

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
за освітньо-професійною програмою – Металургія

Тема роботи: «ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТИПУ
ВИПАЛЮВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ОКАТИШІВ
В УМОВАХ ФАБРИКИ З РІЧНОЮ ПРОДУКТИВНІСТЮ 7,2 МЛН
ОКАТИШІВ ОСНОВНІСТЮ 0,8»

Виконав
студент гр. МТ-21

Олександр ГЛУЩЕНКО

Керівник
випускної роботи

Володимир ПЛОТНІКОВ

Нормоконтролер

Володимир ПЛОТНІКОВ

Завідувач кафедри

Сергій САВЕЛЬСВ

Кривий Ріг
2025 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**Факультет:** гірничо-металургійний**Кафедра** металургії чорних металів і ливарного виробництва**Освітньо-кваліфікаційний рівень:** бакалавр**Спеціальність:** 136 Металургія**Затверджую**Зав. кафедрою _____
« ____ » _____ 2025р**ЗАВДАННЯ****на випускню кваліфікаційну роботу студента**_____ **Глуценка Олександра Івановича** _____

1. Тема роботи: Вибір та обґрунтування типу випалювального агрегату для термообробки окатишів в умовах фабрики з річною продуктивністю 7,2 млн т окатишів основністю 0,8

Керівник роботи: __к.т Володимир Володимирович Плотніков
затверджено наказом по КНУ від «__04__» _____03_____2025 р. №_149с__

2. Строк подання роботи студентом «__01__» _____06_____2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Випалювальний агрегат, термообробка окатишів, річна продуктивність фабрики 7,2 млн. т., основність 0,8.

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

Критичний аналіз літературних джерел і передового досвіду працюючих підприємств для формування задач дослідження. Розробка методики дослідження.

Результати досліджень і їх аналіз. Техніко-економічна оцінка результатів досліджень. Санітарно-екологічна оцінка результатів досліджень.

5. Перелік графічного матеріалу

Схеми МБЛЗ. Схема ливарно-прокатного стану із кристалізатором роторного типу для алюмінієвого дроту. Схема машини безперервного лиття. Основні функціональні елементи МБЛЗ. Устаткування для суміщення ливарно-прокатних процесів. Схема калібровки балки №10. Результати розрахунку калібровки.

6. Календарний план

№ з/п	Етапи роботи	Термін виконання
1	Збір і обробка необхідного матеріалу для виконання кваліфікаційної роботи	20 январа по 1 юня 20.01.2025 р. — 31.01.2025 р.
2	Загальна частина	01.02.2025 р. — 15.02.2025 р.
3	Спеціальна частина	16.02.2025 р. — 15.03.2025 р.
4	Технологічна частина	16.03.2025 р. — 15.04.2025 р.
5	Виконання графічної частини	16.04.2025 р. — 31.05.2025 р.
6	Перевірка роботи на плагіат	01.06.2025 р. — 15.06.2025 р.
7	Захист випускної роботи бакалавра	23.06.2025 р.

Дата видачі завдання: «__20__»____01____2025р.

Студент _____

Олександр ГЛУЩЕНКО

Керівник
випускної роботи _____

Володимир ПЛОТНИКОВ

РЕФЕРАТ

до випускної кваліфікаційної роботи на тему:

Вибір та обґрунтування типу випалювального агрегату для термообробки окатишів у фабричних умовах виробництва 7,2 млн окатишів основністю 0,8.

Пояснювальна записка — 80 с., 10 табл., 6 рис., 45 джер..

Об'єкт дослідження: процес термообробки залізорудних окатишів; предмет — вплив конструктивних і режимних параметрів випалювального агрегату на продуктивність.

Мета роботи: вибрати агрегат мінімальними питомими витратами та викидами та огляд технологій; формування базової шихти; розрахунок матеріального, теплового та газового балансів для кругової печі, шахтної печі й конвеєрної випалювальної машини; технічне порівняння; вибір устаткування; оцінка енергоефекту.

Методи дослідження: математичне моделювання.

Результати роботи: розроблено шихту 930 кг концентрату + 144 кг СаО-МgО-флюсів + 7 кг твердопалива + 8 кг бентоніту. Побудовано універсальний індекс комплексної ефективності $E_{\text{комп}}$. Доведено, що дві машини ОК-520 сумарною площею 1006 м² забезпечують 7,2 млн т/рік при $q_{\text{газ}}=7,2$ ГДж/т та $\text{CO}_2=180$ кг/т, що на 21 % менше порівняно з круговою піччю. Розраховано комплект обладнання: 45 витратних бункерів, 6 млинів, 12 огрудкувачів, 4 змішувачі, 2 машини ОК-520.

Ключові слова: ОКАТИШ, ВИПАЛЮВАЛЬНА МАШИНА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, CO_2 -СКОРОЧЕННЯ, ШИХТА, РОЗРАХУНОК БАЛАНСУ.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА	
7	
1.1 Актуальність та загальний огляд виробництва окатишів	7
1.2 Коротка характеристика передбачуваного підприємства	7
1.3 Основні тенденції розвитку ринку залізорудних окатишів	
8	
1.4 Технологічний процес виробництва окатишів: загальний опис	
Процес виробництва залізорудних окатишів передбачає такі ключові стадії:.....	9
1.5 Значення основності 0,8 у формуванні властивостей окатишів	10
1.6 Перспективи інтеграції виробництва окатишів у металургійний цикл	
України	
11	
1.7 Висновки до розділу “Загальна частина”	12
2 СПЕЦЧАСТИНА	13
2.1 Мета і завдання спецчастини	13
2.2 Вихідні дані та технічні вимоги до випалювального агрегату	13
2.3 Огляд і конструктивні особливості основних типів випалювальних агрегатів.....	13
2.3.1 Конвеєрна (стрічкова) випалювальна машина	
14	
2.3.2 Обертова піч.....	20
2.3.3 Шахтна піч	24
2.4 Порівняльний аналіз агрегатів	30
2.5 Конструктивні аспекти обраного агрегату (конвеєрна машина)	30
2.6 Перспективи модернізації та розвитку технології.....	31
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	32
3.1 Розрахунок питомих витрат компонентів шихти	32
3.2 Розрахунок хімічного складу окатишів	37
3.3 Розрахунок технологічної схеми виробництва окатишів	39
3.4 Вибір і розрахунок потреби в основному технологічному обладнанні	
.....	42

	6
3.4.1 Розрахунок погодинної потреби у компонентах шихти	42
3.4.2 Розрахунок кількості основного технологічного обладнання....	43
3.4.3 Зведені дані по виробництву 7,2 млн. т/рік готової продукції ...	48
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

ВСТУП

Залізорудні окатиші — основний компонент сучасної доменної шихти та процесів прямого відновлення. У світі їхня частка в аглодоменному виробництві вже перевищує 75 %, а перехід на водневе DRI-відновлення передбачає використання виключно високоякісних окатишів із контрольованою основністю. Для України, яка має потужну сировинну базу Кривбасу та орієнтується на ринки ЄС, ключовим стає підвищення енергоефективності та екологічності випалу окатишів відповідно до вимог Європейського «Зеленого курсу». Більшість наявних випалювальних агрегатів (кругові та шахтні печі 1960-х рр.) працюють з питомими тепловими витратами 9-11 ГДж/т, що на 25-30 % перевищує світові бенчмарки, і генерують у середньому 210 кг CO₂/т продукції. Отже, модернізація або заміна випалювальних потужностей є критичною для зниження виробничих витрат, виконання екологічних норм та збереження конкурентоспроможності на глобальному ринку металу.

Мета роботи — вибрати й технічно обґрунтувати найбільш ефективний тип випалювального агрегату для термообробки залізорудних окатишів на фабриці в Україні продуктивністю 7,2 млн т/рік при основності 0,8 .

Об'єкт дослідження — технологічний процес випалу залізорудних окатишів.

Предмет дослідження — конструктивні та експлуатаційні параметри різних типів випалювальних агрегатів, що визначають енергоефективність, якість продукції та екологічні показники процесу .

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести критичний огляд сучасних технологій випалу та проаналізувати їхній стан у світовій і вітчизняній практиці.
- Дослідити конструктивні особливості й технологічні режими щонайменше трьох агрегатів — кругової печі, шахтної печі та випалювальної машини конвеєрного типу — із визначенням їх переваг і недоліків.
- Розробити єдину методику порівняння агрегатів за продуктивністю, питомими витратами енергоносіїв, сировини та екологічними показниками, обґрунтувати вибір оптимального варіанта для заданих умов експлуатації.
- Розрахувати матеріальний баланс шихти й основне технологічне обладнання фабрики, що забезпечить випуск 7,2 млн т окатишів на рік потрібної якості.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Актуальність та загальний огляд виробництва окатишів

Виробництво залізорудних окатишів є одним із ключових процесів у ланцюгу металургійного виробництва. Для сучасної доменної плавки, а також для процесів прямого відновлення заліза надзвичайно важливо мати сировину зі стабільними фізико-хімічними властивостями, зокрема необхідною міцністю, гранулометричним складом і хімічною чистотою. Залізорудні окатиші (окатиші) в цьому контексті залишаються стратегічним видом сировини, оскільки вони дозволяють:

- Підвищити ефективність роботи доменних та електрометалургійних печей.
- Скоротити витрату коксу або інших видів палива.
- Зменшити кількість дрібнодисперсних відходів і пилоподібного матеріалу під час транспортування й завантаження.
- Досягнути більш стабільних показників плавки й відновлення заліза.

У сучасних умовах, коли посилюються екологічні вимоги та зростає конкуренція на світовому ринку сталі, правильно організований процес випуску окатишів сприяє підвищенню конкурентоспроможності металургійної галузі в цілому. Вибір типу випалювального агрегату безпосередньо впливає на якість окатишів, витрати енергоносіїв та обсяги шкідливих викидів.

Актуальність теми полягає у необхідності забезпечення українських та світових металургійних підприємств якісною залізорудною сировиною (у даному випадку – окатишами) за одночасної мінімізації виробничих і екологічних ризиків. Грамотно підібраний агрегат для термообробки дає змогу оптимізувати температурний режим, знизити собівартість продукції та забезпечити високу продуктивність.

1.2 Коротка характеристика передбачуваного підприємства

Запланована фабрика спеціалізуватиметься на виробництві залізорудних окатишів із річною продуктивністю 7,2 млн тонн готової продукції. Параметр “основність 0,8” закладено як проєктний стандарт якості, що визначає співвідношення основних та кислотних компонентів ($\text{CaO} + \text{MgO}$ до $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$). Така основність є оптимальною для забезпечення кращих показників плавлення в доменних печах та належних механічних властивостей окатишів.

Місце розташування фабрики. Центральна або східна частина України з розвинутою інфраструктурою, близькістю до залізорудних родовищ і металургійних комбінатів. Наявність залізничних вузлів або інших ефективних логістичних шляхів транспортування, що зменшує витрати на доставку сировини та відвантаження готової продукції. Близькість до джерел енергоресурсів (природний газ, електроенергія) та води (для технологічних потреб і охолодження).

Основні параметри виробництва. Річна продуктивність у 7,2 млн тонн дає змогу забезпечити суттєві обсяги металургійної сировини як для внутрішнього ринку України, так і для експорту. Окатиші з основністю 0,8 краще витримують механічне навантаження під час транспортування та завантаження в доменні печі. Така основність також позитивно впливає на термо- та хімічну стійкість гранул. У подальшому можливе розширення асортименту (наприклад, окатиші з іншими рівнями основності чи спеціальними добавками), якщо цього потребуватимуть споживачі.

