

Таблиця 4.3.1 – Результати вимірювання часу перебування аглоруди і твердого палива, а також їх співвідношення на розвантаженні при змішуванні в барабані без і з підпірною перегородкою.

Площа підпірної перегородки %	Час перебування аглоруди в барабані, з	Час перебування твердого палива в барабані, з	Співвідношення аглоруди і твердого палива на розвантаженні барабана.
0	30	72	78:22
5	34	75	80:20
10	56	82	85:15
20	123	101	92:8

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 4.3.1, свідчить про істотну нерівномірність часу перебування окремих компонентів шихтової суміші в

барабані типової конструкції. Зокрема встановлено, що середній час перебування агломераційної руди в робочому об'ємі агрегату становить близько 42 с, що приблизно у 2,4 раза менше порівняно з часом перебування твердого палива. Подібна диспропорція в кінетиці руху компонентів призводить до зміни їх фактичного співвідношення в зоні змішування. У результаті цього співвідношення аглоруди та твердого палива в процесі змішування трансформується до рівня 78:22 за початкового співвідношення 90:10. Таким чином, процес перемішування в барабані відбувається за умов зниженого вмісту агломераційної руди та, відповідно, підвищеної частки твердого палива, що перевищує вихідне значення приблизно на 12 %.

Встановлено, що введення в конструкцію барабана підпірної перегородки істотно впливає на кінематичні параметри руху матеріалу, зокрема на тривалість перебування окремих фракцій шихтової суміші в робочому об'ємі апарата. Найбільш виражений ефект спостерігається для крупнодисперсної складової суміші — агломераційної руди. У досліджуваному інтервалі конструктивних параметрів при збільшенні площі підпірної перегородки до 20 % час перебування аглоруди у барабані зростає приблизно на 93 с, що відповідає збільшенню цього показника у 4,1 раза. Водночас для твердого палива зростання часу перебування є значно менш інтенсивним і становить близько 29 с, тобто приблизно у 1,4 раза.

Наслідком такої селективної дії перегородки є істотна зміна співвідношення компонентів у змішувальному об'ємі барабана. Зокрема, встановлено, що в умовах використання підпірної перегородки співвідношення аглоруди та твердого палива наближається до 92:8. Таким чином, процес змішування починає характеризуватися дещо підвищеним порівняно з вихідним вмістом агломераційної руди та відповідно зниженим вмістом твердого палива в суміші, різниця з початковим складом становить приблизно 2 %.

Отримані результати дозволяють зробити обґрунтоване припущення, що селективний вплив підпірної перегородки створює можливість цілеспрямованого регулювання часу перебування окремих компонентів шихтової суміші в

барабанному змішувачі. Це, у свою чергу, відкриває можливість коригування їхнього співвідношення безпосередньо в процесі змішування, що має важливе технологічне значення для стабілізації складу агломераційної шихти.

З метою перевірки впливу тривалості перебування агломераційної шихти в первинному змішувачі на ступінь її окомкування (озернення) на агломераційній фабриці було проведено серію промислових випробувань, у межах яких варіювали ступінь заповнення змішувача, що безпосередньо визначає час перебування матеріалу в апараті.

Результати експериментального визначення часу перебування агломераційної шихти в змішувачі наведено у табл. 4.3.2.

Таблиця 4.3.2 – Визначення часу перебування аглошихти в змішувачі.

Навантаження на конвеєр, кг/пог.м	Ступінь заповнення %	Час перебувань шихти в змішувачі, с.
80	8,0	16
120	13,5	72
150	17,6	65

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 4.3.2, свідчить про наявність складної взаємозалежності між величиною навантаження на погонний метр конвеєра, ступенем заповнення барабанного змішувача та тривалістю перебування шихтового матеріалу в робочому об'ємі апарата. Зокрема встановлено, що зі збільшенням навантаження на погонний метр конвеєра відбувається закономірне зростання ступеня заповнення барабана, що, на перший погляд, мало б сприяти збільшенню часу перебування матеріалу в змішувачі. Проте результати експериментальних вимірювань демонструють протилежну тенденцію — скорочення тривалості перебування шихти в апараті. Подібний ефект пояснюється суттєвим збільшенням швидкості потоку шихтового матеріалу, який, взаємодіючи з об'ємами матеріалу, що знаходяться попереду за напрямком руху, чинить на них додатковий механічний тиск. У результаті цього формується зростаючий опір з

боку вже наявних у барабані об'ємів шихти, що призводить до прискореного переміщення матеріалу вздовж осі агрегату та, відповідно, до скорочення часу його перебування в зоні змішування.

Разом із тим узагальнення експериментальних результатів дозволяє зробити висновок про зростання ефективності процесу змішування зі збільшенням ступеня заповнення барабанного змішувача. Так, у процесі порівняльного аналізу встановлено, що при підвищенні ступеня заповнення апарата з 8,0 до 13,5 % показники однорідності суміші, оцінені за величиною середньоквадратичного відхилення вмісту окремих фракцій, залишаються відносно високими, що свідчить про недостатній рівень гомогенізації шихтової маси. Водночас за ступеня заповнення, що досягає 17,6 %, відповідні значення середньоквадратичних відхилень істотно зменшуються, що є індикатором значно більш ефективного перемішування компонентів агломераційної шихти.

Необхідно також відзначити, що при відносно низьких ступенях заповнення змішувача (8,0 та 13,5 %) спостерігається небажане явище передчасного грудкування окремих ділянок шихтової маси. Це пояснюється зменшенням вмісту некондиційної дрібної фракції розміром менше 1,6 мм, а також формуванням локальних мікрооб'ємів матеріалу з підвищеною вологістю. У межах таких мікрооб'ємів відбувається інтенсивна агрегація тонкодисперсних частинок, що призводить до формування перезволожених грудок.

