

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**

**«РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ  
ОКАТИШІВ  
ПРОДУКТИВНІСТЮ 5,2 МЛН. Т/РІК»**

Виконав:

Студент групи ЗМТ 21ск \_\_\_\_\_ Павло КОЛІКОВ

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Тетяна ЯРОШ

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Тетяна ЯРОШ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг  
2024 р.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему  
«Розробка технології виробництва залізорудних окатишів  
продуктивністю 5,2 млн. т/рік»

Об'єкт дослідження – технологічні прийоми зміцнення окатишів.

У першій частині виконано аналіз можливих варіантів зміцнення окатишів, який у сучасних умовах можна реалізувати випалювальним і безвипалювальним способами. Зроблено висновок про доцільність застосування високотемпературного випалу, тому запропоновано спосіб, який включає звичайні умови термообробки окатишів у зонах сушіння, нагрівання та високотемпературного випалу в окислювальній атмосфері з наступним охолодженням окатишів до 900-1000 °С у безкисневій атмосфері до утворення на поверхні окатишів дисоційованого до магнетиту шару. Подальше охолодження можна проводити в окисному середовищі. Пропонований спосіб дозволяє підняти середню за шаром міцність окатишів зі 134 до 252 кг/окатиш.

У другій частині виконано розрахунок шихти та хімічного складу окатишів.

У третій частині зроблено розрахунок технологічної схеми виробництва окатишів.

У четвертій частині здійснено вибір і розрахунок основного технологічного обладнання.

ОКАТИШІ, ЗМІЦНЕННЯ, ТЕРМООБРОБКА, ВИПАЛЮВАЛЬНА  
МАШИНА, БЕЗВИПАЛЮВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ

## ВСТУП

Технологічні схеми виробництва залізорудних окатишів є комбінацією двох етапів.

На першому етапі, який має назву виробництво сирих окатишів, безпосередньо відбувається формування окатишів з тонкодисперсного залізорудного матеріалу, зволоженого до певної міри, до якого обов'язково додається зв'язуюча сполука. Сьогодні на вітчизняних фабриках з виробництва залізорудних окатишів цією сполучною добавкою є бентоніт, однак серед науковців питання про кількість введеного в шихту перед огрудкуванням бентоніту та про його вплив на механічні та термічні властивості сирих окатишів і досі є спірним. Утім, дослідним шляхом доведено, що добавки бентоніту визначають міцність окатишів. Проте, зважаючи на його значну ціну, вже довгий час дослідники пропонують для виготовлення окатишів використовувати різні альтернативні сполучні.

На сучасних фабриках огрудкування сирі окатиші отримують в огрудкувачах барабанного і тарілчастого (або чашевого) типів. Барабанний огрудкувач є циліндричним пристроєм з гладкою внутрішньої поверхнею, який встановлюється під кутом до горизонту (до 8-9°) та обертається на катках (частота обертання 7-11 хв-1). Під час руху барабана зародки окатишів під дією сили тяжіння і відцентрової сили притискаються до поверхні барабана, при цьому на них накопчується шар концентрату дрібної фракції. Оскільки в барабанному огрудкувачі утворюються сирі окатиші різного класу крупності, за барабаном встановлюють механічний грохот для виділення кондиційної фракції окатишів розміром 8-16 мм. Дрібна фракція або іншими словами циркуляційне навантаження, що становить 150-400% (по відношенню до кондиційної фракції окатишів), спеціальним транспортером повертається знову в барабанний огрудкувач. Саме використанням циркуляційного навантаження, що містить велику кількість зародків (дрібних окатишів), можна пояснити високу стабільність роботи барабанних огрудкувачів, що є їх безперечною перевагою.

Чашовий, або тарілчастий, огрудкувач є похило встановлений (під кутом 45-60°) диск з бортом. Вихідна шихта, що завантажується в чашу, яка обертається, затискається між бортом і днищем і піднімається на деяку висоту. Скочуючись по похилому днищу, зародки накочують на себе шар тонкого концентрату, перетворюючись на частинки кулястої форми. Враховуючи, що частинки великих розміру та маси при обертанні тарелі можуть підніматися на велику висоту по борту, висота борту регулює кінцевий розмір сирих окатишів.

На другому етапі здійснюється зміцнення гранул для надання сирих окатишам міцності, необхідної для зберігання, транспортування та подальшої обробки в доменних печах. Процес зміцнення сирих окатишів можна реалізувати випалювальним і безвипалювальним способами. У роботі детальна увага приділена саме цим технологічним прийомам зміцнення окатишів.

# 1. АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ ЗМІЦНЕННЯ ОКАТИШІВ

## 1.1. Термообробка залізорудних окатишів

Відомо, що на зарубіжних та вітчизняних фабриках з виробництва залізорудних окатишів найпоширенішим способом зміцнення сирих гранул є термообробка на обпалювальних конвеєрних машинах.

Обпалювальна конвеєрна машина призначена для сушіння, підігріву, зміцнювального окислювального випалу та охолодження залізорудних окатишів. Процес теплової обробки окатишів на конвеєрній машині полягає в поступовому їх нагріванні до температури 1350 °С і подальшому охолодженні. Для цього сирі окатиші, укладені на колосникові решітки візків 1 за допомогою укладача і роликового живильника 2 (рис. 1), послідовно проходять п'ять технологічних зон: сушіння 4, підігріву 5, високотемпературного випалу 6, рекуперації 7 та охолодження 8 і 9.

Сумарний час перебування окатишів на стрічці машини становить 20-30 хв. Випалювання окатишів проводиться продуктами згоряння газу, спалюваного за допомогою пальників, що встановлюються в укриттях - камерах зон підігріву та випалення. Такий режим забезпечує повний процес перетворення сирих окатишів з вихідною міцністю 0,8-1,5 кг/ок. в обпалений кусковий продукт міцністю 150-350 кг/ок.

Для створення вакууму під решіткою застосовують високотемпературні вентилятори 3, 10 – 13. Продукти згоряння відводяться в трубу 14.

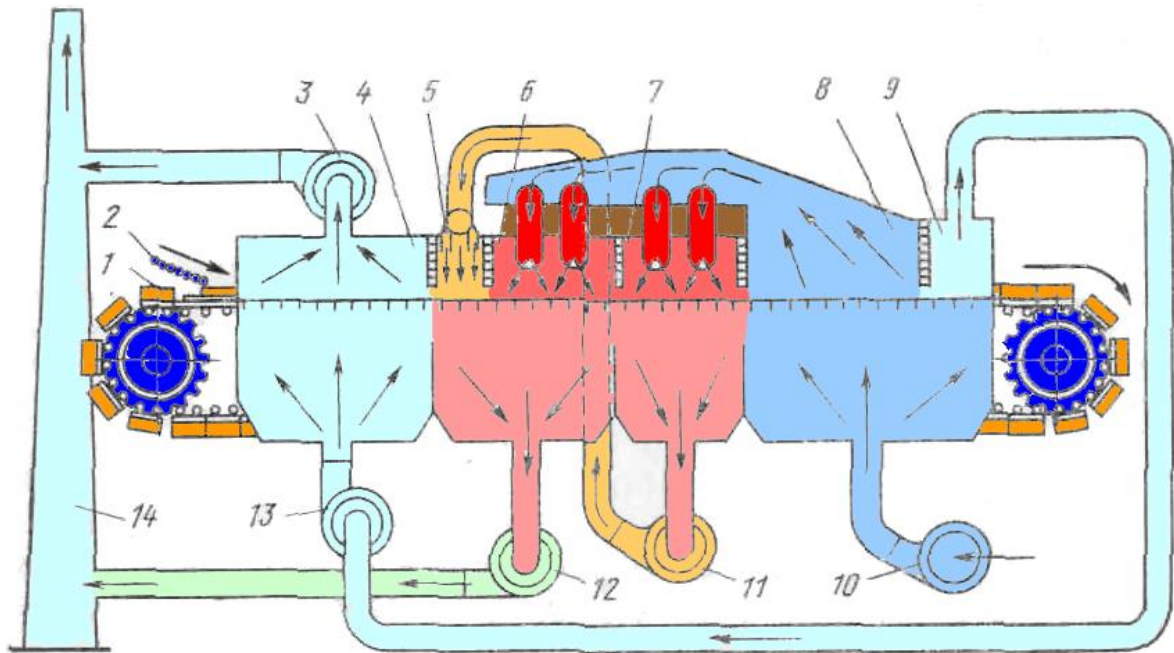


Рисунок 1 – Схема конвеєрної машини для випалу окатишів (стрілками показані газоповітряні потоки)

Дослідниками було встановлено, що під час термообробки спостерігається зниження властивостей міцності обпалених окатишів верхнього горизонту шару під тривалим впливом високих температур. Окатиші верхнього шару набувають зональної структури внаслідок дисоціації гематиту та рекристалізованих процесів. Крім того, окатиші злипаються в грона, що призводить до зниження газопроникності шару. У той же час для отримання міцних окатишів нижніх горизонтів шару необхідна витримка шару в зоні високих температур для досягнення мінімально необхідних температур, що сприяють зміцненню окатишів нижнього шару. Далі обпалені окатиші після зони рекуперації надходять у зону охолодження, де охолодження шару проводиться холодним повітрям, при цьому швидкість охолодження низу шару перевищує 200 град/хв. Це призводить до значного розміцнення окатишів внаслідок розвитку напруг у структурі гранул та утворення мікротріщин. Міцність окатишів низу шару падає до 100 кг/ок.