Сировинне забезпечення. Використовується залізорудний концентрат із вмістом Fe 63–67%. Дозоване введення флюсів (вапняку, доломіту) та в'язучих компонентів (бентоніту або альтернативних матеріалів). Завдяки близькості до Криворізького басейну (або іншого великого родовища) логістичні витрати на доставку концентрату будуть оптимізовані.

Перспективи розвитку. При збільшенні ринкового попиту фабрика може бути модернізована для досягнення ще більшої продуктивності (залежить від можливостей розширення виробничих площ та модернізації обладнання). Застосування сучасних методів автоматизації, систем моніторингу та контролю дасть змогу підвищувати ефективність виробництва й зменшувати негативний вплив на довкілля.

1.3 Основні тенденції розвитку ринку залізорудних окатишів

Світові обсяги виробництва стали демонструють тенденцію до зростання, особливо в країнах Азії та Близького Сходу. Як наслідок, підвищується і попит на залізорудну сировину високої якості. Окатиші з показниками міцності та основності, придатними для високошвидкісної доменної плавки, особливо затребувані у світовій металургійній промисловості.

Зміцнення позицій українських виробників. Українські гірничозбагачувальні комбінати (ГЗК), розташовані переважно в Криворізькому залізорудному басейні, вже тривалий час експортують частину своєї продукції.

За умови модернізації виробництва та впровадження енергоефективних технологій залізорудні окатиші з України можуть конкурувати на світових ринках, особливо в частині забезпечення якісних характеристик і порівняно низької собівартості.

Посилення екологічних вимог. Європейські та світові екологічні нормативи змушують підприємства впроваджувати маловідхідні та ресурсозберігаючі технології, знижувати викиди пилу, оксидів азоту й сірки. Виробники окатишів відповідають на ці виклики модернізацією випалювальних агрегатів, впровадженням систем рекуперації тепла та використанням більш чистих видів палива (природний газ, відновлювальні джерела енергії, а перспективно – водень).

Технологічні тренди: розробка та впровадження інформаційно-керуючих систем, що дозволяють у режимі реального часу регулювати витрату палива, температурні зони в агрегатах, швидкість подачі шихти.

Оптимізація складу шихти: використання більш ефективних флюсів і добавок, що забезпечують краще формування гранул і стабільний рівень основності.

Енергоефективність: застосування сучасних пальників, попереднього підігріву повітря й сировини, комбінованих систем сушіння та випалу.

Таким чином, підприємство з виробництва 7,2 млн тонн окатишів на рік в Україні має всі шанси стати конкурентоспроможним, якщо буде правильно обрано тип випалювального агрегату та впроваджено сучасні екологічно безпечні рішення.

1.4 Технологічний процес виробництва окатишів: загальний опис

Процес виробництва залізорудних окатишів передбачає такі ключові стадії:

Приготування шихти: Основним компонентом шихти слугує залізорудний концентрат із низьким вмістом води (5–10%) та певними гранулометричними параметрами.

Для надання окатишам необхідної основності (0,8) у шихту додають флюсуючі матеріали (вапняк, доломіт). Як в'язуче найчастіше використовують бентоніт, який покращує формування та початкову міцність сирих окатишів.

Гранулювання (формування сирих окатишів): Здійснюється в дискових або барабанних грануляторах, шихта зволожується і під дією обертання формується в гранули (окатиші). Розмір готових сирих окатишів зазвичай становить 8–16 мм, залежно від вимог металургійного процесу.

Термообробка: Передбачає поступовий нагрів і випал гранул до температури 1100–1300 °С з метою формування кристалічних фаз, які відповідають за міцність готових окатишів. Для нагріву й випалу можуть застосовуватися різні типи агрегатів (конвеєрні машини, обертові печі, шахтні печі тощо). Критично важливим є контроль температурних зон, швидкості проходження окатишів через кожну зону, а також можливість регулювання часу перебування гранул у пічному просторі.

Охолодження та зберігання: Випалені окатиші охолоджують у спеціальних охолоджувачах (наприклад, рольових чи шахтних). Частина теплоти може бути повернена у процес для підігріву повітря чи шихти. Остаточний охолоджений продукт перевіряють на відповідність вимогам щодо міцності, гранулометричного складу та хімічного складу. Потім окатиші транспортують на склад або відвантажують замовнику.



Рис. 1.1. Технологічна схема виробництва окатишів з термічним обробленням

Таким чином, термообробка є вирішальним етапом, адже саме під час випалу формується готова структура окатишів, яка впливатиме на їх поведінку в металургійній печі. З урахуванням основності 0,8 та великого планового обсягу продукції (7,2 млн тонн), вибір випалювального агрегату має визначальне значення для стабільності й ефективності всього процесу.

1.5 Значення основності 0,8 у формуванні властивостей окатишів

Основність ($R = (CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$) регулюється складом шихти та визначає поведінку окатишів у високотемпературному середовищі доменних печей.

Вплив на відновні властивості, оптимальна основність полегшує проникнення відновних газів (CO , H_2) в пористу структуру окатишів, що сприяє швидшому й повнішому відновленню заліза.

При значних відхиленнях від заданої основності можуть утворюватися фази, що знижують реакційну активність гранул або ускладнюють утворення якісного шлаку.

Основність 0,8 забезпечує баланс між кислотними та основними оксидами у структурі випалених гранул. Це сприяє формуванню достатньо щільної, але водночас не “перепеченої” структури. Залишкова пористість при такому співвідношенні, як правило, перебуває на рівні, достатньому для нормального газообміну всередині окатишу, не знижуючи міцність до руйнівних значень.

Залежність від типу випалювального агрегату. Температура та тривалість випалу мають бути ретельно налаштовані під склад шихти, аби уникнути неякісного пропікання або, навпаки, спікання понад норму. Різні агрегати (шахтна піч, конвеєрна машина, обертова піч) забезпечують різний рівень контролю температурного профілю. Вибір того чи іншого типу печі залежить від бажаної продуктивності, наявного палива й особливостей організації виробничих потоків.

Таким чином, параметр основності 0,8 – це не просто показник хімічного складу, а фактор, який визначає технологічні режими виробництва й вимоги до обладнання.

1.6 Перспективи інтеграції виробництва окатишів у металургійний цикл України

Забезпечення внутрішнього ринку: значна частина металургійних комбінатів України, розміщених переважно в Дніпропетровській та Запорізькій областях, зацікавлена у стабільних поставках окатишів. Якщо підвищити якість цієї сировини, це прямо вплине на собівартість виплавленого чавуну та сталі.

Експортний потенціал: за належного рівня підготовки сировини (з високою концентрацією Fe, низьким вмістом шкідливих домішок і керованою основністю) українські окатиші можуть успішно конкурувати на зовнішніх ринках. Показник 7,2 млн тонн на рік достатньо серйозний, щоби виходити не лише на локальний, а й на міжнародний ринок.

Екологічні аспекти: сучасне виробництво окатишів має будуватися з урахуванням вимог щодо зниження викидів, утилізації пилу та вторинного тепла. Впровадження ефективних систем очищення газів, передова автоматизація процесу та ощадливе використання води – серед пріоритетних напрямів розвитку.

Таким чином, запуск нової фабрики або модернізація існуючих потужностей із випуску окатишів в Україні має вагому економічну й екологічну доцільність, особливо за умови застосування новітніх технологій випалу.

1.7 Висновки до розділу “Загальна частина”

У межах “Загальної частини” висвітлено основні аспекти, пов’язані з виробництвом залізорудних окатишів, а також коротко охарактеризовано умови роботи підприємства з річною продуктивністю 7,2 млн тонн. Ключові підсумки такі:

Актуальність теми: виробництво окатишів основністю 0,8 є перспективним напрямом розвитку металургійної галузі, оскільки задовольняє зростаючі вимоги споживачів до якості та екологічних показників.

Річна продуктивність 7,2 млн тонн свідчить про масштабність проєкту, що потребує ретельного вибору випалювального обладнання з високою продуктивністю та надійною системою управління тепловими процесами.

Сировинна база України (передусім Криворізький басейн) і наявні транспортні мережі створюють умови для економічно ефективного розміщення фабрики.

Особливості технологічного процесу: при основності 0,8 важливою стає стабільність температурного режиму та рівномірність розподілу тепла в агрегаті, що забезпечить необхідну міцність і якісні характеристики окатишів.

Різноманітність типів випалювальних агрегатів відкриває можливості для оптимального вибору залежно від планованої продуктивності, особливостей шихти та вимог щодо енергоефективності й екології.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Мета і завдання спецчастини

У цьому розділі виконується детальний техніко-технологічний аналіз випалювальних агрегатів з урахуванням вимог до продуктивності та заданої основності. Основні завдання:

Проаналізувати конструктивні особливості принаймні трьох різних типів випалювальних агрегатів, що застосовуються у промисловому виробництві окатишів.

Визначити ключові технічні та експлуатаційні характеристики, які впливають на вибір агрегату: продуктивність, ефективність теплообміну, споживання палива, складність конструкції, надійність та екологічна безпечність.

Обґрунтувати вибір оптимального випалювального агрегату для виробництва окатишів з основністю 0,8 у заданих умовах розташування фабрики (Україна).

2.2 Вихідні дані та технічні вимоги до випалювального агрегату

Річна продуктивність – 7,2 млн тонн окатишів.

Основність окатишів – 0,8, що вимагає точного дотримання температурних режимів та рівномірного випалу для забезпечення необхідної міцності й пористості гранул.

Хімічний склад шихти (орієнтовно):

- Залізорудний концентрат: 63–67% Fe, з вологістю близько 8–10%.
- Флюси (вапняк/доломіт) – для коригування показника основності;
- В'язучі (найчастіше бентоніт).

Умови експлуатації:

- Наявність природного газу (або іншого палива) та електроенергії;
- Передбачувана близькість до металургійних комбінатів (скорочує витрати на логістику);
- Посилені екологічні вимоги (зменшення шкідливих викидів, очищення відхідних газів, утилізація пилу).

2.3 Огляд і конструктивні особливості основних типів випалювальних агрегатів

Сучасна промислова практика виробництва залізорудних окатишів базується передусім на трьох технологічних схемах випалу, що відрізняються конструкцією, рівнем енергоефективності та граничною продуктивністю. Вибір агрегату визначається цілями проекту, особливостями майданчика та екологічними вимогами:

Конвеєрна (стрічкова) випалювальна машина, Traveling Grate. Забезпечує найвищу продуктивність (5–15 млн т/рік і більше) завдяки великій

площі колосникової решітки, має зональне регулювання температури та розвинену систему рекуперації тепла. Серед недоліків — значні капітальні витрати та складність сервісного обслуговування.

Обертові печі, Rotary Kiln. Порівняно прості у виготовленні, допускають використання різних видів палива й добре освоєні на підприємствах середнього масштабу. При продуктивності понад 4–5 млн т/рік різко зростають габарити, а неоднорідність температурного поля ускладнює забезпечення рівномірної міцності окатишів.

Шахтні печі, Shaft Furnace. Відзначаються компактністю й високою ефективністю протиточного теплообміну, що позитивно впливає на питомі витрати палива. Водночас вертикальна схема чутлива до гранулометрії та вологості шихти; для виробничих обсягів понад 4 млн т/рік потрібні кілька паралельних шахт.

Детальний опис конструкції, принципів роботи, переваг і недоліків кожного агрегату наведено в підрозділах 2.3.1 – 2.3.3 нижче.