Під час проведення експериментальних досліджень було зафіксовано утворення порівняно великих агломератів із перезволоженого тонкодисперсного матеріалу, розміри яких досягали 80–100 мм. Формування подібних структур суттєво погіршує умови перемішування, оскільки великі грудки обмежують мобільність частинок, знижують інтенсивність масообміну між компонентами шихти та сприяють збереженню локальної неоднорідності суміші.

За ступеня заповнення змішувача, що дорівнює 17,6 %, спостерігається руйнування зазначених локально перезволожених мікрооб'ємів і великих грудок, що, у свою чергу, сприяє значному покращенню показників однорідності шихтової

суміші. У цьому випадку значення середньоквадратичних відхилень вмісту окремих фракцій у відібраних пробах істотно зменшуються порівняно з відповідними показниками, зафіксованими при нижчих ступенях заповнення змішувача (8,0 та 13,5 %).

Усереднені результати визначення гранулометричного складу агломераційної шихти, отримані за даними двох агломераційних машин і відібрані з човникових живильників, наведені в табличній формі. Аналіз цих даних свідчить про те, що нерівномірність розподілу зерен агломераційної шихти за фракційним складом, сформована на стадії первинного змішування за недостатнього ступеня заповнення змішувачів (навантаження 80 і 120 кг/пог. м), практично не усувається на наступних стадіях технологічного процесу — під час вторинного змішування та огрудкування.

Таким чином, отримані результати переконливо свідчать про те, що підвищення ефективності підготовки агломераційної шихти значною мірою залежить від оптимізації режимів роботи первинних змішувачів. Зокрема, важливим фактором є збільшення ступеня їх заповнення, що сприяє інтенсифікації процесів перемішування, руйнуванню локальних агломерацій та формуванню більш однорідної структури шихтової маси. Поряд із цим важливе значення має вдосконалення конструктивних характеристик змішувальних агрегатів, спрямоване на забезпечення більш ефективної взаємодії між компонентами шихтової суміші в процесі їх підготовки до агломерації.

Таблиця 4.3.3 – Гранулометричний склад аглошихти і однорідність озернення при різних ступенях заповнення змішувача

Навантаження на конвеєр кг/пог. м	Параметри 8/5, %	Фракції, мм				
		>9,0	9,0-5,0	5,0-3,0	3,0-1,6	<1,6
80		24,0/6,0	16,4/3,0	26,6/2,0	18,8/5,8	14,2/1,6
120		20/3,0	17,9/1,1	27,7/0,5	22,2/5,0	12,2/1,5
150		19,4/3,0	16,8/1,0	32,6/0,6	28,2/1,8	11,0/0,6

Уточнено методику обробки експериментальних даних: чисельником у розрахунках виступають абсолютні значення виходу окремих фракцій шихти у

відсотках, тоді як знаменником слугують середньоквадратичні відхилення відповідних параметрів, визначені за результатами паралельних дослідів.

Результати досліджень гранулометричного складу шихти, відібраної за перетином шару матеріалу в процесі його грудкування, підтверджують наявність виражених явищ розшарування агломераційної шихти внаслідок сегрегації компонентів під час змішування та огрудкування (див. табл. 4.3.4). Аналіз отриманих даних демонструє, що певні ділянки шару шихти, позначені як зона II або «почки», характеризуються локальним накопиченням дрібнодисперсних частинок та підвищеною неоднорідністю гранулометричного складу.

З огляду на виявлені закономірності, для підвищення ефективності підготовки шихти до агломерації на стадії первинного змішування доцільно впроваджувати спеціальні конструктивні рішення, зокрема встановлення підпірних перегородок. Застосування таких пристроїв дозволяє частково усунути негативний вплив локальної сегрегації та забезпечити більш рівномірний розподіл компонентів у робочому об'ємі змішувача, що сприяє підвищенню ступеня однорідності шихтової маси перед подальшими технологічними операціями.

Таблиця 4.3.4 – Грансклад аглошихти по перетину сегменту шихти, що грудкує

Місце відбору проб	Грансклад аглошихти, середньоквадратичні відхилення, мм,%									
	>9,0мм		9,0-5,0мм		5,0-3,0мм		3,0-1,6мм		<1,6мм	
	г	у	г	у	г	у	г	у	г	у
Зона I	25,0	6,6	12,0	4,4	39,1	3,8	13,1	5,2	10,8	4,9
Зона II	2,5	2,1	17,0	1,5	28,2	2,1	24,1	1,8	37,2	2,9
Зона III	10,2	3,2	6,6	2,9	13,8	4,2	39,2	3,8	30,2	3,5

4.4. Конструктивно-технологічні особливості пристрою для вібраційного огрудкування тонкоподрібнених залізрудних матеріалів

У процесі гранулювання в барабанних огрудкувачах агломераційні шихти зазнають комплексних динамічних впливів, що спричиняють формування гранул та підвищення їх механічної міцності. Якість отриманого озерненого матеріалу значною мірою визначається не лише гранулометричним та компонентним складом

шихти, а й конструктивними характеристиками використовуваного гранулятора. У цьому контексті особливу увагу представляє застосування вібраційного гранулятора для обробки тонкодисперсних матеріалів, конструкція якого наведена на рис. 4.4.1–4.4.3. Використання такого обладнання замість традиційного барабанного огрудкувача дозволяє підвищити продуктивність агломераційної машини та покращити якість агломерату, що досягається за рахунок більш ефективного грудкування матеріалу та забезпечення рівномірного завантаження огрудкованої шихти на палети агрегату.