## 1.2. Безвипалювальні способи одержання окатишів

У нашій країні та за кордоном розробляються і впроваджуються методи безобпалового окускування.

Ці процеси ґрунтуються на відомих методах зміцнення окускованих залізородних матеріалів із застосуванням сполучних добавок, що не потребують високотемпературного випалу. У тому числі слід відзначити процеси, засновані на застосуванні вапна з наступною карбонізацією або водно-тепловою обробкою, цементу, бентоніту, чавунної стружки або вуглецевих сполучних (піка, газового вугілля тощо).

Ці методи мають низку переваг, що полягають у тому, що капітальні витрати та вартість переділу значно нижчі, обладнання дешевше та просте, покращено умови праці порівняно з виробництвом випалювальних матеріалів. Крім того, для подальших процесів відновлення небажані утворення при цих температурах залізистих силікатів, зменшення пористості окатишів і сумарної поверхні рудних частинок концентрату.

Важливо, що безвипалювальні методи зберігають майже незмінними склад і властивості вихідної сировини, внаслідок чого процеси відновлення безобпалових окатишів починаються раніше, ніж обпалених, і протікають інтенсивніше.

До недоліків безвипалових процесів слід віднести відсутність обладнання, порівнянного за продуктивністю з випалювальними агрегатами та непридатність процесів для обробки концентратів, що містять шкідливі домішки, наприклад, сірчистих концентратів.

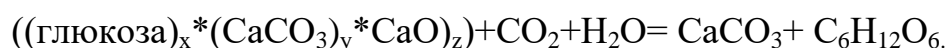
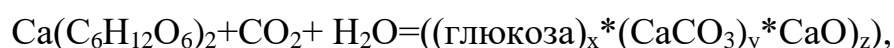
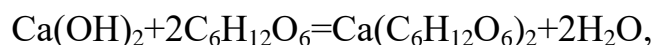
Ряд процесів безвипалового отримання окатишів освоєний промисловістю або пройшов стадію промислової перевірки.

### 1.2.1. Хіміко-каталітичний метод одержання окатишів

Цей метод відноситься до безвипалювальних методів, суть його полягає в наступному. Для підвищення міцності сирих окатишів у їхній склад додавали вапно, після утворення готові гранули обробляли  $\text{CO}_2$ , відбувалася реакція

карбонізації, у результаті одержували дрібно кристалічну структуру  $\text{CaCO}_3$ , завдяки якій гранули ставали механічно й термічно міцними при нагріванні аж до температури 900-1000 °С. Однак через малу концентрацію  $\text{CO}_2$  у повітрі (0,03 %) і через утворення на матеріалі, що твердіє, кірки  $\text{CaCO}_3$  затрудняється дифузія  $\text{CO}_2$  усередину окатишів. Значне прискорення природної карбонізації вапна під впливом незначних добавок цукрів було описано Д.І. Менделєєвим. У будівельній практиці з метою одержання карбонізованих блоків застосовується один з відходів цукрового виробництва — меласса — як каталізатор для прискорення процесу утворення  $\text{CaCO}_3$  при одержанні виробів, до складу яких входить вапно.

Реакція каталізу при застосуванні розчинів цукрів може бути виражена наступними рівняннями:



Створена в результаті реакції карбонізації структура  $\text{CaCO}_3$  забезпечує рудно-вугільним гранулам потрібну механічну й термічну міцність лише до температури 900-950 °С, тобто до початку процесу термічної дисоціації кальциту. При подальшому нагріванні гранул, що неминуче при металургійній їхній переробці, необхідна їхня міцність у силу припинення існування кальцитової структури повинна забезпечуватися якимсь іншим зв'язуванням більше термостійкої, чим кальцит, і, безумовно, корисної для протікання металургійних процесів.

Оскільки при нагріванні рудно-паливних гранул у них протікає ряд послідовних реакцій відновлення заліза, які супроводжуються закономірним чергуванням зміни структур оксидів заліза з утворенням у підсумку міцної структури металічного Fe, то можна при відповідних умовах, використати структуру відновленого заліза як зв'язку для того, щоб гранули не розсипалися аж до зони їхнього плавлення.

У такий спосіб хіміко-каталітичний метод передбачає створення високотемпературної зв'язки замість кальциту, що розпадається, у процесі



самої металургійної переробки рудно-паливних гранул у вигляді структури відновленого губчатого заліза.

Цей технологічний процес полягає в наступному: тонкоподрібненні залізородні концентрати ретельно перемішують з подрібненим коксиком, антрацитом або іншими недефіцитними вугіллями й вапном, гранулюють, після чого піддають карбонізації холодними димовими газами.

На рис. 2 представлена принципова технологічна схема хіміко-каталітичного методу виготовлення офлюсованих рудно-паливних гранул. Залізородний концентрат підсушується до вологості 2—3% в барабанній сушарці 1 і надходить у видатковий бункер 4 для сухого концентрату. Паливо подрібнюється й одночасно підсушується в шахтному млині 2 і подається пневмотранспортом у видатковий бункер 5 для сухого подрібнення палива. Обпалене вапно після гасіння в пушонку у вапногаснику 3 направляється в бункер 6. З видаткових бункерів сухі матеріали за допомогою тарілчастих живильників подаються для змішання в кульовий млин 7. Готова шихта надходить у бункер 8, звідки транспортується на тарілчастий гранулятор 9. Одночасно в гранулятор з напірних бачків 14 й 13 подається 0,01-0,02 %-вий водяний розчин каталізатора.

Гранули, що мають вологість 7-10%, направляються на підсушування теплим повітрям (105—130°) у сушарку 10. Гранули із залишковою вологою 2-3% з метою карбонізації обробляються в пересипній карбонізаційній камері 11 струмом холодних (40—60°) димових газів, що містять 20—25% CO<sub>2</sub>. Час карбонізації — 90 хв. Димові газу прохолоджуються в холодильнику 15 і воложаться в скрубєрі 16.

Процес зміцнення гранул йде за рахунок утворення мілко кристалічної структури карбонату кальцію.

Готові гранули, вивантажені з пересипної карбонізаційної камери, подаються транспортером на грохот 12, а потім надходять на склад готової продукції.