2.3.1 Конвеєрна (стрічкова) випалювальна машина

Випалювальна конвеєрна машина (англ. Traveling Grate) призначена для сушіння, підігріву, зміцнювального окисного випалу й охолодження залізорудних окатишів. Процес теплової обробки окатишів на конвеєрній машині полягає в поступовому їхньому нагріванні до температури 1300 °С і подальшому охолодженні (рис. 2.1). Для цього сирі окатиші, укладені на колосникові решітки візків 1, за допомогою укладальника і роликового живильника 2 послідовно проходять зони сушіння 4, підігріву 5, високотемпературного випалу 6 і рекуперації 7, охолодження 8 і 9. Сумарний час перебування окатишів на стрічці машини становить 20 - 30 хв. На стрічку спочатку укладається донна і бортова постелі. Випал окатишів здійснюється продуктами згоряння газу, що спалюється за допомогою пальників, встановлюваних в укриттях - камерах зон підігріву та випалу.

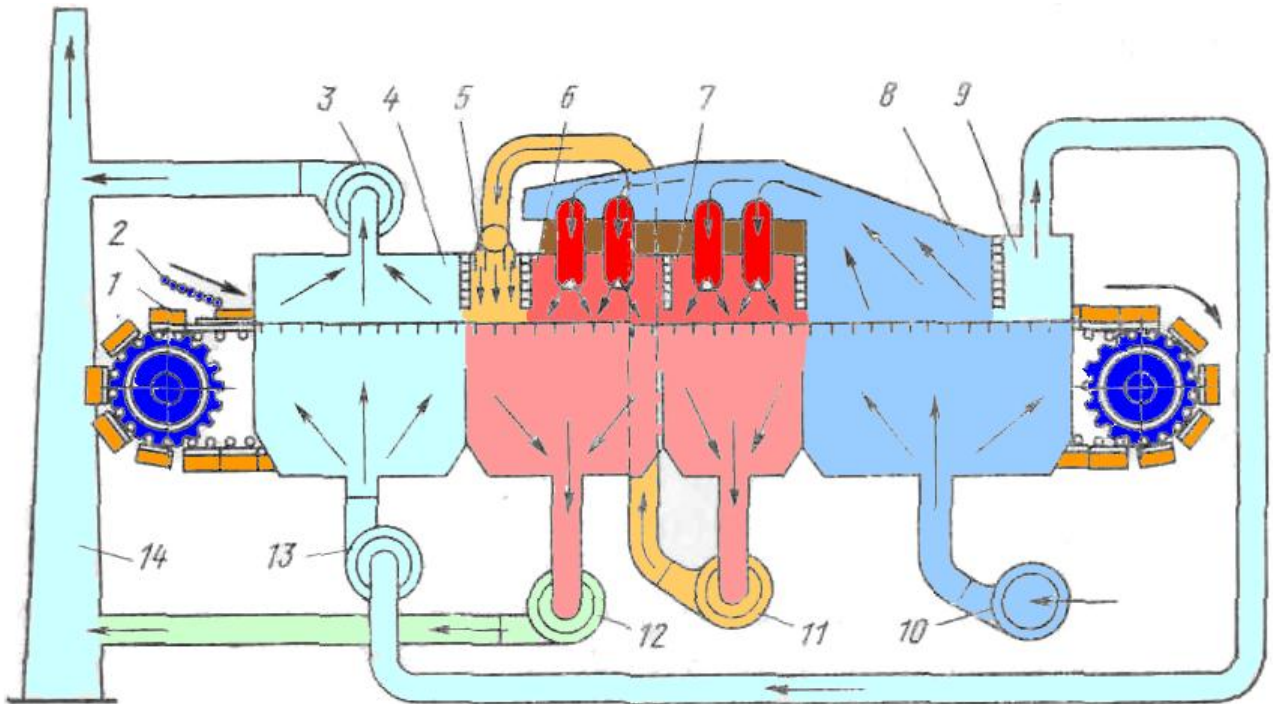


Рис. 2.1 - Схема конвеєрної машини для випалювання окатишів (стрілками показані газо-повітряні потоки)

Типові конструктивні вузли. Рама (каркас) та опори. Сталева конструкція, яка утримує всі компоненти машини: секції сушіння, нагріву, випалу, охолодження, а також механізми приводу та транспортування.

Колосникові плити (решітки). Виготовляються зі спеціальних високолегованих жаростійких сталей або сплавів, які витримують високі температури та тертя від руху окатишів. Кожна плита має перфорацію, крізь яку проходять нагрівальні та охолоджувальні гази.

Приводні та натяжні станції. Механізми, що забезпечують обертання або рух стрічки з необхідною швидкістю та натягом.

Короби (камери) подачі газів. Під стрічкою встановлені камери, крізь які за допомогою вентиляторів подається гаряче повітря чи газові суміші в різних зонах (зазвичай розмежовують зони: сушіння, підігрів, випал, донагрівання, охолодження).

Система пальників. Залежно від типу палива (природний газ, мазут, коксівний газ тощо) може бути встановлено кілька пальникових пристроїв, що генерують гарячі гази для підвищення температури в зоні випалу.

Транспортери завантаження та вивантаження. На початку стрічки сирі окатиші рівномірно розподіляються по ширині колосникової решітки формувальним пристроєм (наприклад, роликовим грохотом або вібраційним живильником), а у кінці машини готові окатиші розвантажуються на конвеєр для подальшого охолодження або безпосередньо в охолоджувальну секцію.

Принцип роботи та зона поділу

Принцип роботи конвеєрної машини полягає у послідовному проходженні шару окатишів крізь декілька функціональних зон, розміщених на спільній рамі уздовж руху стрічки:

Зона (камери) сушіння: температура становить орієнтовно 150–300 °С;

Завдання: випарувати надлишкову вологу із сирих окатишів, запобігши їх передчасному розтріскуванню при подальшому швидкому нагріванні. Повітря може подаватися як із зовнішнього джерела, так і частково за рахунок рециркуляції гарячих газів із зони охолодження.

Зона підігріву (попередній нагрів): Температура підіймається до 600–900 °С. У цій зоні окатиші втрачають “холодні ядра” та отримують поступове підвищення температури з середніх значень до рівня, близького до випалу, що готує їх до основної високотемпературної фази.

Зона (секція) випалу: основна зона, де температура сягає 1100–1300 °С (іноді до 1350 °С), залежно від заданих показників готових окатишів (міцності, пористості, хімічних властивостей). Тривалість перебування окатишів у цій зоні варіюється (5–15 хвилин у середньому), достатньо для формування необхідних кристалічних фаз, що забезпечують потрібну механічну міцність і відновлюваність у доменній печі. Гарячі гази часто надходять із кількох пальників, розташованих уздовж або зверху зони випалу, а також через колосникові плити знизу (залежить від конструкції конкретної машини).

Зона донагрівання (при потребі): у деяких конструкціях перед охолодженням передбачена коротка зона додаткового нагрівання, якщо є потреба підтримати стабільність температури на виході або завершити формування окремих мінеральних фаз (наприклад, магнезійного клинкеру в окатишах з певними добавками).

Зона (секції) охолодження: після завершення випалу окатиші потрапляють у зону охолодження, де температура знижується до 200–400 °С. Охолоджуюче повітря, що продувається через шар, нагрівається, і потім у деяких моделях машини перенаправляється (рекуперація) у зони сушіння або попереднього нагріву, що підвищує загальну енергоефективність процесу. Вивантаження готових окатишів може відбуватися безпосередньо після охолодження або через перехід на окремий охолоджувач (наприклад, барабанний чи стрічковий).

Особливості процесу та технологічні параметри

Товщина шару сирих окатишів. На конвеєрну машину завантажують шар окатишів висотою від 200 до 400 мм (іноді більше), залежно від конструкції. Досить високий шар забезпечує більшу продуктивність, але вимагає інтенсивного продування газів та рівномірного розподілу окатишів. Нерівномірність шару може спричинити різницю в часі випалу окремих окатишів (ближчі до поверхні шарів можуть “перепалитися”, а в глибині – залишитися “недопаленими”).

Швидкість руху стрічки. Плавню регулюється від декількох сантиметрів до десятків сантиметрів за хвилину. Визначається необхідним часом перебування окатишів у кожній зоні, щоб забезпечити повний прогрів. Якщо потрібно підняти продуктивність, збільшують швидкість стрічки, але тоді довжина відповідних зон має бути більшою або температура й інтенсивність продування – вищими.

Температурно-газові режими. У кожній зоні підтримується свій заданий температурний діапазон, регульований або пальниками, або обігом відхідних газів. Сучасні машини оснащуються системами автоматичного контролю та регулювання температури, тиску та складу відхідних газів (O_2 , CO , CO_2 , NO_x).

Рекуперація тепла. Конвеєрні машини характеризуються високим потенціалом повторного використання тепла: відхідне повітря після зон охолодження може спрямовуватися в зону сушіння чи підігріву, що помітно зменшує загальну витрату палива. Додатково встановлюються теплообмінники для передачі тепла гарячого газового потоку холодному дуттю.

Переваги: Можливість досягнення великої продуктивності Конвеєрна (стрічкова) машина забезпечує одні з найвищих показників за обсягом виготовлених окатишів на рік – від 5 млн тонн і більше, залежно від довжини та ширини робочої стрічки, а також швидкості її руху. Така масштабованість робить Конвеєрну випалювальну машину оптимальним рішенням для великих металургійних компаній або ГЗК, що прагнуть забезпечити внутрішні потреби й сформувати експортні поставки.

При потребі у 7,2 млн тонн окатишів на рік можливе застосування однієї лінії (з великими габаритами) або двох паралельних стрічкових машин дещо меншої довжини.

Завдяки високій продуктивності можна більш повно завантажувати виробничі потужності та зменшувати питому собівартість продукції.

Рівномірний випал і висока якість продукції

Одне з ключових завдань у виробництві окатишів – забезпечити повноцінний та однорідний прогрів сирого матеріалу до температури випалу ($1100\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$), аби сформувати задану міцність, пористість та оптимальну мінералогічну структуру. Конвеєрна машина, завдяки зональному поділу (сушіння, передній підігрів, основний випал, донагрів і охолодження), дає змогу:

Точно керувати температурою в кожній зоні, використовуючи відповідні пальники, вентилятори, регулювання швидкості повітряних потоків.

Формувати стабільний шар окатишів однакової висоти, що мінімізує ризик недопалу або перепалу всередині шару.

У результаті отримувати окатиші з мінімальною розбіжністю за міцністю та гранулометричним складом, що особливо важливо для доменної плавки.

Розвинена система рекуперації тепла: Конвеєрні машини обладнуються системами, які повертають частину теплової енергії з відхідних газів (особливо із зони охолодження) назад у зони сушіння та попереднього нагріву. Це дозволяє: суттєво знизити питомі витрати палива, бо охолоджене повітря (чи газ) потрапляють у наступні зони вже гарячими.

Підвищити загальний ККД процесу, оскільки велика кількість тепла не “викидається” в атмосферу, а використовується повторно.

Зменшити шкідливі викиди (CO_2 , NO_x) завдяки ефективнішому горінню й нижчому споживанню палива.

Високий ступінь автоматизації та можливість точного контролю процесу. Сучасні конвеєрні випалювальні машини комплектуються багатозональними системами керування (АСУ ТП), що:

- Моніторять температуру, тиск газу, швидкість повітряного потоку, рівномірність завантаження шару окатишів.
- Дозволяють оперативно коригувати швидкість руху стрічки, потужність пальників, інтенсивність вентиляції в кожній зоні.
- Дає змогу стабільно утримувати задані параметри (температуру, час перебування в зоні), що прямо впливає на якість готових окатишів і знижує відсоток браку.

Гнучкість у виборі конфігурації та подальше масштабування

- Конвеєрна машина може бути спроектована “під ключ” для заданої продуктивності, при цьому можливо збільшити довжину секцій або встановити додаткові зони, якщо в майбутньому потрібно підняти обсяги випуску.
- У разі, коли необхідно швидко наростити виробництво, можна організувати паралельну лінію.