Конструктивно пристрій для грудкування складається з короба 1, на якому закріплені грати 2, виконані у вигляді окремих подовжніх криволінійних осередків 3. Короб встановлено на раму 5 через амортизатори 4, що забезпечують гасіння коливань та стабілізацію динамічних режимів роботи. Активним органом гранулятора є вібратор 6, оснащений дебалансними валами 7, які розташовані уздовж подовжньої осі короба під певним кутом і обертаються з однаковою швидкістю в один бік. Така конфігурація валів дозволяє формувати складні коливальні рухи короба, що забезпечує інтенсивне переміщення і перекочування частинок шихти, сприяючи більш рівномірному формуванню гранул та підвищенню їх механічної стійкості.

Використання вібраційного принципу дії, на відміну від традиційного обертання барабана, створює локальні імпульсні сили, що забезпечують одночасне дроблення, ущільнення та формування гранул, зменшуючи ймовірність утворення надмірно великих грудок і локальних зон перезволоження. Це забезпечує не лише підвищення продуктивності агрегату, а й покращення фізико-механічних характеристик агломерату, що є критично важливим для стабільної роботи агломащини та ефективності подальшої металургійної обробки.

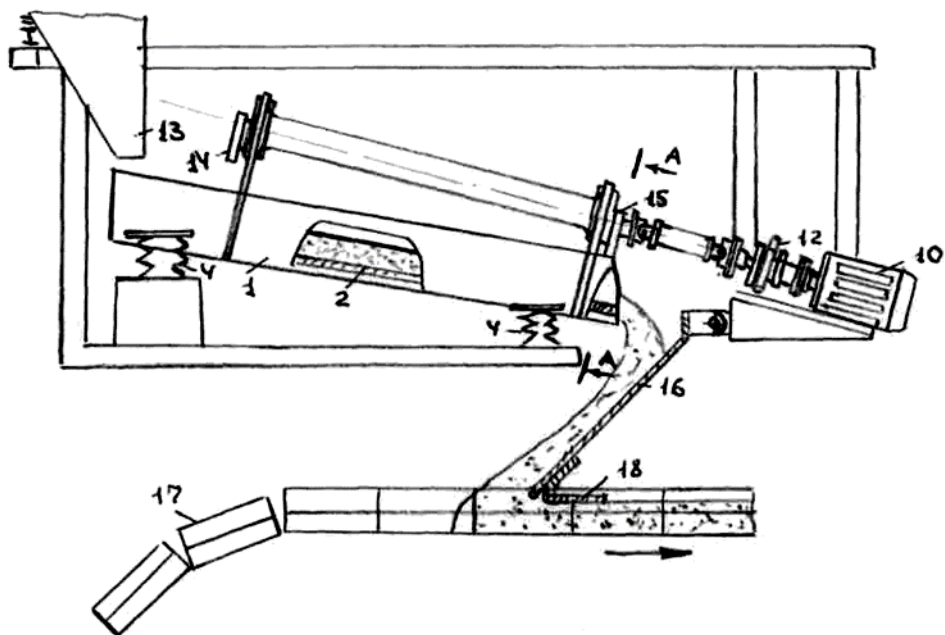


Рис. 4.4.1. Пристрій для огрудкування

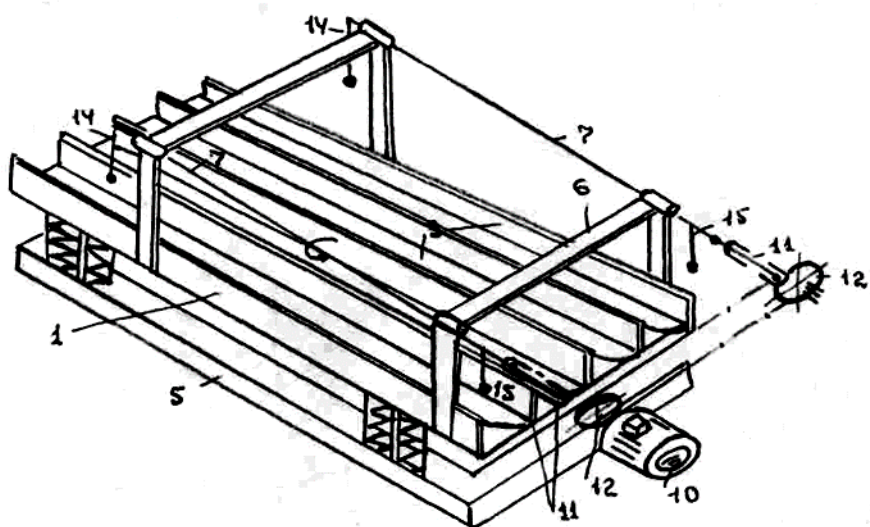


Рис. 4.4.2. Конструкція віброогрудкувача

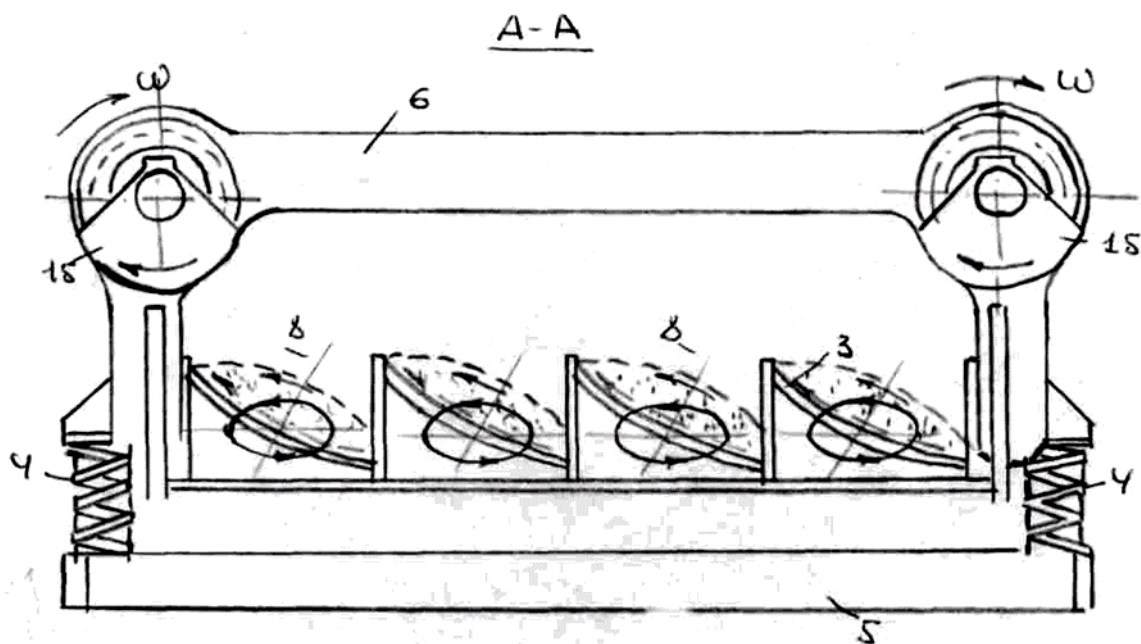


Рис.4.4.3. Переріз пристрою для огрудкування

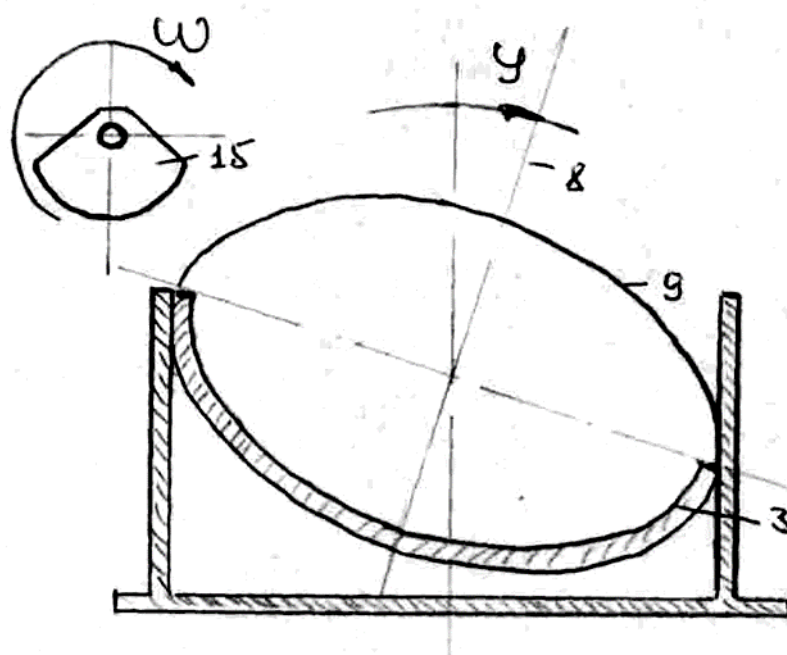


Рис.4.4.4. Переріз еліптичного напівциліндра

У межах сучасних технологічних схем агломерації, процес формування гранул та підвищення структурно-механічної цілісності агломераційної шихти у барабанних огрудкувачах реалізується під дією складного мультикомпонентного динамічного поля, яке включає ударні, коливальні та зсувні складові. Така