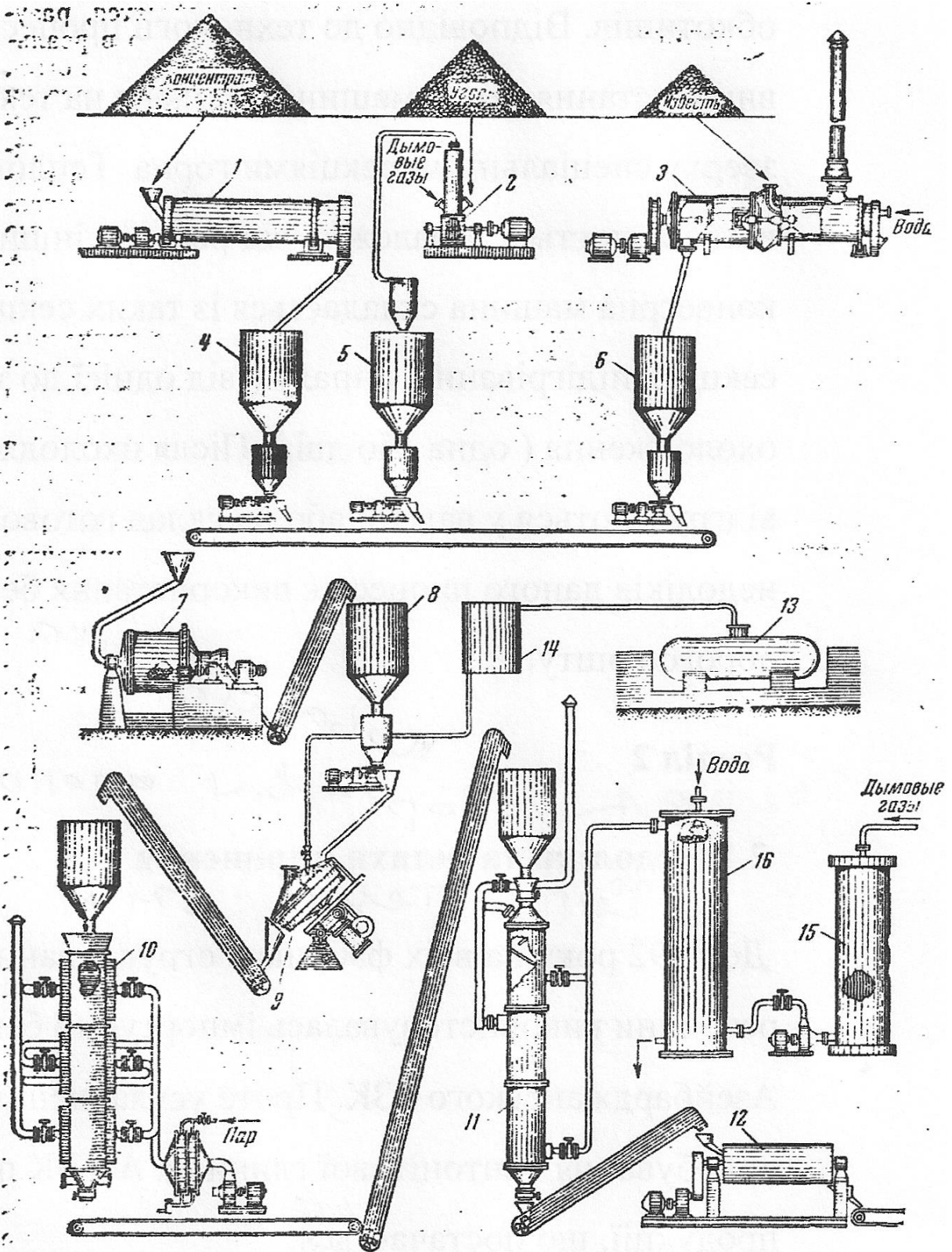


Рисунок 2 – Принципова технологічна схема хіміко-каталітичного методу

Як видно з наведеної схеми, у хіміко-каталітичному методі не застосовуються ні високі температури, ні високий тиск, що обумовлює порівняно просте апаратурне оформлення технологічного процесу. Гранули при

цьому виходять вологостійкими, механічно міцними, терmostійкими, мають досить високу відновлюваність.

Склад рудно-паливних гранул може бути досить різним, в залежності від їхнього подальшого призначення. Зокрема, гранули для доменних печей виготовлялися із шихти, що містить концентрату (з 60% Fe)- 80-85%, коксика- 5-8% і CaO- 10-12%.

### 1.2.2. Метод гідратування

У Швеції запатентований спосіб безвипалювального виробництва окатишів, в яких рудні зерна зв'язані портландцементом або шлаковим цементом. На окатиші перед завантаженням в бункер накочується шар концентрату, який відокремлює окатиші один від одного і запобігає їх склеюванню. Окатиші в бункері повинні знаходитися весь час до їх зміцнення. Під тиском вищерозміщених шарів окатишів в бункері відбувається зближення зерен руди і міцність окатишів підвищується. Деформації окатишів в нижніх шарах не спостерігається. Додаток цементу складає 10% від маси концентрату. Цемент містить  $\frac{2}{3}$  CaO і  $\frac{1}{3}$  ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Якщо концентрат містить не більше 4%  $\text{SiO}_2$ , то методом, відомим під назвою «Grangcold», можна виготовити самотверднучі та високоосновні окатиші.

Перший етап зміцнення в бункері триває 30 год. (цей час можна скоротити до 10 год., якщо одночасно з цементом додати гіпс). На цьому етапі, що є індукційним періодом, окатиші стають неліпкими й їх подальшу обробку можна вести звичайним способом. Унаслідок твердіння цементу температура в бункері підвищується приблизно до 40°C. Проте необхідно стежити за тим, щоб температура в бункері в зимову пору року була не нижча 20°C.

Зміцнення окатишів в індуктивному періоді є незначним. Після закінчення цього періоду суміш окатишів з концентратом прямує на сортувальну машину для відділення окатишів від концентрату.

Окатиші, що залишилися на ситі, повертаються в бункер для другого етапу зміцнення, після закінчення якого міцність окатишів досягає 70% остаточної міцності. Цей етап швидкого зміцнення триває 3-6 діб. Потім

окатиші вивантажують з бункера і відправляють на склад. На складі відбувається останній етап зміцнення. Остаточної міцності окатиші набувають після 4 тижнів зберігання на складі.

Окатиші, одержані безвипалювальним шляхом, в порівнянні з випаленими окатишами мають гірші механічні, але кращі металургійні властивості. Міцність на роздавлювання безвипалювальних окатишів залежно від методу їх отримання складає, Н/окатиш: карбонізовані окатиші 627,8-1706,9; теплогідратовані окатиші 755,3-1196,6; окатиші, зміцнені металевим цементом, 981-1667; окатиші з бітумінозними речовинами 196,2-559,1; окатиші з цементом 981-2943 (залежно від діаметру окатишів). За даними [3], промисловим окатишам діаметром 15 мм відповідають наступні характеристики: міцність на роздавлювання 1962 Н/окатиш; міцність на стирання 92% фракції > 6,3 мм; відновлюваність  $R_{40} = 1,2\% \text{ O}_2/\text{хв.}$ ; основність 1,0 (виражається відношенням  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ); вологість 6,5%; щільність 3,2 г/см<sup>3</sup>; насипна маса 2 г/м<sup>3</sup>.

Хімічний склад окатишів Грангколд, %: Fe 59,7; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 74,4; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8,4; CaO 5,9; SiO<sub>2</sub> 5,8; MgO 1,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,1; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,05; S 0,08; K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O 0,1 [1].

Окатиші, приготовані з добавкою портландцементу, мають таку ж високу міцність на стирання, як і випалені окатиші. Висока міцність на стирання є важливим показником з погляду транспортування. Ліндер [1] порівнював кількість фракції окатишів <5 мм, безпосередньо на місці їх виробництва і після транспортування до металургійного заводу. Частка фракції окатишів <5 мм на заводі – виробнику складала 0,5-1,5%, а на заводі – споживачеві 2,2-4,4%. Експерименти також показали, що окатиші можна транспортувати і при мінусових температурах.

У літературних джерелах приведені результати вимірювань розм'якшення окатишів, з яких виходить, що окатиші, що приготовані безвипалювальним шляхом, мають низьку температуру початку розм'якшення. Найнижчу температуру початку розм'якшення мали окатиші з бітумінозним зв'язуючим. Розм'якшення цих окатишів починалося вже при 350-420 °С залежно від ступеня карбонізації. Карбонізовані окатиші починають розм'якшуватися при

790-840 °С, а окатиші з металевим цементом мають температуру почала розм'якшення 900 °С.

В окатишах, зміцнених в автоклаві, пов'язуюча фаза змінюється на гелеподібну масу керамічного характеру, яка не розм'якшується і компенсує збільшення об'єму при відновленні.

Дослідження показали, що відновлення випалених і невипалених окатишів відбувається по різних механізмах і відновлюваність безвипалювальних окатишів є вищою, ніж у окатишів, що випалені при високій температурі. При відновленні безвипалювальних окатишів не відбувається такого значного пониження міцності, як у окатишів, випалених при високих температурах (рисунок 3).



Рисунок 3 - Порівняння міцності окатишів, одержаних лабораторним шляхом після відновлення протягом 40 хв. коксом:

1 – метод Nimba; 2 – Grandcold

З приведених способів виробництва безвипалювальних окатишів найбільш розробленим є метод зміцнення окатишів за допомогою цементу - метод «Grandcold». Цей метод був випробуваний у промислових умовах фірми «Grängser Co» продуктивністю 1,5 млн. т окатишів в рік. Досвід проплавлення цих окатишів в доменних печах Швеції та інших європейських держав був успішним.

У літературних джерелах є інформація про новий метод виробництва безвипалювальних окатишів з цементною зв'язкою. Перевагою цього методу є скорочення у декілька разів часу твердіння в порівнянні з методом «Grandcold».

При твердінні на повітрі вологістю 100% при температурі 60-100°C окатиші в шарі заввишки 0,5-1 м не склеюються.

Інтенсивність твердіння цих окатишів залежить від температури. Особливо швидко тверднуть окатиші при температурі 80-100°C. Індуктивний час складає 1-2 год., подальше твердіння продовжується 4-6 год. Максимальна міцність окатишів після закінчення обігріву у вологому середовищі досягає 70% міцності після нормального твердіння. Індуктивний час обумовлений тим, що гідратні сполуки силікатів ще не пройшли стадії кристалізації і певне підвищення міцності є слідством виникнення перехідних фаз. Кількість цементу, необхідного для отримання міцності 686-785 Н/окатиш, складає 8-9%. Хімічний склад рудної частини шихти не впливає на міцність окатишів, зміцнюваних вологим повітрям. Окатиші, що містять 8-9% цементу, зміцнені у вологому повітрі при температурі 90-100°C, мали міцність 981-1667 Н/окатиш. Металургійні властивості цих окатишів були не гірші за властивості окатишів, що тверднуть нормально, і значно краще за властивості випалених окатишів.