Зручність інтеграції з іншими стадіями. Конвеєрна (стрічкова) випалювальна машина чудово “стикується” з обладнанням для грануляції сирих окатишів, системами сортування та охолодження. Завантаження шару робиться через розподільчу горловину (або вібраційний живильник), а розвантаження – на кінці лінії, де продукція вже частково охолоджена й готова до транспортування на склад чи в доменний цех.

Недоліки: Значні капітальні витрати й габарити обладнання. Будівництво конвеєрної машини потребує чималих первинних інвестицій. Сюди належать витрати на потужний металевий каркас, секції, колосникові решітки, пальникові та газорозподільні системи.

Габарити такої машини можуть сягати 100–150 м у довжину, з шириною робочої решітки 4–6 м. Це зумовлює потребу в просторах виробничих приміщеннях (цехах), часто з необхідністю додаткових фундаментів чи навіть нових будівель.

Технічна складність і багатокомпонентність. Механізми переміщення стрічки, роликові станції, системи ущільнення й подачі повітря в різні зони утворюють складний технічний комплекс. Кожен із компонентів має підтримуватися у справному стані для стабільної роботи:

- Ролики та ланцюги зношуються від постійного тертя, потребують періодичних перевірок і заміни.
- Колосникові плити піддаються впливу високої температури й абразивного контакту з окатишами, тому з часом можуть деформуватися чи руйнуватися.

Сукупність цих факторів збільшує обсяг планово-попереджувальних ремонтів і складність експлуатації.

Високі вимоги до рівномірності завантаження шару. Щоб забезпечити одночасно великий обсяг виробництва та якість випалу, шар окатишів має бути:

- Однакової товщини по всій ширині стрічки;
- Формований окатишами приблизно однакового діаметра й міцності.

Будь-які нерівності можуть спричиняти різницю в часі прогріву: верхні шари можуть “перегрітися”, а нижні – “недопектися”. Це знижує вихід кондиційних (якісних) окатишів.

Підвищені витрати енергії на транспортування повітря/газів. Для того, щоби протиснути необхідну кількість гарячого повітря й відхідних газів через товстий шар окатишів і колосникові решітки, застосовуються потужні вентилятори високого тиску, що споживають значну кількість електроенергії.

При великій ширині стрічки й товстому шарі швидкості потоку можуть бути достатньо високими, що додатково збільшує навантаження на систему аспірації.

Складна система очисних споруд для відхідних газів. Хоча Конвеєрна (стрічкова) випалювальна машина дозволяє ефективно здійснювати рекуперацію, сама система відведення газів із кількох зон (випалу, охолодження, сушіння) часто дуже розгалужена. Це вимагає:

- Встановлення зональних фільтрів (рукавні або електрофільтри), адже кожна зона може генерувати різний склад газів і пилу.
- Ретельно спроектованих трубопроводів і клапанів, аби уникнути надмірних втрат тиску й зменшити ризик утворення пилових пробок.

Якщо в зоні випалу застосовується газ вищої температури з високим вмістом окисів азоту (NO_x), потрібні додаткові заходи (SCR–каталізатори тощо) для доведення викидів до екологічних норм.

Тривалий період окупності. Через великі початкові інвестиції та складність конструкції стрічкові машини зазвичай мають більший строк окупності, ніж менш продуктивні, але дешевші рішення (обертова піч, шахтна піч).

Однак за умови сталого попиту на окатиші й реалізації великих обсягів продукції рентабельність у довгостроковій перспективі зазвичай вища порівняно з альтернативами.

Аспекти застосування для виробництва окатишів основністю 0,8:

Температурний профіль. Окатиші з основністю 0,8 потребують чітко контрольованого температурного графіка, оскільки надто швидкий набір температури може призвести до появи тріщин і зниження міцності, а недостатня температура – до неповного спікання зерен.

Конвеєрна машина надає змогу налаштувати окремі зони (наприклад, зональний прогрів, поступовий підігрів, основний випал, донагрів, повільне охолодження), що забезпечує якісний кінцевий продукт.

Оптимальна висота шару, щоб мати достатню продуктивність, але водночас уникнути проблем із нерівномірним випалом усередині шару, зазвичай обирають 0,3–0,4 м. Цього вистачає для проходження належної кількості

нагрівального газу й забезпечення порівняно рівномірної температури всередині шару.

Рекуперація тепла, окатиші, що виходять із зони випалу, містять велику кількість накопиченої теплової енергії. Використання зони охолодження зі спрямованим потоком повітря дозволяє ефективно рекуперувати цю теплоту та спрямовувати її у передні зони (сушіння, попередній нагрів).

Автоматизація, задля підтримки постійної якості продукції, сучасні Конвеєрні випалювальні машини оснащують системами АСУ ТП (автоматизовані системи управління технологічними процесами), що дає змогу оперативно змінювати режими залежно від коливань у складі шихти або змінних умов експлуатації.

Приклади промислового використання: Провідні світові виробники (наприклад, Metso Outotec, FLSmidth) пропонують кілька моделей конвеєрних машин різної ширини й довжини, продуктивність яких може сягати 15–20 млн тонн окатишів на рік при встановленні однієї або двох ліній.

В Україні, за даними відкритих джерел, на окремих ГЗК (наприклад, Полтавському, Північному, Центральному) використовують аналогічні агрегати для випалу офлюсованих і неофлюсованих окатишів. Результатом є велика та стабільна партія продукції високої якості, що користується попитом як на внутрішньому, так і на зовнішніх ринках.

Висновки щодо застосування конвеєрної випалювальної машини

Конвеєрна (стрічкова) машина є найбільш підходящим вибором при великих проєктних обсягах, зокрема 7,2 млн тонн окатишів на рік, оскільки вона забезпечує високу продуктивність та якісний випал.

Завдяки зональному регулюванню температури та ефективній рекуперації тепла, Конвеєрна випалювальна машина дає змогу знизити питомі витрати палива, дотриматися екологічних норм і досягти стабільної мікроструктури окатишів, необхідної для подальшого використання в металургійних процесах.

Основними викликами є високі капітальні витрати на проєктування й будівництво, а також складність обслуговування, проте вони компенсуються економією енергоресурсів і масштабом випуску кінцевої продукції, особливо при довгостроковому функціонуванні підприємства.

2.3.2 Обертова піч

Загальний опис конструкції: Обертова піч (англ. Rotary Kiln) є барабанним агрегатом циліндричної форми, розташованим із невеликим кутом нахилу (зазвичай 2–5°) до горизонтальної площини. Корпус барабана виготовляється зі сталевих листів великої товщини (20–40 мм) і має значну довжину, яка може сягати 50–150 м залежно від проєктної продуктивності та технологічних вимог. Діаметр печі варіюється в межах 4–6 м (на великих підприємствах – і більше). (рис 2.2)

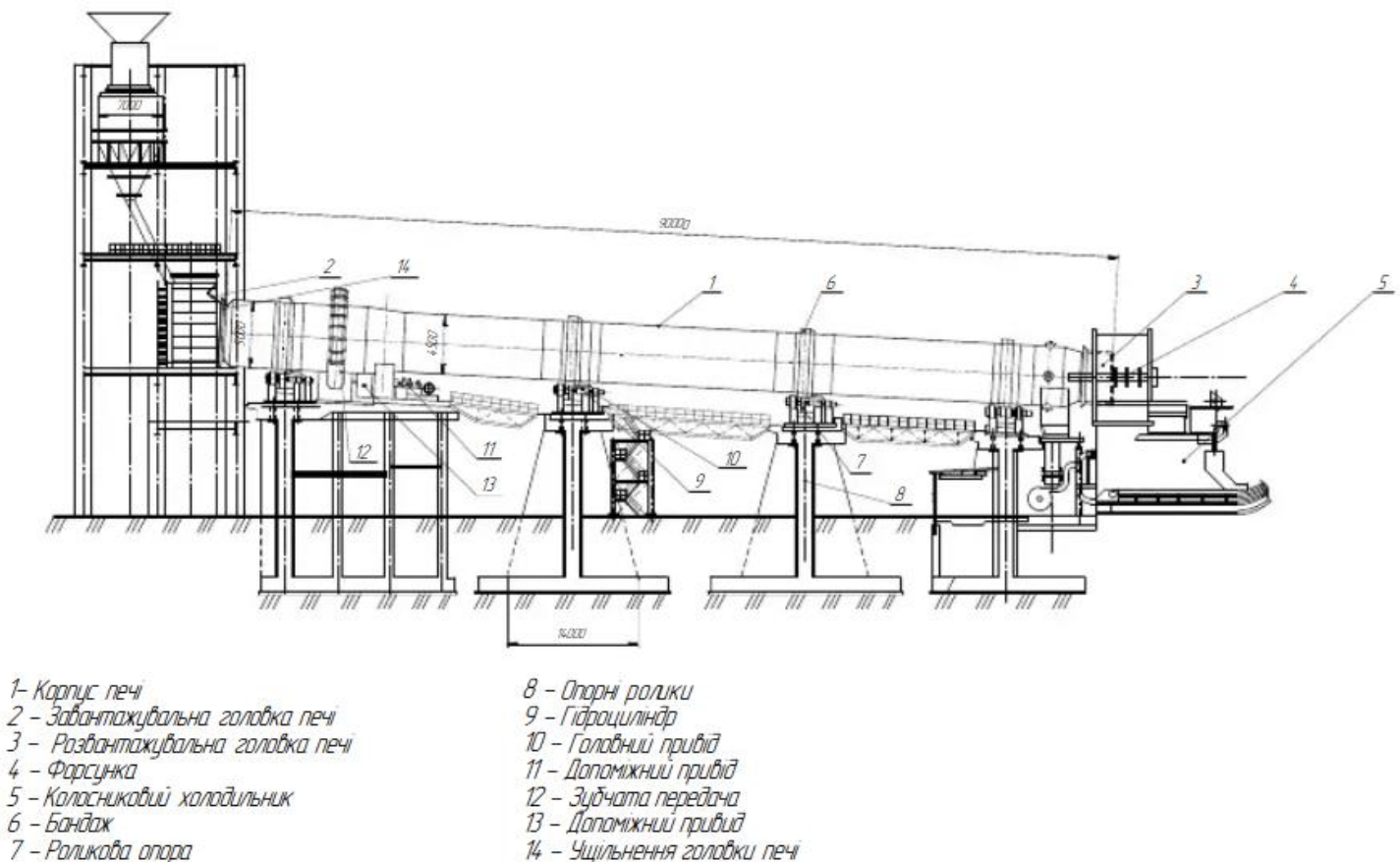


Рис. 2.2 — Загальний вигляд обертової печі

Основні елементи конструкції: циліндричний корпус, товстостінний сталевий барабан, укріплений ззовні кільцевими ребрами жорсткості (бандажами), що запобігають деформаціям під час нагрівання та обертання. Всередині корпус викладений вогнетривкою цеглою (шамотною чи магнезійною, залежно від температури та складу агресивних газів). Опорні ролики та опорні станції. Барабан підтримується на декількох (зазвичай 2–4) опорних станціях із масивними роликами. У місцях контакту барабана з роликами приварені бандажі, що зменшують зношування сталі. Привід (редуктор, електродвигун). Обертотий рух забезпечує електродвигун (часто з частотним перетворювачем), що передає обертотий момент через редуктор і зубчастий вінець, закріплений по колу барабана. Швидкість обертання становить від 0,5 до 2 об/хв (іноді дещо більше або менше залежно від потреб технології). Вогнетривке футерування: усередині печі викладається 2–3 шари вогнетривких матеріалів різних типів: теплоізоляційний (ближче до металевого корпусу) та високотемпературний (робочий шар). Футерування захищає сталевий барабан від прямих впливів високої температури та хімічно активних газів, зменшує тепловтрати й забезпечує потрібну теплоакумуючу здатність.