комбінація кінематичних і динамічних впливів призводить до інтенсивного перекочування частинок та утворення гранул із підвищеними показниками механічної стійкості, з оптимізованим гранулометричним профілем. При цьому якість озерненого матеріалу детермінується не лише компонентним складом шихти та її гранулометричними характеристиками, а й конструктивно-функціональними особливостями гранулятора, зокрема геометрією осередків, розташуванням активних органів та параметрами генерованих віброприскорень.

Експериментальні вимірювання показують, що при русі шихти від завантажувальної до розвантажувальної частини огрудкувача віброприскорення безперервно зменшується від максимальних значень у зоні завантаження (32,3–34,3 м/с²) до 31,5–27,4 м/с² у зоні розвантаження, що становить 0,62–0,85 від максимальних величин. Таке градієнтне зниження прискорень забезпечує ефективну консолідацію дрібнодисперсних частинок (<1,6 мм) та запобігає руйнуванню сформованих гранул, одночасно підтримуючи питомі показники продуктивності та однорідності, що перевищують аналогічні характеристики традиційних барабанних живильників.

Збільшення віброприскорення понад 34,4 м/с² призводить до режиму, подібного до подрібнення, при якому відбувається деструкція сформованих гранул, тоді як зниження прискорень до 32,2 м/с² і нижче зменшує ефективність опрацювання дрібних фракцій та неповне грудкування шихти. Оптимальний режим віброприскорень (34,2–32,3 м/с²) забезпечує формування стабільних гранул, проте їх транспортування при незмінних прискореннях може викликати вторинне руйнування та утворення дрібних фракцій. Для запобігання деструкції гранул доцільно забезпечувати поступове зниження віброприскорення по ходу руху шихти до 27,4–24,5 м/с² у зоні розвантаження. Встановлено, що зниження прискорення нижче 21,5 м/с² призводить до значного зниження продуктивності через уповільнення транспортування огрудкованої шихти.

Порівняльний аналіз гранулометричного складу шихти, огрудкованої в експериментальному віброогрудкувачі та традиційному барабанному агрегаті,

демонструє суттєво менший вміст дрібних фракцій (<1,6 мм) у матеріалі, обробленому вібраційним методом. Це, у свою чергу, сприяє покращенню газопроникності огрудкованої шихти та підвищенню ефективності подальшого спікання, що підтверджується даними табл. 4.4.1.