Серйозним недоліком всіх розглянутих методів безвипалювального зміцнення окатишів є тривалість процесу зміцнення, що досягає декількох тижнів. У суворих і помірних кліматичних умовах для здійснення технології низькотемпературного зміцнення необхідне будівництво критих опалювальних приміщень, витрати на споруду яких істотно підвищують капітальні витрати на виробництво окатишів.

### 1.2.3. Метод прискореного твердіння

З усіх досліджених способів безвипалювального одержання окатишів найбільш перспективним є метод прискореного твердіння.

Метод прискореного твердіння дозволяє скоротити тривалість обробки окатишів при нормальному тиску в десятки разів в порівнянні з раніше відомими технологіями.

Порівняно з автоклавним способом новий метод дозволяє здійснити безперервний процес зміцнення, понизити вартість переділу і капітальні витрати, помітно спростити технологічну схему і підвищити продуктивність.

Однієї з найбільш ефективних зв'язок при прискореному твердінні може опинитися портландцементна зв'язка. При використанні 5-8% портландцементу кількість кремнезему, що вноситься їм, і глинозему, що є небажаними домішками в залізородних окатишах, не перевищує їх кількості, що вноситься 1,5% бентоніту при виробництві випалювальних окатишів.

Це, а також окислення випалювальних окатишів, відсутнє в безвипалювальних окатишах, приводять до того, що при рівній основності вміст заліза в безвипалювальних окатишах на портландцементній зв'язці не нижче, ніж у випалювальних.

Вартість портландцементу знаходиться на рівні з вартістю вапна, а його виробництво може бути налагоджено в умовах металургійного підприємства.

Як і способи низькотемпературного зміцнення, метод прискореного твердіння передбачає використання у якості зв'язки гідратаційно-тверднучих цементів. При цьому з метою створення оптимальних умов гідратації підтримується висока вологість навколишнього середовища, а для прискорення процесів твердіння підвищується її температура. Після завершення процесів гідратаційного твердіння вологість середовища знижують, з тим щоб забезпечити сприятливі умови для висихання гелеподібної складової продуктів гідратації, що приводить до подальшого підвищення міцності зразків.

Принципова схема одержання окатишів методом прискореного твердіння приведена на рис. 4.

Віддозована рудна частина і цемент спочатку поступають на механічну активацію, яку можна здійснювати у кульових та стрижньових млинах або інших апаратах. Активація забезпечує хорошу ступінь змішування шихти та різке підвищення її хімічної активності. При активації шихта практично не додрібнюється, тому рудна частина по крупності повинна бути придатна для огрудкування. Подальше огрудкування активованої шихти дозволяє одержати окатиші-сирці високої якості, істотно збільшити кінцеву міцність. Активації може бути піддана як суха, так і волога шихта.

Можливий також такий варіант підготовки шихти, коли перед змішуванням її компонентів додаткової активації піддають цементну зв'язку зі

збільшенням її питомої поверхні на 10-15% [3]. Цей варіант є доцільним при використанні малоактивних цементних зв'язок або цементів, активність яких знизилася в результаті зберігання.

Вода, що додається на грануляцію, при необхідності використовується для розчинення добавок - регуляторів твердіння.

Основною стадією зміцнення при прискореному твердінні є тепло-волога обробка (ТВО), що здійснюється при 70-100 °С і 100% або близької до неї відносної вологості (пропарка). При цьому за 2-8 год. досягається 1-2-тижнева міцність зразків нормального твердіння, тобто прискорення процесів структуроутворення становить 120 -170 разів.



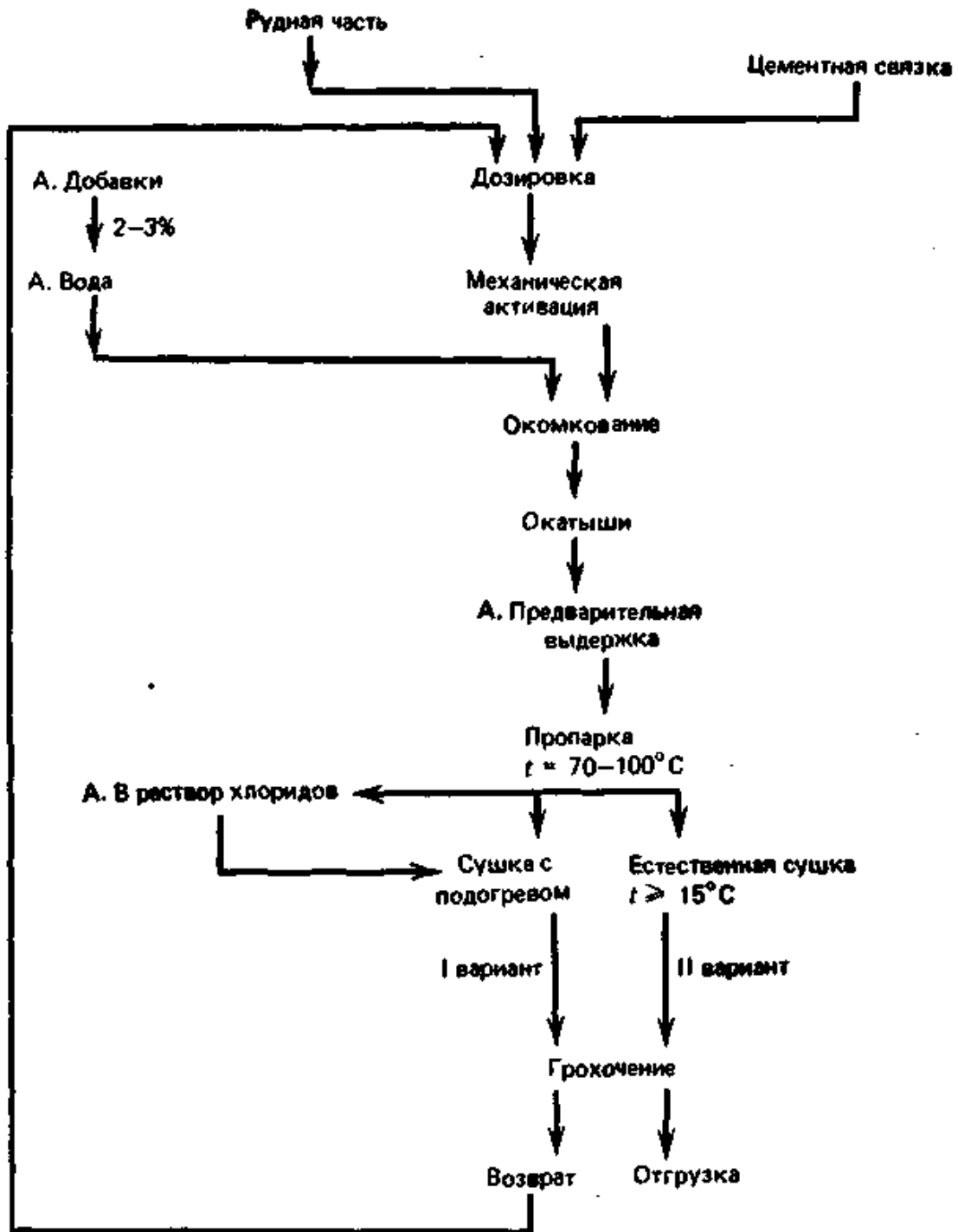


Рисунок 4 – Принципова схема методу прискореного твердіння:

А - можливий варіант, все інше - обов'язкова стадія

Для підвищення якості окатишів і ліквідації їх деструкції запропоновані оптимальні режими пропарювання, що включають витримку окатишів на стадії нагріву (при 40-65 °С) до початку схоплювання зв'язки, подачу і видалення пари в точці, що лежить нижче шару окатишів. У двох останніх випадках підвищується вологість середовища твердіння.

Сирі окатиші можуть надходити на тепло-вологу обробку відразу або через деякий час після виготовлення (після попередньої витримки). Попередня витримка на повітрі або в повітряно-вологодому середовищі, підвищуючи міцність окатишів, дозволяє уникнути їх деструкції при нагріванні. Її тривалість залежить від типу застосовуваного в'язучого, мінералогічного складу рудної частини та інших факторів і знаходиться в часовому інтервалі між початком і кінцем схоплювання в'язучого. Найменші значення відносяться до витримки на повітрі, а більші – у вологодому середовищі.