Системи паливників: У передній (або “гарячій”) частині печі (зазвичай нижній кінець барабана) монтують один чи кілька паливників, які працюють на природному газі, мазуті або коксовому газі. Паливо згорає, нагріваючи

внутрішній простір барабана до температури випалу (1100–1300 °С для окатишів).

Герметизація та аспірація: у місцях завантаження та вивантаження передбачені спеціальні ущільнювальні пристрої (ущільнювальні кільця, пилогазові шторки тощо), щоб мінімізувати підсмоктування холодного повітря або витік гарячих газів. Система відсмоктування та очищення газів (електрофільтри, рукавні фільтри) звичайно встановлюється на виході з печі.

Принцип роботи: Завантаження матеріалу, сирі окатиші подаються у верхню (більш підняту) частину печі через лоток або живильник, іноді зі спеціальною камерою передсушування. Матеріал обертається разом із барабаном і поступово пересувається до нижнього (вихідного) кінця печі під дією гравітації та невеликого нахилу.

Процес нагріву і випалу, у міру руху всередині печі окатиші піддаються впливу гарячих газів, що утворюються в зоні горіння палива. Температура поступово підвищується від 300–600 °С на вході до 1100–1300 °С у центральній та нижній частині, забезпечуючи поступовий випал.

За рахунок обертання гранули рівномірно перевертаються, взаємодіють одна з одною, руйнуються меншою мірою, ніж у шарових процесах з великими перепадами температури (але можлива певна кількість дрібниць через абразивне тертя).

Охолодження (на виході), випалені окатиші вивантажуються з нижньої частини барабана. У багатьох схемах передбачено окремий холодильник (наприклад, обертовий або стрічковий) для зниження температури продукції до 100–200 °С.

Відхідні гази разом із пилом та іншими продуктами згоряння потрапляють у систему очищення (скруббер, електрофільтр тощо), після чого викидаються у димову трубу або використовуються частково для сушіння чи попереднього нагріву сировини.

Режим обертання та кут нахилу, від швидкості обертання і кута нахилу печі залежить, скільки часу окатиші перебувають у зоні високих температур. Підвищена швидкість зменшує тривалість перебування, проте збільшує інтенсивність перекочування окатишів, що може бути небажаним для їхньої цілісності.

Переваги: Відносна простота конструкції та універсальність. Обертова піч добре відома у промисловості (широко використовується для випалу цементу, вапна, різних руд). Це означає, що технічно відпрацьовані рішення та досвід експлуатації накопичені в багатьох країнах.

Можливе використання різноманітного палива: природний газ, мазут, коксовий газ, вугільний пил. Залежно від наявності того чи іншого ресурсу, піч можна адаптувати до конкретних умов.

Гнучкість в налаштуванні процесу. За рахунок зміни швидкості обертання барабана, кута нахилу й температурного режиму в зоні пальника можна

підлаштувати час контакту окатишів із високою температурою та інтенсивність теплопередачі.

Легше “підняти” чи “опустити” температуру у великій зоні порівняно з багатосекційними машинами, де потрібні окремі зони/камери та складні системи клапанів.

Можливість інтеграції в комбіновані схеми. Обертові печі часто використовують разом з іншими агрегатами: наприклад, перед піччю розміщують сушильний барабан, після печі – охолоджувач і систему сортування. Можна організувати процес так, щоб частина тепла від відхідних газів використовувалася у сушильних або грануляційних блоках.

Менше механічних компонентів у робочій зоні. Порівняно з конвеєрною машиною, де є рухомі колосникові плити, привідні системи стрічки тощо, у обертовій печі всередині неї немає складних транспортерів. Основна рухома частина – це сам барабан, обертання якого забезпечують зовнішні ролики та привод.

Недоліки: Обмежена продуктивність при великих масштабах. Щоб досягти річних обсягів на рівні 7–8 млн тонн і більше в межах однієї печі, потрібно збільшувати її довжину та діаметр до надзвичайних розмірів. Це веде до суттєвого зростання вартості та ускладнює процес рівномірного випалу. Великі печі мають складніший температурний контроль, а також вищі механічні навантаження на бандажі та опорні станції.

Вища енергоемність і тепловтрати. У порівнянні з конвеєрною машиною, де можна організувати багатоступеневу рекуперацію тепла, у обертовій печі тепловіддача менш керована. Значна частина гарячих газів проходить по всій довжині барабана й виходить з нього при високій температурі, а «дозавантажити» їх у сушильну зону (як у конвеєрній машині) складніше. Стільникові або інші види теплообмінників не так просто інтегрувати в циліндр, що обертається. Як наслідок, питомі витрати палива часто вищі.

Схильність до утворення “налипань” і злежувань. За певних умов (забагато дрібнодисперсного пилю, надмірна вологість, коливання температури) на стінках печі можуть утворюватися налипання, що зменшують ефективний переріз та можуть спричинити перебої в роботі.

Футерування печі піддається додатковому абразивному впливу від гранул, що перекочуються, а також хімічному впливу газів і шлакових компонентів.

Менш рівномірний випал (за великих діаметрів). Усередині печі відбувається хаотичне перемішування окатишів; можливе нерівномірне прогрівання матеріалу залежно від його розташування у перетині барабана.

Підвищення швидкості обертання чи кута нахилу прискорює транспортування окатишів, водночас скорочуючи час їх перебування у високотемпературній зоні.

Застосування для наших умов. Альтернативний чи додатковий варіант до конвеєрних машин.

Для фабрики з проектною потужністю 7,2 млн тонн/рік обертові печі можуть розглядатися в двох варіантах: декілька паралельних печей невеликого чи середнього розміру (кожна на 1–2 млн тонн/рік); єдина велика піч (проте це означає суттєві інвестиції й складну експлуатацію).

Можливість переробки різних видів шихти. Обертові печі добре підходять для різних типів сировини, включно із залізорудними окатишами, але найліпше вони проявляють себе у виробництві 1–3 млн тонн/рік в одній печі. При більших обсягах зазвичай зростають експлуатаційні ризики й вартість.

За умови, що фабрика може працювати з частинами партій (наприклад, випалювати спеціальні окатиші із специфічними добавками), технологічна гнучкість обертової печі стає в пригоді.

Технічна інтеграція та масштаб. Виробничий майданчик повинен мати достатню довжину для розміщення печі та допоміжних систем (пальникове господарство, холодильники, склад палива, система очищення газів). За екологічними нормами може знадобитися додаткова фільтрація пилу, адже пилоподібні матеріали можуть виноситися потоком газів із печі.

Загальноекономічний аспект. Якщо порівнювати сукупну вартість будівництва й експлуатації, то для дуже великих обсягів (близько 7 млн тонн/рік) обертова піч часто виявляється менш рентабельною, ніж конвеєрна машина.

Однак, у випадку вже наявних обертових печей (якщо підприємство модернізується чи перепрофілюється) або обмежень на розміри цеху по ширині, може бути виправдано використати цей тип агрегату.

2.3.3 Шахтна піч

Загальний опис конструкції. Шахтна піч (Shaft Furnace) – це вертикальний агрегат циліндричної чи багатокутної форми, всередині якого відбувається випал (термообробка) залізорудних окатишів у постійному потоці, що рухається згори вниз. (рис 2.3)

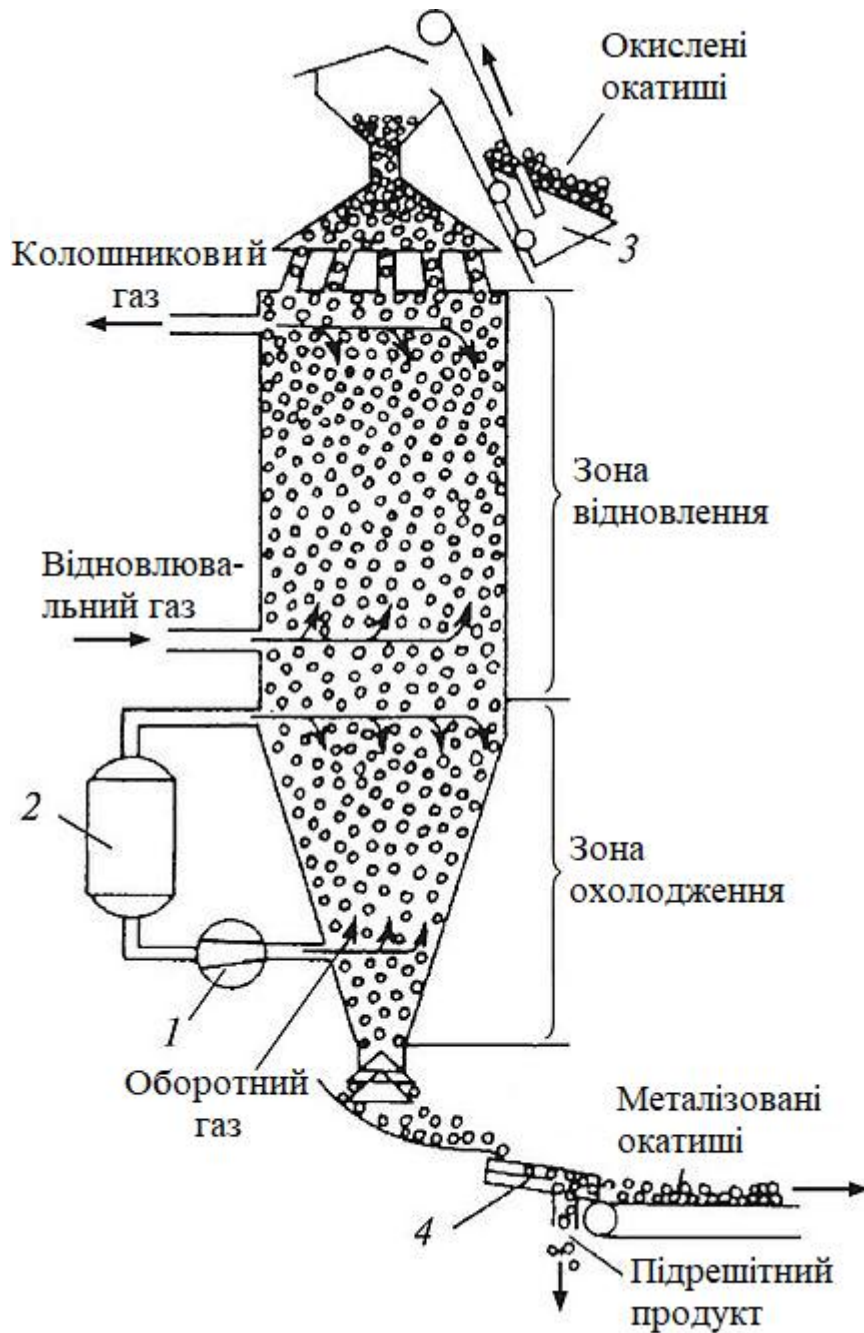


Рис 2.3 - Схема шахтної печі : 1 - компресор; 2 - скруббер; 3 - скіп; 4 — грохот.

Конструкція шахтної печі, зазвичай, передбачає:

Корпус із вогнетривкою футеровкою. Зовнішня сталева оболонка, здатна витримувати значні механічні навантаження й коливання температур. Внутрішня футеровка (вогнетривка цегла або теплоізоляційні блоки) для захисту сталі від високих температур (до 1100–1300 °C) і агресивного газового середовища.

Завантажувальний вузол у верхній частині Влаштований так, щоб рівномірно розподіляти сирі окатиші по всьому поперечному перерізу шахти. Часто використовується живильник із регульованою продуктивністю, що

забезпечує сталий потік матеріалу та запобігає можливому “злежуванню” чи утворенню “пробок”.