Таблиця 4.4.1 – Зміна швидкості фільтрації повітря в шарі вглошихти, окомкованої різними способами

Висота шару шихти	Швидкість фільтрації повітря, м/с	
	Типовий окомкователь	Віброокомкователь
210	0,61	0,76
220	0,56	0,69
290	0,51	0,63

Функціональна ефективність процесів агломерації значною мірою визначається гранулометричними та структурними характеристиками вихідної шихтової суміші, від яких безпосередньо залежать газодинамічні умови протікання тепломасообмінних процесів у спікаємому шарі. У цьому контексті особливого значення набуває стадія грануляційної підготовки шихти, під час якої формується просторово впорядкована система гранул, здатна забезпечувати оптимальну проникність шару для газових потоків. Одним із технологічних рішень, спрямованих на вдосконалення цієї стадії, є використання вібраційних огрудкувальних агрегатів, застосування яких дозволяє істотно модифікувати механізм формування гранул.

Експериментальні та виробничі спостереження свідчать, що вібраційний вплив на гранульований матеріал сприяє інтенсифікації процесів перебудови міжчастинкових контактів, що, у свою чергу, забезпечує формування більш стабільної структурної організації гранул. У результаті відбувається суттєва оптимізація гранулометричного складу шихтової маси, яка проявляється у зменшенні частки як надмірно дрібнодисперсних, так і крупних агломератів. Подібна трансформація зернової структури матеріалу супроводжується формуванням більш рівномірної системи порового простору, що сприяє

підвищенню проникності шару для газового потоку та створює передумови для інтенсифікації процесів спікання. За таких умов стає можливим збільшення висоти агломераційного шару без погіршення його газодинамічних характеристик, що безпосередньо відображається на підвищенні продуктивності агломераційних машин та покращенні якості одержуваного агломерату.

Необхідність удосконалення технології грануляції зумовлена також тим, що у традиційних барабанних огрудкувачах механізми росту гранул та їх внутрішнього ущільнення розвиваються нерівномірно. У більшості випадків процес укрупнення частинок, який реалізується через механізми коагуляційного злипання, випереджає процес структурної консолідації гранул. Унаслідок цього сформовані огрудки характеризуються відносно низькою механічною стійкістю і можуть частково руйнуватися під впливом динамічних навантажень, що виникають під час транспортування шихтового матеріалу та його подальшого укладання на агломераційну машину. Вказана обставина зумовлює необхідність пошуку технічних рішень, спрямованих на підвищення інтенсивності ущільнення гранул без істотного збільшення енерговитрат процесу.

Додаткові технологічні труднощі виникають у випадку використання тонкодисперсних магнетитових концентратів із підвищеним вмістом вологи. Висока питома поверхня таких матеріалів у поєднанні з наявністю капілярної вологи сприяє виникненню інтенсивних адгезійно-капілярних взаємодій між частинками, що призводить до самовільного формування різноманітних структурних агрегатів. Формування таких агрегованих структур відбувається вже на стадії транспортування концентрату, однак найбільш інтенсивно проявляється під час його накопичення у бункерних ємностях шихтових відділень. У процесі тривалої витримки матеріалу в умовах статичного шару відбувається подальший розвиток цих структур, який супроводжується їх укрупненням та підвищенням механічної міцності.

Теоретичні передумови для пояснення механізму формування подібних структур були закладені у дослідженнях, присвячених закономірностям поведінки

сипких матеріалів у бункерних системах. Зокрема, було встановлено, що у вологих дисперсних середовищах формується складна ієрархічна система структурних комплексів, які відрізняються між собою як об'ємними характеристиками, так і енергетичним рівнем міжчастинкових взаємодій. Особливістю такої системи є те, що структурні утворення нижчого рівня організації не зникають у процесі формування більших агрегатів, а входять до їх складу, формуючи багаторівневу структуру матеріалу.

Наявність подібних агрегованих структур істотно ускладнює процеси технологічної підготовки агломераційної шихти, оскільки їх руйнування потребує додаткових енергетичних витрат. Найбільш негативно цей фактор проявляється на стадіях змішування та грануляції, де необхідною умовою є забезпечення високого ступеня однорідності матеріалу.

З метою руйнування структурних агрегатів у практиці агломераційного виробництва застосовуються різноманітні дезінтеграційні пристрої, що встановлюються у вузлах перевантаження матеріалу. Такі пристрої можуть реалізовувати різні принципи дії — механічний, пневматичний або комбінований — однак їх експлуатація не завжди забезпечує необхідний технологічний ефект. Більше того, використання подібного обладнання часто супроводжується зниженням надійності роботи транспортно-технологічних систем.

Альтернативним напрямом інтенсифікації процесу підготовки шихти стало використання високошвидкісних роторних змішувачів, які встановлюються безпосередньо над стрічковими конвеєрами. Незважаючи на досить високу інтенсивність перемішування, ефективність таких агрегатів значною мірою залежить від стабільності подачі матеріалу та однорідності його гранулометричного складу. У випадку використання вологих концентратів ці умови часто не виконуються, оскільки матеріал витікає з бункерів нерівномірно, формуючи дискретні порції, що призводить до значних коливань навантаження на конвеєр і, відповідно, до погіршення якості змішування.

Узагальнення результатів виробничих спостережень та аналіз науково-технічної літератури дозволяють дійти висновку, що традиційні підходи до змішування та грануляції шихт, сформованих на основі вологих тонкодисперсних концентратів, не забезпечують достатньої ефективності. У зв'язку з цим перспективним напрямом удосконалення технології є реалізація попереднього руйнування структурних агрегатів концентрату ще до надходження матеріалу до змішувального обладнання.