Розглянуті варіанти термообробки залізородних окатишів дозволяють зробити висновок про доцільність застосування високотемпературного випалу, але необхідно передбачити заходи щодо підвищення міцності окатишів у вихідному стані та при відновленні.

Поставлена мета досягається тим, що в способі, що включає сушіння, нагрівання верхньої частини шару зі швидкістю 200-250 °C/хв, високотемпературний випал при 1200-1350 °C в окислювальній атмосфері, окатиші охолоджують до 900-1000 °C у безкисневій атмосфері до утворення на поверхні окатишів дисоційованого до магнетиту шару, причому товщина його становить 15-40% від товщини окисленої оболонки.

Сутність способу полягає в тому, що зниження парціального тиску кисню під час охолодження інтенсивно нагрітих окатишів з 1200-1350 до 900-1000 °C супроводжується дисоціацією гематиту окисленої оболонки. Формування частково дисоційованого шару в оболонці окатишу сприяє перерозподілу напруг по перерізу окатишу та зменшенню їх на межі магнетитового ядра й окисленої оболонки. Проведені розрахунки показали, що у разі, якщо товщина дисоційованого шару становить 15-40% від товщини окисленої оболонки, величина напруг на межі магнетитового ядра та окисленої оболонки стає нижчою за межу міцності залізоокисних фаз. Це виключає розвиток тріщин і розміцнення інтенсивно нагрітих окатишів.

Для утворення безперервного дисоційованого до магнетиту шару необхідно, щоб дисоціація гематиту протікала в окисленій оболонці на глибині, що дорівнює сумарному діаметру 5-10 зерен або більше. Враховуючи, що

середній діаметр окатишу становить 13 мм, середній розмір зерен 0,05 мм, а товщина окисленої оболонки при інтенсивному нагріванні становить 0,5 діаметра окатиша, товщина безперервного дисоційованого шару не може бути меншою за 15% товщини окисленої оболонки.

Збільшення товщини дисоційованого шару більше 40% є недоцільним, тому що це веде до зниження швидкості охолодження та зменшення продуктивності випалювальних машин, а значення міцності окатишів не змінюються.

Магнетито-гематитова структура дисоційованого шару окатишів сприяє формуванню шлакової зв'язки, що складається з залізо-кальцій-силікатного скла, яке відновлюється при 700-900 °С. Скло екранує рудні зерна від безпосереднього контакту з відновлювальним газом і зсуває початок відновлення гематиту з 500-600 °С до 700-800 °С. Відновлення у цьому температурному інтервалі не супроводжується набуханням і руйнуванням гематитових зерен. Окислена оболонка окатишів з частково дисоційованим шаром слабо руйнується при відновленні, утворюючи менше дрібниці.

Запропонований захід перевірений у лабораторних умовах. Сирі окатиші діаметром 12-14 мм отримували на лабораторному огрудкувачі з концентрату, вміст заліза в якому становив 62,4%. Концентрат офлюсовували вапняком до основності 1,3 од. Випалювання окатишів проводили у вертикальній печі електричного нагріву, поміщаючи їх у кошик з жаростійкого дроту. Склад газової атмосфери для продування окатишів змінювався в різні періоди термообробки (табл. 1). Температуру вимірювали платина – платинородієвими термопарами.

Інтенсивність нагріву окатишів здійснювали, опускаючи кошик у робочу зону печі з підвищенням температури в центрі окатиша зі швидкістю 225 °С/хв. до температури 1320 °С, час випалу 6 хв., швидкість охолодження 100 °С/хв.

Температуру випалу і швидкості нагрівання окатишів, що представляють верхню, середню і нижню частини шару, вибирали відповідно до отриманих у промислових умовах інтенсивностей нагріву.

Таблиця 1 – Порівняння міцнісних властивостей обпалених окатишів при різних способах їх термообробки

Способы	Часть слоя	Температура обжига, °С	Скорость нагрева, °С/мин	Содержание кислорода, %			Свойства обожженных окатышей		
				При нагреве и обжиге	При охлаждении	FeO, %	Толщина диссоциированного слоя в % от толщины окисленной оболочки	Разбухание при восстановлении, %	Прочность на раздавливание, кг/окатыш.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Известный (прототип)	Верх	1320	225			9,0	0,0	2,15	75
	Середина	1270	125			6,0	0,0	3,51	175
	Низ	1230	100	15,0	21,0	4,4	0,0	5,68	150
	Среднее	-	-			6,5	0,0	3,75	134
Предлагаемый	Верх	1320	225			25,0	100	2,02	270
						10,0	40	2,12	274
Предлагаемый	Середина	1270	125			6,8	18	3,44	252
	Низ	1230	100	15,0	0,0	4,8	15	5,23	230
	Среднее	-	-			7,2	-	3,6	252

Швидкість охолодження повинна вибиратися з тим розрахунком, щоб час перебування окатишів при охолодженні в діапазоні 900-1000 °С був достатнім для формування дисоційованого шару товщиною 15-40% від товщини окисленої оболонки. Для офлюсованих окатишів з концентрату із вмістом заліза 62,4% цій умові відповідають швидкості охолодження, що дорівнюють 100 °С/хв. або нижче.

При охолодженні окатишів у безкисневій атмосфері до певної температури, а потім на повітрі, міцність окатишів змінюється наступним чином (табл. 2).

Таблиця 2 – Зміна міцності окатишів при охолодженні

Температура, до ко- торой охладжали ока- тыши в бескислород- ной среде, °С	1300	1200	1100	1000	900	800	600
Прочность, кг/окатыш	75	107	180	260	274	266	270

З проведених результатів випливає, що безкисневу атмосферу при охолодженні для отримання міцних окатишів потрібно підтримувати до 900-1000 °С. Подальше охолодження можна проводити в окисленому середовищі.

Зміну співвідношення магнетиту і гематиту по перерізу окатиша, товщину окисленої оболонки та дисоційованого шару, а також радіус магнетитового ядра визначали на структурному аналізаторі.

Обпалені окатиші випробовували на міцність при стисканні в потоці газу, що містить 33-35% CO і 65-67% CO<sub>2</sub> при нагріві зі швидкістю 10 °С/хв. до 1000 °С.

Результати порівняльних випробувань відомого та запропонованого способів наведено в табл. 1. Отримані дані свідчать про те, що пропонуваній спосіб дозволяє підняти середню за шаром міцність окатишів зі 134 до 252 кг/окатиш.

Спосіб може бути здійснений на конвеєрних випалювальних машинах без зміни продуктивності агрегату, оскільки швидкість нагріву, температури випалу та швидкість охолодження в досліджах не відрізнялися від отриманих у промислових умовах. У зоні рекуперації верхню частину шару необхідно охолоджувати до 900-1000 °С безкисневими продуктами згоряння. Останні можуть бути отримані спалюванням палива з коефіцієнтом надлишку повітря  $\approx 1$ , а також при використанні відомого способу охолодження шматкових матеріалів в охолоджувачі з нейтральною атмосферою. У разі охолодження продуктами спалювання газу знизити їх температуру до необхідної (900-1000 °С) можна, змішуючи повітря, що йде на горіння, з димовими газами зони випалу або парою.

## 2. РОЗРАХУНОК ШИХТИ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ОКАТИШІВ

### 2.1. Розрахунок питомих витрат компонентів шихти

Хімічний склад компонентів шихти приведений у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад компонентів шихти ЦГЗКа

Матеріали	Вміст компонентів, %						
	Fe <sub>заг</sub>	S <sub>заг</sub>	P	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Концентрат залізородний	68,24	0,09	0,002	29,81	64,36	4,36	0,04
Вапняк	0,32	0,06	0,06	0,16	0,28	1,22	0,24
Бентоніт	3,79	0,08	0,11	–	5,41	62,19	14,60

Продовження табл. 2.1

Вміст компонентів, %				
CaO	MgO	Інші	ВПП	∑оксидів
0,04	0,10	1,01	0,28	100,00
52,86	1,70	0,15	43,39	100,00
3,26	3,58	4,03	6,93	100,00

Рівняння матеріального балансу:

$$G_k = P \cdot K_p + \Phi \cdot K_\phi + B \cdot K_b \pm O_2$$

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

$P$ ,  $\Phi$ ,  $B$  – питомі витрати відповідно рудної, флюсової і бентонітової складових шихти, кг/100(1000) кг окатишів;

$K_p, K_\phi, K_\delta$  – коефіцієнти виходу випаленої маси з сухої маси відповідно рудного, флюсового і бентонітового компонентів шихти, част. од.;

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

Середньозважені коефіцієнти виходу випаленої маси з сухої маси кожного з сумішевих компонентів шихти розраховують за формулою:

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

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

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

$$K_p^0 = 0,01(100 - 0,65 \cdot 0,09 - 0,28) = 0,9966$$

$$K_\phi^0 = 0,01(100 - 0,65 \cdot 0,06 - 43,39) = 0,5657$$

$$K_\delta^0 = 0,01(100 - 0,65 \cdot 0,08 - 6,93) = 0,9302$$

Середньозважений приріст або втрата маси від окислювання або відновлення оксидів заліза компонентів шихти в процесі термообробки окатишів розраховують по формулі:

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

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

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left( \frac{P_\Sigma \cdot 29,81}{100} + \frac{\Phi_\Sigma \cdot 0,16}{100} + \frac{B_\Sigma \cdot 0}{100} - 1,2 \right) =$$

$$= 0,0331P_\Sigma + 0,0002\Phi_\Sigma - 0,1333$$

Складаємо рівняння матеріального балансу:

$$1000 = 0,9966P_\Sigma + 0,5657\Phi_\Sigma + 0,9302B_\Sigma + 0,0331P_\Sigma + 0,0002\Phi_\Sigma - 0,1333$$

$$1000,1333 = 1,0297P_{\Sigma} + 0,5659\Phi_{\Sigma} + 0,9302B_{\Sigma}$$

Рівняння основності:

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

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

$m_0$  - основність окатишів, част.од.

$$0,8 = \frac{0,14P_{\Sigma} + 54,56\Phi_{\Sigma} + 6,84B_{\Sigma}}{4,40P_{\Sigma} + 1,46\Phi_{\Sigma} + 76,79B_{\Sigma}}$$

$$3,38 P_{\Sigma} - 53,392 \Phi_{\Sigma} + 54,592 B_{\Sigma} = 0$$

У результаті отримуємо систему двох рівнянь (матеріального балансу й основності):

$$\begin{cases} 1000,1333 = 1,0297P_{\Sigma} + 0,5659\Phi_{\Sigma} + 0,9302B_{\Sigma} \\ 3,38 P_{\Sigma} - 53,392 \Phi_{\Sigma} + 54,592 B_{\Sigma} = 0 \end{cases}$$

Питома витрата бентонітової глини  $B_{\Sigma} = 5,2$  кг/т.

$$\begin{cases} 1,0297P_{\Sigma} + 0,5659\Phi_{\Sigma} = 995,2963 \\ 53,392 \Phi_{\Sigma} - 3,38 P_{\Sigma} = 283,8784 \end{cases}$$

Питомі витрати рудної, флюсової та бентонітової складової суміші (суха маса):

$$P_{\Sigma} = 931,288 \text{ кг/т}$$

$$\Phi_{\Sigma} = 64,267 \text{ кг/т}$$



$$B_{\Sigma} = 5,2 \text{ кг/т}$$

Всього сухої шихти – 1000,755 кг/т.

## 2.2 Розрахунок хімічного складу окатишів

Маса внесених у шихту елементів й оксидів:

$$Fe_{\text{зар}} = 931,288 \cdot 0,6824 + 64,267 \cdot 0,0032 + 5,2 \cdot 0,0379 = 635,9137 \text{ кг}$$

$$S_{\text{зар}} = 931,288 \cdot 0,0009 + 64,267 \cdot 0,0006 + 5,2 \cdot 0,0008 = 0,8809 \text{ кг}$$

$$FeO = 931,288 \cdot 0,2981 + 64,267 \cdot 0,0016 = 277,7198 \text{ кг}$$

$$Fe_2O_3 = 931,288 \cdot 0,6436 + 64,267 \cdot 0,0028 + 5,2 \cdot 0,0541 = 599,8382 \text{ кг}$$

$$SiO_2 = 931,288 \cdot 0,0436 + 64,267 \cdot 0,0122 + 5,2 \cdot 0,6219 = 44,622 \text{ кг}$$

$$Al_2O_3 = 931,288 \cdot 0,0004 + 64,267 \cdot 0,0024 + 5,2 \cdot 0,1460 = 1,286 \text{ кг}$$

$$CaO = 931,288 \cdot 0,0004 + 64,267 \cdot 0,5286 + 5,2 \cdot 0,0326 = 34,514 \text{ кг}$$

$$MgO = 931,288 \cdot 0,0010 + 64,267 \cdot 0,0170 + 5,2 \cdot 0,0358 = 2,21 \text{ кг}$$

$$\text{Інші} = 931,288 \cdot 0,0101 + 64,267 \cdot 0,0015 + 5,2 \cdot 0,0403 = 9,712 \text{ кг}$$

$$\text{ВПП} = 931,288 \cdot 0,0028 + 64,267 \cdot 0,4339 + 5,2 \cdot 0,0693 = 30,853 \text{ кг}$$

Вміст елементів і оксидів в окатишах

Без зміни переходять з шихти в окатиші всі елементи й оксиди, крім сірки, вуглецю, ВПП, FeO, і Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Розраховується з відповідних рівнянь:

$$Fe_{заг.а(о)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot Fe_{P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Pi_{\Sigma}}^0 + B_{\Sigma} \cdot Fe_{B_{\Sigma}}^0}{G_{а(о)}} , \% \quad (1.17)$$

$$SiO_{2а(о)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot SiO_{2P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Pi_{\Sigma}}^0 + B_{\Sigma} \cdot SiO_{2B_{\Sigma}}^0}{G_{а(о)}} , \% \quad (1.18)$$

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

Маса FeO шихти, що окислюється (-) або відновлюється (+), обчислюється за формулою:

$$G_{FeO} = G_{FeO_m} - G_{FeO_{а(о)}}, \text{ кг/т аглом. (окат.)} \quad (1.20)$$

де  $G_{FeO}, G_{FeO_m}, G_{FeO_{а(о)}}$  - маса FeO, відповідно, що окислюється (відновлюється), в шихті і в агломераті (окатишах), кг/т.

$$G_{FeO} = 1000 \cdot 0,012 - 277,7198 = -265,7198 \text{ кг.}$$

Відповідно, маса  $Fe_2O_3$ , що утворився (+) або підлягав відновленню (-) обчислюється за формулою:

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

$$G_{Fe_2O_3} = \frac{265,7198 \cdot 160}{144} = 295,2442 \text{ кг}$$

У процесі термообробки офлюсованих окатишів видаляється 50-80% (в середньому 65%) загальної сірки шихти. Фосфор в процесі термообробки окатишів не видаляється.

Втрати при прожарюванні (ВПП) в окатишах зазвичай складають 0,0 ÷ 0,8%. Отже, видаляється при агломерації і термообробці окатишів 100 ÷ 92% втрат при прожарюванні шихти.

Результати проведених розрахунків заносяться в балансову таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 - Балансова таблиця витрат сировини і хімічного складу окатишів

Матеріали	Вміст компонентів, %											
	Fe <sub>заг</sub>		S <sub>заг</sub>		FeO		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
Залізорудний концентрат	68,24	635,5109	0,09	0,8382	29,81	277,617	64,36	599,377	4,36	40,604	0,04	0,3725
Вапняк	0,32	0,2057	0,06	0,0386	0,16	0,1028	0,28	0,1799	1,22	0,7841	0,24	0,1542
Бентоніт	3,79	0,1971	0,08	0,0041	–	0	5,41	0,2813	62,19	3,2339	14,60	0,7592
Всього шихти	63,54	635,9137	0,09	0,8809	27,75	277,7198	59,94	599,8382	4,46	44,622	0,14	1,286
Приріст (+) втрата (-) маси				-0,5726		-265,7198		+295,2442				
Окатиші	63,63	635,9137	0,03	0,3083	1,20	12,0	89,56	895,0824	4,46	44,622	0,13	1,286

Продовження таблиці 2.8

Вміст компонентів, %								Витрата сухих, кг/т	Мех. втрапи, %	Витрата сухих з втрагами, кг/т	Вміст вологи, %	Витрата вологих, кг/т
CaO		MgO		Інші		ВПП						
%	кг	%	кг	%	кг	%	кг					
0,04	0,3725	0,10	0,9313	1,01	9,406	0,28	2,6076	931,288	2,5	955,1672	10,3	1064,85
52,86	33,972	1,70	1,0925	0,15	0,0964	43,39	27,885	64,267	2,5	65,9149	3,7	68,45
3,26	0,1695	3,58	0,1862	4,03	0,2096	6,93	0,3604	5,2	2,5	5,3333	25,8	5,66
3,45	34,514	0,22	2,21	0,97	9,712	3,08	30,853	1000,755		1026,4154		1138,96
							-30,853					
3,45	34,514	0,22	2,21	0,97	9,712	-	-	999,4264				

Після проведення всіх розрахунків складається таблиця розрахованого хімічного складу окатишів (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Хімічний склад окатишів

Вміст компонентів, %								
Fe <sub>заг</sub>	S <sub>заг</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Інші
63,63	0,03	1,20	89,56	4,46	0,13	3,45	0,22	0,97

Перевіряється основність розрахованих окатиші:

$$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{3,45 + 0,22}{4,46 + 0,13} = 0,80 \text{ част. од.}$$

### 3 РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

Вихідні данні для розрахунку шихти:

1) Питомі витрати вихідних компонентів шихти (кг/т), їх вологості (%) та крупність (мм) (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Питомі витрати вихідних компонентів шихти, їх вологість та крупність

Компоненти шихти	Питомі витрати $M_{сух.}$ , кг/т окаатишів	Вміст вологи, %	Крупність, мм
Залізорудний концентрат	931,288	10,3	-0,074
Вапняк	64,267	3,7	-80
Бентоніт	5,2	25,8	-150

2) Вихід повернення після операції просівання сирих окаатишів 6%.