Зона підведення гарячих газів. Розташовується в середній або нижній частині печі (залежно від конкретної конструкції). Може мати отвори, форсунки або сопла для подачі підігрітого повітря (газу), який рухається назустріч потоку окатишів (протиток).

Зона вивантаження готових окатишів. У нижній частині передбачений механізм (наприклад, “сошник” чи обертовий диск), що забезпечує регульоване вивантаження випалених гранул. Часто облаштовується кілька клапанів чи шиберів, аби підтримувати певний рівень шару всередині печі та контроль тиску.

Система аспірації і газоочищення. З верхньої частини шахти газу (пилогазова суміш) відводять у систему фільтрації (циклони, рукавні або електрофільтри), щоб видалити пил і знизити викиди забруднювальних речовин в атмосферу.

Іноді відхідні газу можуть бути частково рециркульовані та скеровані у нижні зони або використані для підігріву сировини.

Загалом шахтна піч є компактною конструкцією, де відсутні довгі горизонтальні зони (як у конвеєрних машинах), тож площа, яку вона займає, набагато менша. Проте її висота може бути досить значною (10–30 м і більше), залежно від проектною продуктивності й бажаного часу перебування окатишів у високотемпературному середовищі.

Принцип роботи: Завантаження сирих окатишів. Матеріал (сформовані гранули) подають у верхню частину шахти безперервним потоком. Важливо, щоб гранули мали достатню початкову міцність і були приблизно однаковими за розміром для рівномірного руху й термообробки.

Вертикальне переміщення окатишів. Під дією сили тяжіння гранули поволі опускаються вниз крізь послідовні зони шахти – сушіння, нагріву, випалу, часткового охолодження (якщо така передбачена). Швидкість руху контролюється вивантажувальними механізмами знизу: що повільніше вони вивантажують, то довше гранули перебувають у гарячих зонах.

Протиточний рух газів. Гарячі газу (з високою температурою 1000–1300 °C) або нагріте повітря подають у нижню частину шахти, і вони підіймаються вгору, поступово віддаючи тепло зустрічному потоку окатишів. У верхній частині шахти температура газу помітно нижча (через передачу тепла), і там переважно відбувається сушка й попередній підігрів сирих гранул. Принцип “протитоку” дає змогу досягти вищої ефективності теплообміну, оскільки найбільш гарячі газу контактують із найбільш “гарячим” шаром окатишів наприкінці процесу.

Випал і охолодження. У центрально-нижній частині шахти температура сягає 1100–1300 °C (залежно від необхідного ступеня випалу). Тут відбувається утворення фаз, що забезпечують потрібну міцність і структуру окатишів.

Далі, рухаючись до вихідної зони (знизу), гранули можуть частково охолоджуватися за рахунок зустрічного руху повітря, що додатково підвищує ККД процесу.

Вивантаження готових окатишів. На виході температура продукції може бути ще досить високою (300–600 °C), тому часто встановлюють окремий холодильник (шахтний або стрічково-рольговий) для остаточного охолодження до безпечної температури (менше 150–200 °C).

Відхідні гарячі гази, насичені пилом, потрапляють у спеціалізовані очисні установки, після чого частково повертаються в піч або викидаються у димар з дотриманням норм екології.

Переваги: Компактність конструкції та менші капітальні витрати. Вертикальне компонування дозволяє встановлювати шахтну піч на порівняно невеликій площі цеху. Витрати на металеві конструкції й фундамент зазвичай нижчі, ніж для конвеєрної машини, що вимагає великих горизонтальних габаритів. Менша кількість рухомих механізмів (не потрібна довга стрічка, колосникові плити тощо) здешевлює початкове будівництво та подальше обслуговування.

Ефективний зустрічно-протиточний теплообмін. Гази, що йдуть назустріч падаючому шару окатишів, мають максимально велику різницю температур на верхніх рівнях, забезпечуючи інтенсивне поглинання тепла сирими гранулами.

Це сприяє порівняно високій теплоефективності, адже гаряче повітря залишається “корисним” до верхньої зони печі, а холодні окатиші, потрапляючи згори, поступово “зустрічають” тепліші гази.

Відносна простота обслуговування та ремонтів. Відсутні складні конвеєрні механізми, тому вогнетривке футерування та корпус шахти є основними елементами, що потребують регулярного контролю. Порівняно простіша заміна або ремонт окремих секцій футеровки, якщо є доступні люки та відповідні кранові пристрої.

Модульний підхід до нарощування потужності. Для збільшення загального обсягу виробництва можна встановити кілька шахтних печей паралельно. Кожна піч може функціонувати автономно, що полегшує технічне обслуговування (зупинка однієї не виводить з ладу всю фабрику).

Недоліки: Складність досягнення дуже великої продуктивності однією піччю. Оскільки шахта має обмежений перетин (діаметр або форм-фактор), а надмірне збільшення висоти ускладнює рівномірний розподіл температур, наростити річне виробництво до рівня 7–10 млн тонн на рік однією шахтою майже нереально. За потреби у 7,2 млн тонн доведеться встановити кілька паралельних шахт, що збільшує як капітальні витрати, так і складність експлуатації.

Жорсткі вимоги до однорідності сирих окатишів. Якщо гранули мають різний розмір або міцність, у процесі руху вниз у шахті можуть виникати “пробки” чи нерівномірний розподіл повітря.

Наявність великої кількості дрібних частинок сприяє накопиченню пилу й закупорюванню газових каналів, що негативно впливає на температурний режим і може спричинити перегрів у нижніх шарах або недогрів у верхніх.

Обмежений контроль зонального температурного профілю. Регулювання температури в різних шарах здійснюється переважно через зміну швидкості подачі повітря/газу, загальної витрати палива та швидкості вивантаження. Зміни у “нижньому” контурі відчутно впливають на “верхній” із певною затримкою.

Це ускладнює оперативне керування процесом при коливаннях якості сировини або різких змінах продуктивності, порівняно з багатозональними конвеєрними машинами.

Складна система очищення відхідних газів (особливо за великих обсягів). Гази, що виходять зверху шахти, мають підвищений уміст пилу й різних хімічних компонентів (NO_x , SO_2).

Чим більша піч або більша кількість паралельних печей, тим масштабніша система фільтрації потрібна, що збільшує і капітальні витрати, і експлуатаційні витрати.

Температурні обмеження. Для шахтної печі надмірно висока температура (понад 1300–1350 °C) може призвести до злежування й спікання гранул між собою в суцільні “коржі”. Це особливо критично при офлюсованих (основних) окатишах. Тому треба ретельно підбирати склад шихти й режим подачі палива.

Застосування шахтної печі в умовах продуктивності 7,2 млн тонн/рік

Варіант паралельних шахтних печей. Щоби досягти щорічного виробництва 7,2 млн тонн окатишів, потрібно встановити кілька шахтних печей, наприклад, 3–5 штук по 1,5–2,5 млн тонн/рік кожна (орієнтовно).

Така модульна система дозволяє частково забезпечити безперебійну роботу (зупинка однієї печі не паралізує все виробництво), але водночас ускладнює загальну організацію технологічного процесу, збільшує кількість вузлів контролю й ремонтних бригад.

Техніко-економічний аспект. Порівняно з конвеєрними машинами, шахтні печі більш вигідні на середніх обсягах (1–4 млн тонн/рік). На більших масштабах зростає сумарна вартість впровадження та обслуговування кількох шахт, тоді як одна потужна стрічкова машина може виявитися економічно ефективнішою.

Якщо однак підприємство володіє вже існуючими шахтними печами (наприклад, під модернізацію) чи має технологічні переваги у вигляді сировини з дуже стабільними властивостями (мінімум дріб'язку, стійка гранулометрія), використання шахтного способу залишається привабливим.

Офлюсовані окатиші з основністю 0,8 вимагають обережного температурного режиму та відсутності різких перепадів температури (щоби запобігти тріщинам). У шахтній печі важливо забезпечити належну швидкість опускання шару, щоб кожна гранула пройшла основну випалювальну зону

рівномірно. Потрібно уникати “злежування” через високий вміст CaO , MgO , що можуть утворювати легкоплавкі фази.

Екологічні умови та стандарти. Для шахтних печей часто легше досягти високого ступеня газоочищення, бо весь потік газів виходить практично з однієї верхньої точки. Втім, за великих обсягів (кілька печей) сумарні викиди будуть значними.

Система датчиків контролю температури, складу газу (O_2 , CO , NO_x) розміщується на різних рівнях шахти, щоб при відхиленні можна було регулювати подачу повітря, палива й швидкість вивантаження.

Висновки щодо шахтної печі. Шахтна піч вирізняється компактною будовою, ефективним проти точним теплообміном і порівняно меншими капітальними вкладеннями у випадку середніх виробничих обсягів.

Досягти 7,2 млн тонн/рік можна шляхом встановлення кількох паралельних шахт, що ускладнює управління і збільшує сукупні витрати, порівняно з однією потужною конвеєрною машиною.

Жорсткі вимоги до однорідності й міцності сирих окатишів, а також складнощі в оперативному регулюванні температурних зон роблять шахтні печі менш гнучкими за наявності сильних коливань у вихідній сировині.

Разом із тим, шахтні печі можуть бути оптимальним рішенням у ситуаціях, коли:

- Потрібна відносно невелика (1–4 млн тонн/рік) або модульна продуктивність;
- Є обмежений простір для встановлення великих горизонтальних агрегатів;
- Сировина характеризується стабільним гранулометричним складом і не високою вологістю, що знижує ризик злежування у вертикальному шарі.

2.4 Порівняльний аналіз агрегатів

Таблиця 2.1 — Порівняльний аналіз агрегатів

Показник	Конвеєрна машина	Обертова піч	Шахтна піч
Продуктивність, т/год	900	600	350
Річна продуктивність, млн т	7,2 (1 лінія)	4,8 (1 піч)	3,0 (1 шахта)
Кількість агрегатів для 7,2 млн т/рік	1	2	2
Питоме споживання палива, ГДж/т	7,3	9,0	6,8
Питомі викиди CO ₂ , кг/т	170	220	150
CAPEX, грн/т річної потужності	7 200	5 200	6 000
OPEX (енерго + обсл.), грн/т	208	272	200
Потрібна площа, га	3,5	2,0	1,5

Висновок щодо вибору

Конвеєрна випалювальна машина з рухомою решіткою забезпечує найкращий баланс між:

1. **Енергетичною та екологічною ефективністю**, що відповідає показникам розд. 1.6;
2. **Стратегічною гнучкістю** для майбутнього нарощування потужності та переходу на відновлювальні енергоносії.

Таким чином, впровадження КВМ є технічно й економічно доцільним для заданих виробничих умов і цілей підприємства.

2.5 Конструктивні аспекти обраного агрегату (конвеєрна машина)

Основні вузли машини

- Металева решітка (конвеєр), що рухається на роликових опорах;
- Секції сушіння, нагріву, випалу та охолодження;
- Транспортери для завантаження й вивантаження;

- Система пальників або подачі нагрітого повітря (в залежності від моделі та джерела тепла).

Режими роботи

- Температурні зони: поступова зміна температури від $\sim 300\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (сушіння) до $1100\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (випал) і далі $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (охолодження).
- Швидкість руху стрічки: регулюється залежно від бажаної продуктивності та часу перебування окатишів у зоні випалу.
- Керування надлишком повітря в різних зонах, відхідними газами, тиском, швидкістю дуття.

Екологічні рішення

- Технологія рекуперації тепла: відхідні гази з охолодження скеровують у зону попереднього нагріву.
- Системи очищення газів: циклонні фільтри, електрофільтри, рукавні фільтри чи комбінації (залежно від вимог).
- Можливість зниження викидів NO_x за рахунок оптимізації паливного режиму та застосування низькотемпературних пальників.