Одним із можливих технічних рішень цієї проблеми є введення до складу шихти кускової руди з регульованими розмірними характеристиками. У цьому випадку крупні фрагменти руди виконують функцію своєрідних мелючих тіл, які під час транспортування та перемішування руйнують структурні агрегати концентрату. Подібний підхід сприяє підвищенню однорідності гранулометричного складу шихтової маси та створює сприятливі умови для формування стабільної системи гранул.

Практична реалізація зазначеного принципу дозволяє не лише покращити умови змішування компонентів шихти, але й забезпечити підвищення механічної міцності агломерату, зниження питомих витрат палива та зменшення частки дрібної фракції у кінцевому продукті. При цьому зменшується також інтенсивність пиловиділення, оскільки одним із основних джерел утворення дрібнодисперсного матеріалу в агломераційному процесі є саме великі грудки концентрату, присутні у вихідній шихті.

4.5. Аналіз результатів дослідження впливу технології грануляції на показники агломераційного процесу.

Результати експериментальних досліджень процесу спікання агломераційної шихти, гранульованої із застосуванням різних технологічних методів, наведено у таблицях 4.5.1 та 4.5.2.

Порівняльний аналіз отриманих даних свідчить, що використання вібраційного огрудкувача забезпечує формування гранульованої шихти з більш

сприятливими структурними характеристиками порівняно з матеріалом, підготовленим у традиційному барабанному грануляторі. Це проявляється у підвищенні швидкості спікання агломерату, яка для шихти, гранульованої у вібраційному апараті, перевищує аналогічний показник для типового процесу приблизно на 10–20 %. Водночас вихід придатного агломерату залишається практично незмінним, що пояснюється тим, що основними факторами, які визначають ступінь зміцнення гранул у процесі спікання, є хіміко-мінералогічний склад шихти та температурно-теплові параметри агломераційного процесу, тоді як щільність укладання гранул у шарі має другорядний вплив.

Таблиця 4.5.1 – Результати спікань аглошихти, огрудкованої різними способами без добавок вапняку.

№ шихти	Основність	Висота шару, мм	Час спікання, хв	Вихід придатного %	Швидкість спікання, мм/мін	Питома продуктивність т/м²ч	Вихід фракції % після барабана	
							> 25,0 мм	< 5,0 мм
Типовий спосіб грудкування в барабані								
1	1,0	320	10,16	76,50	31,27	1,52	16,0	21,4
2	1,0	320	10,53	79,50	29,71	1,50	13,4	22,1
3	1,0	320	11,01	82,6	26,66	1,47	12,1	23,1
4	1,0	320	11,57	84,99	26,35	1,45	12,0	24,2
Шихта, огрудкована у віброогрудкувачі								
1	1,0	320	8,08	75,00	39,61	2,4	7,4	14,8
2	1,0	320	8,20	82,10	37,80	2,1	6,2	16,2
3	1,0	320	9,31	82,70	34,37	1,85	5,1	17,1
4	1,0	320	10,55	85,96	30,33	1,76	4,3	18,3

Таблиця 4.5.2 – Результати спікання аглошихти з добавками вапняку, огрудкованої різними способами.

№ шихти	Основність	Висота шару, мм	Час спікання, хв	Вихід придатного %	Швидкість спікання, мм/мін	Питома продуктивність т/м ² ·ч	Вихід фракції % після барабана	
							> 25,0 мм	< 5,0 мм
Грудкування у барабані								
1	1,0	320	10,00	76,67	35,00	1,52	21,5	17,5
2	1,0	320	11,23	75,46	30,27	1,41	19,4	17,2
3	1,0	320	12,00	75,43	26,50	1,37	18,2	18,2
4	1,0	320	12,50	75,40	26,40	1,28	17,4	19,4
Грудкування у віброогрудкувачі								
1	1,0	320	9,03	74,60	37,65	1,80	10,3	14,0
2	1,0	320	9,51	75,53	34,70	1,73	8,8	15,8
3	1,0	320	9,59	76,18	34,40	1,70	7,6	16,0
4	1,0	320	10,14	77,00	31,75	1,69	6,7	17,1

Результати проведених експериментальних досліджень свідчать про те, що ефективність функціонування агломераційних установок істотно залежить від способу попередньої грануляційної підготовки шихтового матеріалу. Особливо помітно вплив технології огрудкування проявляється у зміні питомої продуктивності агломераційного агрегату, що безпосередньо пов'язано з формуванням оптимальних газодинамічних і теплових умов у шарі шихти під час спікання.

Аналіз кінетики процесу спікання показує, що при відповідній організації грануляційної стадії можливо досягти сприятливого поєднання двох ключових факторів — високої швидкості поширення фронту горіння та інтенсивного перебігу фазових перетворень у мінеральній структурі агломерату. За умов підвищеного вмісту вуглецю у шихтовій суміші зазначені фазові перетворення відбуваються з достатньо високою швидкістю, що створює можливість отримання добре

пропеченого агломерату протягом відносно короткого технологічного циклу. У проведених експериментах тривалість повного циклу спікання становила приблизно десять хвилин, що свідчить про достатньо високу інтенсивність тепломасообмінних процесів у шарі матеріалу.

Важливим елементом забезпечення стабільного теплового режиму агломерації є правильний вибір кількості твердого палива, яке вводиться до складу шихти. У досліджуваних умовах його вміст становив 6,0–6,5 %, тоді як теоретично розрахована величина, необхідна для компенсації теплових втрат у навколишнє середовище, перебуває у межах 5,0–5,5 %. Таким чином, реальний тепловий потік, що надходить у шихтовий шар, дещо перевищує розрахунковий оптимум. Однак таке перевищення не лише не погіршує перебіг технологічного процесу, але й у певній мірі сприяє підвищенню механічної міцності сформованого агломерату завдяки більш повному розвитку процесів спікання та формуванню міцніших мінеральних зв'язків у його структурі.