3) Оптимальна вологість шихти в процесі змішування і огрудкування ( $W_{сир. ок.} = 9,0-9,5\%$ ).

4) Вихід відсіву (повернення) випалених окаатишів - 1%.

5) Питома витрата постелі – 200кг/т.

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

Визначаємо масу вологих вихідних компонентів шихти з урахуванням їх механічних втрат за формулою:

$$M_{вол.} = \frac{M_{сух.} \cdot 10^4}{(100 - W)(100 - V_{тр.})},$$

де  $W$  - вміст води в матеріалі, %;

$W_{тр}$  – механічні втрати компонентів шихти, %.

Маса залізородного концентрату:

$$M_{з.к.} = \frac{931,288 \cdot 10^4}{(100 - 10,3)(100 - 2,5)} = 1064,85 \text{ кг}$$

Маса вапняку:

$$M_{в.} = \frac{64,267 \cdot 10^4}{(100 - 3,7)(100 - 2,5)} = 68,45 \text{ кг}$$

Маса бентоніту:

$$M_{б.} = \frac{5,2 \cdot 10^4}{(100 - 25,8)(100 - 2,5)} = 5,66 \text{ кг}$$

Визначаємо масу вапняку після подрібнення та часткового підсушування до вологості 2,5%:

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

$$M_{в.подр.} = 68,45 - 68,45 \cdot \frac{3,7 - 2,5}{100} = 67,63 \text{ кг}$$

Визначаємо масу бентоніту після його підсушування до вологості 12%:

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

$$M_{б.підс.} = 5,66 - 5,66 \cdot \frac{25,8 - 12}{100} = 4,88 \text{ кг}$$

Визначаємо масу бентоніту після подрібнення та часткового підсушування до вологості 4%:

$$M_{\text{б.подр.}} = 4,88 - 4,88 \cdot \frac{12 - 4}{100} = 4,49 \text{ кг}$$

Визначаємо масу сухого відсіву за формулою:

$$M_{\text{відс.}} = \frac{M_{\text{ок}} \cdot \text{Відсів}}{100},$$

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

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

Маса компонентів шихти з урахуванням відсіву:

$$M_{\text{вих.}} = 1064,85 + 67,63 + 4,49 + 10 = 1146,97 \text{ кг};$$

Визначаємо середньозважену вологість компонентів шихти за формулою

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

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

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

$$W_{\text{сер.}} = 10,3 \frac{1064,85}{1146,97} + 2,5 \frac{67,63}{1146,97} + 4 \frac{4,49}{1146,97} + 0 \frac{10}{1146,97} = 9,72 \%$$

Масу шихти, що подається на огрудкування, визначають з урахуванням маси повернення сирих окатишів, що виділяється при укладанні сирих окатишів на випалювальну машину:



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

де  $V_{\text{с.ок.}}$  – вихід оборотного продукту при завантаженні сирих окатишів на випалювальну машину (% від маси).

$$M_{\text{ш.огр.}} = 1146,97 \left( 1 + \frac{6}{100} \right) = 1215,79 \text{ кг.}$$

Визначимо масу випалених окатишів при сході з випалювальної машини з урахуванням відсіву та постелі:

$$C_{\text{п}} = 1000 + M_{\text{відс.}} + \text{Пост},$$

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

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

## 4 ВИБІР І РОЗРАХУНОК ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 4.1 Розрахунок годинної продуктивності цеху з виробництва окатишів

$$P_o = \frac{G}{\eta \cdot 365 \cdot 24},$$

де  $G$  – річне виробництво окатишів, т/рік;

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

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

365 – календарна кількість діб в рік;

24 – кількість годин в добі.

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

### 4.2. Розрахунок годинної потреби в компонентах шихти

Розрахунок проводиться виходячи з питомої витрати (на 1 т окатишів) кожного з компонентів шихти початкової вологості, визначеної в розрахунку шихти (розд. 2).

$$P_{з.к.} = P_a(o) \cdot X_{з.к.}, \text{ т/год}$$

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

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

$$P_{з.к.} = 698,36 \cdot 1,06485 = 743,65 \text{ т/год.}$$

$$P_{в.} = 698,36 \cdot 0,06845 = 47,80 \text{ т/год.}$$

$$P_{б.} = 698,36 \cdot 0,00566 = 3,95 \text{ т/год.}$$

#### 4.3 Розрахунок необхідної кількості витратних бункерів для компонентів шихти

Розрахунок проводиться виходячи з годинної потреби в компоненті шихти і прийнятого нормативного його запасу в бункерах:

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

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

$\tau$  – прийнятий нормативний запас компонента шихти в бункерах(4-10 год), год;

$V_{б}$  – об'єм стандартних бункерів (100, 130, 200), м<sup>3</sup>;

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

$\gamma$  – насипна маса компонента шихти, т/м<sup>3</sup>.

Після розрахунку кількість бункерів округляється до цілого числа (в більшу сторону). Приймається парна кількість бункерів, виходячи з необхідності забезпечення роботи двох потоків.

Кількість бункерів для залізрудного концентрату:

$$n_{з.к.} = \frac{743,65 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 15,7$$

Приймаємо 16 бункерів.

Кількість бункерів для вапняку:

$$n_{\text{в.}} = \frac{47,80 \cdot 8}{0,98 \cdot 200 \cdot 0,85} = 2,3$$

Приймаємо 4 бункери.

Кількість бункерів для бентоніту:

$$n_{\text{б.}} = \frac{3,95 \cdot 8}{0,93 \cdot 200 \cdot 0,85} = 0,2$$

Приймаємо 2 бункера.

4.4 Вибір і розрахунок кількості дробарок і млинів для підготовки за крупністю флюсів і бентонітової глини

Для виробництва окатишів використовують дробарки і кульові вентилявані млини. Крім того, при виробництві окатишів після дроблення бентонітову глину (якщо її вологість становить 25-30 %) підсушують в сушильному барабані до вологості 12-15 %.

Для дроблення флюсів, що мають крупність більше 10 мм, у виробництві окатишів застосовують молоткові дробарки типу ДМРИЭ-1450×1300 продуктивністю 250 т/год.

Для дроблення вихідної вологої бентонітової глини у виробництві окатишів застосовують молоткові дробарки, що самоочищуються, типу СМД-102 продуктивністю 150-500 т/год. Крупність дробленої бентонітової глини становить 0-30 мм.

Для подрібнення флюсів і бентонітової глини у виробництві окатишів застосовують вентилявані кульові млини типу ШБМ-370/850 продуктивністю 40-50 т/год.

Кількість дробарок і млинів розраховується за формулою:

$$n = \frac{P_{в.}}{q},$$

$$n = \frac{P_{б.}}{q},$$

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

$q$  – продуктивність дробарки або млина, т/год.

Після розрахунку кількість дробарок і млинів округляється до цілої величини в більшу сторону. Приймається на одну дробарку (або млин) більше розрахункової величини для забезпечення резерву при їх ремонті.

Кількість молоткових дробарок для вапняку:

$$n_{др.в.} = \frac{47,80}{250} = 0,2$$

Приймаємо 2 дробарки.

Кількість молоткових дробарок для бентонітової глини:

$$n_{др.б.} = \frac{3,95}{150} = 0,03$$

Приймаємо 2 молоткові дробарки.

Кількість кульових млинів для вапняку:

$$n_{мл.ф.} = \frac{47,80}{50} = 0,96$$

Приймаємо 2 кульові млини.

Кількість кульових млинів для бентоніту:

$$n_{\text{мл.б.}} = \frac{3,95}{50} = 0,1$$

Приймаємо 2 млини.

#### 4.5 Вибір і розрахунок обладнання для термообробки сирих окатишів

Для термообробки сирих окатишів використовують випалювальні конвеєрні машини. Тип конвеєрної машини і їх кількість в цеху розраховують виходячи із заданого річного виробництва окатишів і питомої продуктивності машини на гарячу стрічку-годину з урахуванням того, що в цеху їх повинно бути не менше 2 і не більше 10.