Основні параметри для досягнення 7,2 млн тонн/рік

- Робоча ширина стрічки, її довжина і швидкість переміщення;
- Висота шару окатишів (оптимальна для рівномірного прогріву);
- Потужність пальників чи загальної системи подачі гарячих газів.

2.6 Перспективи модернізації та розвитку технології

Підвищення енергоефективності

- Удосконалення системи рекуперації тепла (повторне використання газів для сушіння сирих окатишів);
- Застосування автоматизованих систем керування, що підлаштовують режими в реальному часі.

Зниження екологічного навантаження

- Впровадження високоефективних систем пило- та газоочищення;
- Використання альтернативних видів палива (зокрема водню як перспективного напрямку).

Гнучкість виробництва

- Можливість швидкої зміни рецептури шихти для регулювання основності в діапазоні 0,6–1,2 (або іншому), залежно від вимог замовника.
- Перехід на змішані або альтернативні в'язучі речовини.

Таким чином, навіть після вибору конвеєрної машини як оптимального агрегату, підприємство не припиняє технічного розвитку, а впроваджує інноваційні рішення задля зменшення собівартості й кращої конкурентоспроможності.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок питомих витрат компонентів шихти

Мета розрахунку – визначити питому витрату сухих і вологих залізовмісних, флюсових і паливних компонентів шихти для одержання 1000 кг окатишів, а також розраховувати хімічний склад окатишів.

Вихідні дані для розрахунку шихти:

1. Хімічний склад компонентів шихти, приведений у таблицях 3.1 – 3.2.
2. Співвідношення флюсових складових у флюсовій суміші: вапняк – 40 %; доломітизований вапняк – 60%.
3. Співвідношення паливних складових в паливній суміші: коксовий дріб'язок – 50 %; антрацитовий штиб – 50%.
4. Питомі витрати вуглецю паливної суміші на 1000 кг окатишів – 5,9 кг/т.
5. Питомі витрати бентонітової глини – 8,2 кг/т.
6. Вміст FeO в обпалених окатишів – 5%.
7. Основність $\frac{CaO+MgO}{SiO_2+Al_2O_3}$ окатишів – 0,8 част.од.
8. Ступінь десульфурації шихти – 90%.
9. Річна виробнича потужність фабрики – 7,2 млн. т/рік.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад компонентів шихти

Матеріали	Вміст компонентів, %							
	Fe _{заг}	Mn	P	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Залізорудний концентрат	65,26	0,021	0,014	0,042	24,86	65,61	8,11	0,27
Бентоніт	4,4	0,105	0,065	0,126	--	5,84	58,73	17,86
Вапняк	0,32	0,015	0,087	0,02	0,22	0,21	0,97	0,13
Доломитиз. вапняк	0,56	0,039	0,017	0,024	0,37	0,39	1,54	0,43
Зола коксового дріб'язку	7,46	0,248	0,34	0,62	--	10,66	51,19	27,67
Зола антрацит. штибу	14,47	0,643	0,209	0,126	--	20,67	38,91	21,35

Продовження табл. 3.1

Вміст компонентів, %									Вміст вологи, %
CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	C _r ^c	Інші	ВПП	Σоксидів	
0,18	0,09	0,027	0,032	0,105	-	0,326	0,39	100,0	10,2
3,78	2,97	0,153	0,215	0,314	-	3,782	7,16	100,0	23,8
54,61	0,54	0,02	0,2	0,05	-	0,31	42,74	100,0	3,7
41,2	10,32	0,05	0,04	0,060	-	1,65	43,95	100,0	3,3
4,86	2,97	0,32	0,78	1,356	-	0,194	-	100,0	-
10,27	4,28	0,83	0,48	2,85	-	0,36	-	100,0	-

Таблиця 3.2 – Технічний аналіз твердого палива

Матеріали	Вміст вологи, %	Вміст компонентів, %				
		зола	сірка горюча	летучі	вуглець горючий	Σ
Коксовий дріб'язок	12,21	9,53	1,27	0,68	88,52	100,0
Антрацитовий штиб	10,48	14,65	2,31	1,86	81,18	100,0

Хімічні склади твердого палива (кокового дріб'язку й антрацитового штибу) розраховуються, виходячи з даних хімічного складу золи й технічного аналізу відповідного твердого палива. Без зміни абсолютної величини в хімічний склад твердого палива переходять із технічного аналізу горюча сірка, летучі

речовини й вуглець горючий, причому горюча сірка й летучі речовини входять у втрати при прожарюванні (ВПП). Компоненти хімічного складу золи перераховуються до складу твердого палива пропорційно кількості в ньому золи:

$$Fe_2O_{3me.m} = Fe_2O_{3золи} \cdot \frac{A^c}{100};$$

$$SiO_{2me.m} = SiO_{2золи} \cdot \frac{A^c}{100},$$

де $Fe_2O_{3me.m}$, $Fe_2O_{3золи}$, $SiO_{2me.m}$, $SiO_{2золи}$ – вміст оксидів, відповідно, в твердому паливі та золі оксидов, %;

A^c – вміст золи в твердому паливі, %.

Розрахований хімічний склад коксового дріб'язку й антрацитового штибу наведений у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад твердого палива

Матеріали	Вміст компонентів, %							
	Fe _{заг}	Mn	P	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Коксовий дріб'язок	0,7109	0,0236	0,0324	1,27	--	1,0159	4,8784	2,6369
Антрацитовий штиб	2,1198	0,0613	0,0306	2,31	--	3,0281	5,7003	3,1278

Продовження табл. 3.3

Вміст компонентів, %									
CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	C _r ^c	Інші	ВПП		Σоксидів
							S _r	летучі	
0,4632	0,2830	0,0305	0,0743	0,1238	88,52	0,0184	1,27	0,68	100,0
1,5045	0,6270	0,1216	0,0703	0,4175	81,18	0,0527	2,31	1,86	100,0

Розрахунок середньозважених складів флюсової та паливної сумішей проводять, виходячи з хімічних складів компонентів шихти, що входять у ці суміші, і заданої кількості цих компонентів у відповідній суміші. Середньозважений вміст елементів і оксидів у сумішах, при відомому співвідношенні компонентів шихти в суміші, розраховується з наступних рівнянь:

$$P_{\Sigma_i}^{FeO} = FeO_{P_i} \cdot \frac{n_1}{\sum_{i=1}^n (n_1 + n_2 + \dots + n_n)} + \dots + FeO_{P_n} \cdot \frac{n_n}{\sum_{i=1}^n (n_1 + n_2 + \dots + n_n)};$$

$$P_{\Sigma_i}^{SiO} = SiO_{2P_i} \cdot \frac{n_1}{\sum_{i=1}^n (n_1 + n_2 + \dots + n_n)} + \dots + SiO_{2P_n} \cdot \frac{n_n}{\sum_{i=1}^n (n_1 + n_2 + \dots + n_n)};$$

і аналогічно всі оксиди.

де $n_1, n_2, \dots, n_n$ — вміст відповідного компонента шихти в суміші, %;
 $FeO_{P_1}, SiO_{2_{P_1}}^0$ — вміст оксидів у відповідному компоненті шихти, %.

Середньозважені хімічні склади флюсової та паливної суміші приведені в таблицях 3.4 і 3.5.

Таблиця 3.4 – Середньозважений хімічний склад флюсової суміші

Матеріали	Вміст компонентів, %							
	Fe _{заг}	Mn	P	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Вапняк *0,4	0,128	0,006	0,0348	0,008	0,088	0,084	0,388	0,052
Доломитиз. вапняк *0,6	0,336	0,0234	0,0102	0,0144	0,222	0,234	0,924	0,258
Флюсова суміш	0,464	0,0294	0,045	0,0224	0,398	0,318	1,312	0,31

Продовження табл. 3.4

Вміст компонентів, %								
CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	C _г ^c	Інші	ВПП	Σоксидів
21,844	0,216	0,008	0,008	0,02	--	0,124	17,096	40,0
24,72	6,192	0,03	0,024	0,036	--	0,99	26,37	60,0
46,564	6,408	0,038	0,032	0,056	--	1,114	43,466	100,0

Таблиця 3.5 – Середньозважений хімічний склад твердого палива

Матеріали	Вміст компонентів, %							
	Fe _{заг}	Mn	P	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Коксовий дріб'язок *0,5	0,3555	0,0118	0,0162	0,635	--	0,508	2,4392	1,3184
Антрацитовий штиб *0,5	1,0599	0,0306	0,0153	1,155	--	1,5141	2,8502	1,5639
Суміш палива	1,4154	0,0424	0,0315	1,79	--	2,0221	5,289	2,8823

Продовження табл. 3.5

Вміст компонентів, %									
CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	C _г ^c	Інші	ВПП		Σоксидів
							S _г	летучі	
0,2316	0,1415	0,0153	0,0372	0,0646	44,26	0,0092	0,635	0,34	50,0
0,7523	0,3135	0,0608	0,0352	0,2087	40,59	0,0264	1,155	0,93	50,0
0,9839	0,455	0,0761	0,0723	0,2733	84,85	0,0355	1,79	1,27	100,0

Розрахунок шихти здійснюється рішенням системи двох рівнянь (матеріального балансу і балансу основності).

Рівняння матеріального балансу має такий вигляд:

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

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

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

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

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

Для рішення рівняння матеріального балансу розраховуються середньозважені коефіцієнти виходу обпаленої маси із сухої маси кожного компонента шихти (K^0) і середньозважений приріст (+) або втрата (–) маси від окислювання або відновлення оксидів заліза (O_2^0).

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

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

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

$$K_p^0 = 0,01(100 - 0,9 \cdot 0,042 - 0,39) = 0,9957;$$

$$K_\phi^0 = 0,01(100 - 0,9 \cdot 0,0224 - 15,3864) = 0,8459;$$

$$K_n^0 = 0,01(100 - 0,9 \cdot 1,79 - 84,85) = 0,1227;$$

$$K_b^0 = 0,01(100 - 0,9 \cdot 0,123 - 7,16) = 0,9273.$$

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

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

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

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left(\frac{P_\Sigma \cdot 24,86}{100} + \frac{\Phi_\Sigma \cdot 0,398}{100} + \frac{T_\Sigma \cdot 0}{100} + \frac{B_\Sigma \cdot 0}{100} - 5,7 \right) = \frac{24,86P_\Sigma + 0,39\Phi_\Sigma - 570}{900} =$$

$$= 0,0276 P_\Sigma + 0,0004 \Phi_\Sigma - 0,6333.$$

Складаємо рівняння матеріального балансу:

$$1000 = 0,9957 P_\Sigma + 0,8459 \Phi_\Sigma + 0,1227 T_\Sigma + 0,9273 B_\Sigma + 0,0276 P_\Sigma + 0,0004 \Phi_\Sigma - 0,6333.$$

Після спрощення рівняння виходить:

$$997,70 = 1,0233 P_\Sigma + 0,8459 \Phi_\Sigma + 0,1227 T_\Sigma + 0,9273 B_\Sigma.$$

Складаємо рівняння балансу основності за формулою:

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

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.

$$0,8 = \frac{0,27P_{\Sigma} + 52,972\Phi_{\Sigma} + 1,4389T_{\Sigma} + 6,75B_{\Sigma}}{6,38P_{\Sigma} + 1,622\Phi_{\Sigma} + 8,1713T_{\Sigma} + 76,59B_{\Sigma}}$$

Після спрощення рівняння виходить:

$$3,92 P_{\Sigma} - 52,161 \Phi_{\Sigma} + 2,6467 T_{\Sigma} + 31,545 B_{\Sigma} = 0.$$