Дослідження гранулометричного складу отриманого продукту показало, що у вихідному спеку частка крупної фракції з розміром частинок понад 25 мм дещо перевищує аналогічний показник для агломерату, сформованого з традиційних шихтових сумішей. Проте подальші механічні випробування, проведені у барабані Рубіна, демонструють помітне зменшення кількості цієї фракції. Подібна закономірність пояснюється особливостями структурної організації крупних агломераційних утворень, які в окремих випадках являють собою конгломерати, сформовані шляхом з'єднання частково або повністю спечених гранул шихти. Найменш міцними елементами такої структури є зони контакту між окремими гранулами, де і відбувається руйнування під дією механічних навантажень.

Водночас результати руйнування таких утворень не призводять до істотного погіршення гранулометричного складу агломерату. Основна частина продуктів деструкції представлена фракцією 15–10 мм, яка значно перевищує граничний розмір частинок, що відносяться до некондиційного класу (8–5 мм і менше). Вміст дрібної фракції розміром 5–0 мм після проведення механічних випробувань для

агломерату, отриманого з дослідної шихти, виявився у середньому на 6–10 % нижчим порівняно з аналогічними показниками для агломерату, виробленого з використанням типових шихтових композицій.

Причини такого ефекту пов'язані з мікроструктурними особливостями дослідних агломератів. Для них характерна більш щільна структура з дрібними та рівномірно розподіленими порами, що відрізняє їх від агломерату, сформованого із традиційних шихтових сумішей, для якого притаманна більш неоднорідна порова структура. Саме ця відмінність визначає деяке зниження відновлюваності дослідних агломератів: за інших однакових умов швидкість їх відновлення приблизно на 10–15 % нижча, ніж для агломерату, отриманого з типових шихт.

Незважаючи на зазначену особливість, сукупність отриманих експериментальних результатів переконливо свідчить про технологічну доцільність використання вібраційних огрудкувальних агрегатів у процесі підготовки агломераційних шихт, сформованих на основі тонкодисперсних матеріалів. Додатковим підтвердженням цього є результати, наведені у таблицях 4.5.1 та 4.5.2, які демонструють, що характерне для агломераційного виробництва зниження питомої продуктивності агломераційних машин при збільшенні частки магнетитових концентратів у рудній частині шихти може бути значною мірою компенсоване завдяки більш ефективній підготовці шихтової суміші та оптимізації умов її спікання.

Узагальнення результатів проведених досліджень дозволяє зробити висновок про доцільність використання вібраційних огрудкувачів конструкції ДМЕТІ для підготовки до спікання агломераційних шихт, у складі яких частка тонкодисперсних магнетитових концентратів перевищує 50 %. Крім того, застосування подібних агрегатів відкриває додаткові можливості для залучення до агломераційного процесу важкогрудкувальних компонентів, що містять підвищені концентрації заліза або марганцю. До таких матеріалів належать, зокрема, концентрати та шлами систем газоочищення, а також марганцеворудні концентрати і відповідні шламові відходи.

Отже, використання вібраційної технології грануляційної підготовки шихти не лише підвищує ефективність агломераційного процесу, але й створює передумови для розширення сировинної бази агломераційного виробництва за рахунок більш раціонального використання вторинних ресурсів металургійного комплексу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.04.ЕДЧ	анк
	Анк	№ докум	підпис	дат		10

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз умов роботи барабанних змішувачів-огрудкувачів показав, що за характерних для промислової експлуатації значень ступеня заповнення барабана в межах 5–10 % спостерігається мінімальне значення коефіцієнта зчеплення шихтового матеріалу з внутрішньою поверхнею апарата. За таких умов значна частина зернистого шару, що піднімається під час обертання барабана, схильна до передчасного сповзання, що знижує інтенсивність перемішування компонентів шихти. Отже, підвищення ефективності процесу змішування може бути досягнуте шляхом конструктивної модифікації внутрішньої поверхні барабана, зокрема за рахунок формування елементів, здатних утримувати піднятий зернистий шар та перешкоджати його передчасному переміщенню вниз під дією сили тяжіння.

2. На основі результатів проведених досліджень, а також з урахуванням відомих літературних даних щодо впливу роторних елементів і різноманітних перегородок на інтенсивність перемішування сипких матеріалів, запропоновано вдосконалену конструкцію барабанного змішувача-огрудкувача. Конструктивною особливістю такого апарата є наявність спеціальних лопатевих елементів, розміщених на внутрішній поверхні барабана, які забезпечують додаткову механічну взаємодію з шихтовим матеріалом у процесі його перемішування та грануляції.

3. Передбачається, що встановлення лопатевих елементів сприятиме суттєвій інтенсифікації процесу змішування агломераційної шихти. Такий ефект обумовлюється комплексною дією кількох факторів, серед яких особливе значення мають зменшення сегрегаційних явищ у потоці матеріалу, посилення механічного зчеплення між шихтовою масою та стінками апарата, а також формування додаткової поверхні контакту, що бере участь у процесах огрудкування.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.В			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	ВИСНОВКИ			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв				МТ-22-2			

Сукупна дія цих чинників створює більш сприятливі умови для формування гранул стабільної структури, що в кінцевому підсумку сприяє підвищенню ступеня огрудкування шихти та збільшенню механічної міцності утворених гранул.