Питома продуктивність випалювальних машин для термообробки окатишів залежить від питомих витрат флюсу і вуглецю в шихті. Кожні 10 кг флюсу, що вводиться на 1 т окатишів, знижують питому продуктивність машини на 0,83% або 0,0079 т/м<sup>2</sup>·год.

Виходячи з розрахованої питомої продуктивності машини для термообробки окатишів розраховується сумарна площа спікання (термообробки):

$$S_{\Sigma} = \frac{P_o}{q}, \text{ м}^2,$$

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

$q$  – питома продуктивність випалювальної машини, т/м<sup>2</sup>·год.

$$q = 0,897 \text{ т/м}^2 \cdot \text{год.}$$

$$S_{\Sigma} = \frac{698,36}{0,897} = 778,6 \text{ м}^2$$

Для термообробки сирих окатишів вибираємо випалювальні конвеєрні машини з корисною площею 520 м<sup>2</sup>.

Їх кількість розраховуємо за формулою:

$$N_o = \frac{S_{\Sigma}}{S_m},$$

де  $N_o$  – кількість машин;

$S_m$  – корисна площа обраної машини, м<sup>2</sup>.

Отриманий після розрахунку результат округляється в більшу сторону до цілої величини. Резерв кількості машин не передбачається.

$$N_o = \frac{778,6}{520} = 1,5$$

Приймаємо 2 випалювальні машини.

Визначається годинна продуктивність випалювальної машини:

$$P_m = S_m \cdot q, \text{ т/ГОД.},$$

$$P_m = 520 \cdot 0,897 = 466,4 \text{ т/ГОД.}$$

4.6 Вибір і розрахунок кількості огрудкувачів для отримання сирих окатишів

Для отримання сирих окатишів обираємо чашеві (діаметром 7,5 м) огрудкувачі продуктивністю 100-120 т/год. придатного (8-18 мм) класу.

Кількість огрудкувачів для забезпечення годинного виробництва однією машиною розраховується:

$$n_{огр.} = \frac{P_m}{K \cdot P_{огр.}}, \text{ ШТ.}$$

де  $P_m$  - годинна продуктивність машини для термообробки окатишів, т/год;

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

$P_{огр}$  - годинна продуктивність огрудкувача, т/год.

Отриманий після розрахунку результат округляється до цілої величини в більшу сторону. Приймається на 1 огрудкувач більше розрахункової величини для забезпечення резерву при ремонті.

З табл. 2.8 видно, що для отримання 999,4264кг окатишів використовується 1138,96кг вологих шихтових матеріалів. Коефіцієнт виходу 1 т окатишів складає:

$$K = \frac{999,4264}{1138,96} = 0,88.$$

$$n_{огр.} = \frac{466,4}{0,88 \cdot 120} = 4,4$$

Приймаємо 6 огрудкувачів.

Загальна кількість огрудкувачів дорівнює:

$$n_{\Sigma огр.} = N_o \cdot n_{огр.},$$

$dep_{\Sigma огр.}$  - кількість огрудкувачів цеху, шт.;

$N_o$  - кількість випалювальних машин, шт.;

$n_{огр.}$  - кількість огрудкувачів на одній машині, шт.

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



#### 4.7 Зведені дані по проекту цеху з виробництва окатишів

Таблиця 4.1 - Витрата компонентів шихти

Компоненти шихти	Питома витрата, кг/т окатишів	Годинна витрата, т/год	Добова витрата, т/добу	Річна витрата, т/рік
Залізорудний концентрат	1064,85	743,65	17847,6	5537217,9
Бентоніт	68,45	47,80	1147,2	355918,8
Вапняк	5,66	3,95	94,8	29411,7
Разом вологої шихти	1138,96	795,4	19089,6	5922548,4

Таблиця 4.2 –Виробництво готової продукції

Продукція	Годинне виробництво, т/год.	Добове виробництво, т/добу	Річне виробництво, т/рік
Окатиші	698,36	16760,64	5200000

Таблиця 4.3 - Основне технологічне обладнання

Найменування обладнання	Кількість, шт.	Тип	Продуктивність, т/год.
Витратні бункери концентрату	16	200 м <sup>3</sup>	-
Витратні бункери бентоніту	4	200 м <sup>3</sup>	-
Витратні бункери вапняку	2	200 м <sup>3</sup>	-
Молоткові дробарки для флюсів	2	ДМРИЭ-1450x1300	250

Молоткові дробарки для бентоніту	2	СМД-102	150
Кульові вентилявані млини	4	ШБМ-3700/850	50
Огрудкувачі	12	Чашеві $\varnothing$ 7 м	120
Випалювальні машини	2	520 м <sup>2</sup>	-

Таблиця 4.4 – Хімічний склад окатишів

Вміст компонентів, %								
Fe <sub>заг</sub>	S <sub>заг</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Інші
63,63	0,03	1,20	89,56	4,46	0,13	3,45	0,22	0,97

## ВИСНОВКИ

1. Технологічні схеми виробництва залізорудних окатишів є комбінацією двох етапів: виготовлення сирих окатишів з наступним їх зміцненням. Процес зміцнення сирих окатишів можна реалізувати випалювальним і безвипалювальним способами. У роботі детальна увага приділена саме цим технологічним прийомам зміцнення окатишів.

2. Сьогодні на зарубіжних та вітчизняних фабриках з виробництва залізорудних окатишів найпоширенішим способом зміцнення сирих гранул є термообробка на обпалювальних конвеєрних машинах. Для цього сирі окатиші послідовно проходять п'ять технологічних зон: сушіння, підігріву, високотемпературного випалу, рекуперації й охолодження. Сумарний час перебування окатишів на стрічці машини становить 20-30 хв. Такий режим забезпечує повний процес перетворення сирих окатишів з вихідною міцністю 0,8-1,5 кг/ок. в обпалений кусковий продукт міцністю 150-350 кг/ок.

3. Дослідниками було встановлено, що під час термообробки спостерігається зниження властивостей міцності обпалених окатишів верхнього горизонту шару під тривалим впливом високих температур. Окатиші верхнього шару набувають зональної структури внаслідок дисоціації гематиту та рекристалізованих процесів. Крім того, окатиші злипаються в грона, що призводить до зниження газопроникності шару. У той же час для отримання міцних окатишів нижніх горизонтів шару необхідна витримка шару в зоні високих температур для досягнення мінімально необхідних температур, що сприяють зміцненню окатишів нижнього шару. Крім того, спостерігається значне розміцнення окатишів у зоні охолодження. Під дією холодного повітря внаслідок розвитку напруг у структурі гранул утворюються мікротріщини. Міцність окатишів низу шару падає до 100 кг/ок.

4. З недавнього часу у нашій країні та за кордоном розробляються і впроваджуються методи безобпалового окускування. Ці процеси

ґрунтуються на відомих методах зміцнення окускованих залізорудних матеріалів із застосуванням сполучних добавок, що не потребують високотемпературного випалу.

5. Ряд процесів безвипалового отримання окатишів пройшов стадію промислової перевірки: хіміко-каталітичний метод одержання окатишів, метод гідратування, метод прискореного твердіння тощо. Ці методи мають низку переваг, що полягають у тому, що капітальні витрати та вартість переділу значно нижчі, обладнання дешевше та просте, покращено умови праці порівняно з виробництвом випалювальних матеріалів. Крім того, безвипалювальні методи зберігають майже незмінними склад і властивості вихідної сировини, внаслідок чого процеси відновлення безобпалових окатишів починаються раніше, ніж обпалених, і протікають інтенсивніше. До недоліків безвипалових процесів слід віднести відсутність обладнання, порівнянного за продуктивністю з випалювальними агрегатами та непридатність процесів для обробки концентратів, що містять шкідливі домішки, наприклад, сірчистих концентратів. До того ж, окатиші, одержані безвипалювальним шляхом, в порівнянні з випаленими окатишами мають гірші механічні, але кращі металургійні властивості.

6. Розглянуті в роботі варіанти термообробки залізорудних окатишів дозволяють зробити висновок про доцільність застосування високотемпературного випалу, але необхідно передбачити заходи щодо підвищення міцності окатишів у вихідному стані та при відновленні. Тому розглянутий спосіб, що включає звичайні умови термообробки окатишів у зонах сушіння, нагрівання та високотемпературного випалу в окислювальній атмосфері з наступним охолодженням окатишів до 900-1000 °С у безкисневій атмосфері до утворення на поверхні окатишів дисоційованого до магнетиту шару. Подальше охолодження можна проводити в окисному середовищі. Пропонований спосіб дозволяє підняти середню за шаром міцність окатишів зі 134 до 252 кг/окатиш.