4. Обробка та аналіз експериментальних результатів показали, що ефективність процесу змішування у барабанному апараті істотно залежить від ступеня його заповнення шихтовим матеріалом. Зокрема встановлено, що зі збільшенням ступеня заповнення змішувача інтенсивність перемішування компонентів шихти помітно зростає. Так, при зміні ступеня заповнення апарата від 8,0 до 13,5 % спостерігається значне зростання середньоквадратичних відхилень у розподілі фракцій, що свідчить про недостатню однорідність суміші. Водночас при досягненні ступеня заповнення 17,6 % зазначені показники істотно зменшуються, що вказує на формування більш рівномірної структури шихтової суміші.

5. Узагальнення результатів проведених експериментальних досліджень дозволяє рекомендувати використання запропонованих огрудкувальних апаратів для підготовки агломераційних шихт, у складі яких частка тонкодисперсних магнетитових концентратів перевищує 50 %. Впровадження вібраційних огрудкувачів у технологію підготовки шихти також відкриває можливість більш ефективного використання у процесі агломерації важкоогрудковуваних компонентів із підвищеним вмістом заліза, до яких належать різноманітні концентрати та шлами систем газоочищення, а також матеріали з підвищеним вмістом марганцю, зокрема марганцеворудні концентрати та відповідні шламові відходи. Це створює передумови для розширення сировинної бази агломераційного виробництва та більш раціонального використання вторинних ресурсів металургійної промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стебелько І. Є., Койфман О. О., Бондар О. В., Король В. М. Модернізація АСКТП-дозування й огрудкування на випалювальних машинах з урахуванням вологості концентрату і шихти та гранулометрії сирих окатишів // *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки.* – 2024. – № 2.
2. Дубняк А. О. Синтез та дослідження системи автоматичного керування процесом огрудкування на гірничо-збагачувальному комбінаті. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2024.
3. Дубняк А. О. Розробка елементів системи автоматичного управління процесом огрудкування. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2023.
4. Лобов В. Й., Лобова К. В. Підвищення енергоефективності виготовлення залізорудних котунів на фабриках огрудкування // *Енергетика і автоматика.* – 2018. – № 1. – С. 99–108.
5. Семененко Є. В., Медведєва О. В. Фізико-хімічні основи грануляції та огрудкування мінеральної сировини. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2020.
6. Бойко М. С., Семененко Є. В. Технології огрудкування дрібнодисперсних матеріалів. – Дніпро, 2018.
7. Білецький В. С., Смирнов В. О. Технологія збагачення корисних копалин. Том 3. Спеціальні та допоміжні процеси. – Кривий Ріг, 2019.
8. Півняк Г. Г., Бондаренко В. І., Пілов П. І. Ресурсозберігаючі технології переробки мінеральної сировини. – Дніпро : НГУ, 2015.
9. Pietsch W. *Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment.* – Weinheim : Wiley-VCH, 2016.

					КНУ.РБ.136.26.113с-03.Л			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат	ЛІТЕРАТУРА			
Розробл	Звіряка							
Перевір	Плотніков							
Н	Плотніков							
Затвер	Савельєв				МТ-22-2			

- 10.Litster J., Ennis B. *The Science and Engineering of Granulation Processes*. – Dordrecht : Springer, 2017.
- 11.Meyer K. *Pelletizing of Iron Ores*. – Berlin : Springer, 2018.
- 12.Forsmo S. P. E., Apelqvist A. J., Björkman B., Samskog P. Binding Mechanisms in Wet Iron Ore Green Pellets // *Powder Technology*. – 2016.
- 13.Kawatra S. K., Ripke S. J. Pelletizing and Agglomeration of Iron Ore Fines // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2018.
- 14.Lu L., Ishiyama O. Recent Advances in Iron Ore Sintering // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. – 2016.
- 15.Umadevi T., Deodar A., Mahapatra P. Influence of Burden Granulation on Sinter Productivity // *Ironmaking & Steelmaking*. – 2017.
- 16.Dwarapudi S., Ghosh T. K. Effect of Granule Size Distribution on Sinter Plant Performance // *Ironmaking & Steelmaking*. – 2018.
- 17.Yang C., Zhu D., Pan J. Influence of Raw Mix Granulation on Sinter Quality // *ISIJ International*. – 2020.
- 18.Li G., Jiang T., Peng Z. Optimization of Granulation Conditions for Iron Ore Sintering // *ISIJ International*. – 2021.
- 19.Hooey L., Sterneland J. Pellet Feed Preparation and Balling Technology // *Powder Technology*. – 2019.
- 20.Hallberg M., Wikström J. Influence of Moisture and Mixing Conditions on Pelletizing Efficiency // *Minerals Engineering*. – 2020.
- 21.Chatterjee A. *Agglomeration Technologies for Iron Ore Fines Utilization*. – New Delhi : PHI Learning, 2017.
- 22.Fruehan R. J. *The Making, Shaping and Treating of Steel. Ironmaking Volume*. – Pittsburgh : AIST, 2019.
- 23.Biswas A. *Principles of Blast Furnace Ironmaking*. – New Delhi : SBA Publications, 2018.
- 24.Turkdogan E. T. *Fundamentals of Ironmaking*. – London : Institute of Materials, 2017.

25. Butkarev A. A., Butkareva E. A. Comparative Analysis of Straight Grate Machines and Grate-Kiln Systems for Pellet Production // *Ferrous Metallurgy Bulletin*. – 2021. – Vol. 77, No. 8. – P. 957–968.
26. Богомолів В. М., Богомолів Н. П., Гречко Є. Г. Зниження витрати аглопалива при агломерації залізорудної шихти за рахунок подачі у шар води та газоповітряної суміші // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2013. – Т. 7, № 3-2. – С. 196–201.
27. Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. – 2021–2025.
28. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2015–2025.
29. Металургія. Наукові праці Українського державного університету науки і технологій. – 2015–2025.
30. Вісник Криворізького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2015–2025.