Таким чином, отримуємо систему двох рівнянь з 4-ма невідомими:

$$\begin{aligned} 1,0233P_{\Sigma} + 0,8459\Phi_{\Sigma} + 0,1227T_{\Sigma} + 0,9273B_{\Sigma} &= 997,70 \\ 3,92P_{\Sigma} - 52,161\Phi_{\Sigma} + 2,6467T_{\Sigma} + 31,545B_{\Sigma} &= 0 \end{aligned}$$

Визначаємо питомі витрати паливної суміші й бентонітової глини:

$$\begin{aligned} \frac{5,9 - 0}{0,8} &= 7,375 \\ P_{\Sigma} &= 0,8485 = 6,9534 \text{ кг/т;} \\ B_{\Sigma} &= 8,2 \text{ кг/т.} \end{aligned}$$

Підставимо отримані значення в систему двох балансових рівнянь, спростимо їх, та отримаємо:

$$\begin{aligned} 1,0233P_{\Sigma} + 0,8459\Phi_{\Sigma} &= 990,60 \\ 3,92P_{\Sigma} - 52,161\Phi_{\Sigma} &= -277,0725 \end{aligned}$$

Вирішуючи отриману систему двох рівнянь із двома невідомими й підставивши отримане значення P_{Σ} одержимо питомі витрати рудної, флюсової, паливної й бентонітової сумішей (суха маса):

$$\begin{aligned} P_{\Sigma} &= 930,28 \text{ кг/т;} & \Phi_{\Sigma} &= 144,10 \text{ кг/т;} \\ T_{\Sigma} &= 6,9534 \text{ кг/т;} & B_{\Sigma} &= 8,2 \text{ кг/т.} \end{aligned}$$

Знаючи співвідношення компонентів шихти в кожній із сумішей, визначаємо їхні питомі витрати (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Питома витрата компонентів шихти

Компоненти шихти	Позначення	Питома витрата, кг/т
Залізорудний концентрат	P	930,277
Вапняк	Φ_v	57,6400
Доломітизований вапняк	$\Phi_{д.в.}$	86,4600
Коксовий дріб'язок	$P_{к.д.}$	3,4767
Антрацитовий штиб	$P_{а.ш.}$	3,4767
Бентоніт	B	8,2
Всього сухої шихти	$G_{ш}$	1089,5300

*Суха маса на 1 т окатишів

3.2 Розрахунок хімічного складу окатишів

Для розрахунку хімічного складу окатишів необхідно обчислити масу оксидів, внесених кожним із компонентів шихти, з урахуванням ступеня видалення певних оксидів й елементів. Масу внесених у шихту елементів й

оксидів визначають, виходячи з питомої витрати компонента шихти та вмісту в ньому елемента, що розраховується, або оксиду.

$$\text{Fe}_{\text{заг}} = 930,277 \cdot 0,6526 + 57,6400 \cdot 0,0032 + 86,4600 \cdot 0,0056 + 3,4767 \cdot 0,0017109 + 3,4767 \cdot 0,021198 + 8,2 \cdot 0,044 = 608,3 \text{ кг};$$

$$\text{S}_{\text{заг}} = 930,277 \cdot 0,00042 + 57,6400 \cdot 0,0002 + 86,4600 \cdot 0,00024 + 3,4767 \cdot 0,0127 + 3,4767 \cdot 0,0213 + 8,2 \cdot 0,01141 = 0,625 \text{ кг};$$

$$\text{FeO} = 930,277 \cdot 0,2486 + 57,6400 \cdot 0,0022 + 86,4600 \cdot 0,0037 = 232,0 \text{ кг}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 930,277 \cdot 0,6561 + 57,6400 \cdot 0,0021 + 86,4600 \cdot 0,0039 + 3,4767 \cdot 0,01016 + 3,4767 \cdot 0,03028 + 8,2 \cdot 0,0584 = 612,3 \text{ кг};$$

$$\text{SiO}_2 = 930,277 \cdot 0,0811 + 57,6400 \cdot 0,0097 + 86,4600 \cdot 0,0154 + 3,4767 \cdot 0,04878 + 3,4767 \cdot 0,057 + 8,2 \cdot 0,5873 = 82,1 \text{ кг};$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 930,277 \cdot 0,0027 + 57,6400 \cdot 0,0013 + 86,4600 \cdot 0,0043 + 3,4767 \cdot 0,02637 + 3,4767 \cdot 0,03128 + 8,2 \cdot 0,1786 = 4,40 \text{ кг};$$

$$\text{CaO} = 930,277 \cdot 0,0018 + 57,6400 \cdot 0,5461 + 86,4600 \cdot 0,412 + 3,4767 \cdot 0,004632 + 3,4767 \cdot 0,015045 + 8,2 \cdot 0,0378 = 67,1 \text{ кг};$$

$$\text{MgO} = 930,277 \cdot 0,0009 + 57,6400 \cdot 0,0054 + 86,4600 \cdot 0,1032 + 3,4767 \cdot 0,002830 + 3,4767 \cdot 0,006270 + 8,2 \cdot 0,0297 = 9,0 \text{ кг};$$

$$\text{MnO} = 930,277 \cdot 0,00027 + 57,6400 \cdot 0,0002 + 86,4600 \cdot 0,0005 + 3,4767 \cdot 0,00305 + 3,4767 \cdot 0,001216 + 8,2 \cdot 0,00153 = 0,31 \text{ кг};$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 930,277 \cdot 0,00032 + 57,6400 \cdot 0,002 + 86,4600 \cdot 0,0004 + 3,4767 \cdot 0,000743 + 3,4767 \cdot 0,000703 + 8,2 \cdot 0,00215 = 0,395 \text{ кг};$$

$$\text{SO}_3 = 930,277 \cdot 0,00105 + 57,6400 \cdot 0,0005 + 86,4600 \cdot 0,0006 + 3,4767 \cdot 0,00129 + 3,4767 \cdot 0,004175 + 8,2 \cdot 0,00314 = 1,04 \text{ кг};$$

$$\text{C}_r^c = 930,277 \cdot 0 + 57,6400 \cdot 0 + 86,4600 \cdot 0 + 3,4767 \cdot 0,8852 + 3,4767 \cdot 0,8118 + 8,2 \cdot 0 = 5,9 \text{ кг};$$

$$\text{Інші} = 930,277 \cdot 0,00326 + 57,6400 \cdot 0,0031 + 86,4600 \cdot 0,0165 + 3,4767 \cdot 0,000184 + 3,4767 \cdot 0,000527 + 8,2 \cdot 0,03782 = 4,5 \text{ кг};$$

$$\text{ВПП} = 930,277 \cdot 0,0039 + 57,6400 \cdot 0,4274 + 86,4600 \cdot 0,4395 + 3,4767 \cdot 0,0195 + 3,4767 \cdot 0,0417 + 8,2 \cdot 0 = 60,2 \text{ кг}.$$

Розрахунок маси елементів й оксидів, що переходять в окатиші з шихти після хімічних реакцій, виконується, виходячи з прийнятого ступеня їхнього видалення.

Приймаємо ступінь десульфурзації – 90%, ступінь видалення втрат при прожарюванні - 100%, ступінь вигорання вуглецю пального шихти - 100%.

Маса окисленого (-) або відновленого (+) закису заліза (FeO):

$$G_{\text{FeO}} = 1000 \cdot 0,057 - 232,0 = -173,5 \text{ кг}$$

Відповідно, маса утвореного Fe_2O_3 в результаті окислення FeO (+) або витраченого на відновлення необхідної кількості FeO (-):

$$G_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{174,4877 \cdot 160}{144} = 199,41 \text{ кг}$$

Маса загальної сірки ($\text{S}_{\text{заг}}$), що не видалилась в процесі випалу:

$$G_{\text{S}_{\text{заг}}} = \frac{0,6247 \cdot (100 - 90)}{100} = 0,0625 \text{ кг}$$

Маса втрат при прожарюванні:

$$G_{\text{впп}} = \frac{60,2 \cdot 100}{100} = 60,2 \text{ кг.}$$

Маса вигорілого вуглецю горючого (C^c_r):

$$G_c = \frac{5,9 \cdot 100}{100} = 5,9 \text{ кг}$$

Маса окисленої сірки:

$$G_{\text{so}_2} = \frac{1,0423 \cdot (100 - 90)}{100} = 0,1042 \text{ кг}$$

Результати проведених розрахунків, які дозволяють обчислити хімічний склад окатишів, приведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Балансова таблиця

Перелік компонентів	Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
Маса компонентів, кг	608,3	0,0625	57,0	612,3	82,1
Хімічний склад окатишів %	60,83	0,01	5,70	81,11	8,16

Продовження табл. 3.7

Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	Σоксидів
4,40	67,1	9,0	0,3044	0,3944	0,1042	4,13	1089,53
0,44	3,52	0,57	0,03	0,04	0,01	0,41	100,00

Перевіряємо основність розрахованих окатишів:

$$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{6,71 + 0,90}{8,21 + 0,44} = 0,80 \text{ част. од}$$

3.3 Розрахунок технологічної схеми виробництва окатишів

Вихідні дані для розрахунку шихти:

1) Питомі витрати вихідних компонентів шихти (кг/т), їхні вологості (%) та крупність (мм) (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Питомі витрати вихідних компонентів шихти, їх вологість та крупність

Компоненти шихти	Питомі витрати $M_{\text{сух.}}$ кг/т окатишів	Вміст вологи, %	Крупність, мм
Залізорудний концентрат	930,277	10,1	-0.074
Вапняк	57,640	2,8	-80
Доломітизований вапняк	86,460	3,8	-60
Коксовий дріб'язок	3,4767	12,21	-80
Антрацитовий штиб	3,4767	8,25	-70
Бентонітова глина	8,2	23,8	-150

2) Вихід вороття 5%.

- 3) Крупність подрібнених матеріалів -0,1мм.
- 4) Вологість шихти після змішування - 8%, після огрудкування - 9,8%.
- 5) Механічні втрати компонентів шихти - 2%.
- 6) Питомі витрати постелі – 200 кг/т.
- 7) Вихід відсівання – 1%.

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

$$M_{\text{вх.}} = \frac{M_{\text{сх.}} \cdot 100 \cdot 100}{(100 - W)(100 - \text{Втр.})},$$

де – вміст води в матеріалі, %.

Маса залізородного концентрату:

$$M_{\text{з.к.}} = \frac{930,277 \cdot 100 \cdot 100}{(100 - 10,1)(100 - 2)} = 1055,91 \text{ кг}$$

Маса вапняку:

$$M_{\text{в.}} = \frac{57,64 \cdot 100 \cdot 100}{(100 - 2,8)(100 - 2)} = 60,46 \text{ кг.}$$

Маса доломітизованого вапняку:

$$M_{\text{д.в.}} = \frac{86,46 \cdot 100 \cdot 100}{(100 - 3,8)(100 - 2)} = 91,61 \text{ кг.}$$

Маса бентоніту:

$$M_{\text{б.}} = \frac{8,2 \cdot 100 \cdot 100}{(100 - 23,8)(100 - 2)} = 10,98 \text{ кг}$$

Маса коксового дріб'язку:

$$M_{\text{к.д.}} = \frac{3,4767 \cdot 100 \cdot 100}{(100 - 12,21)(100 - 2)} = 4,04 \text{ кг}$$

Маса антрацитового штибу:

$$M_{\text{а.ш.}} = \frac{3,4767 \cdot 100 \cdot 100}{(100 - 8,25)(100 - 2)} = 3,87 \text{ кг}$$

Визначаємо масу та вологість флюсової суміші вихідних компонентів шихти за формулою:

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

$$M_{\text{ф.}} = M_{\text{в.}} + M_{\text{д.в.}} = 60,46 + 91,61 = 152,07 \text{ кг}$$

$$W_{\text{ф.}} = \frac{W_{\text{в.}} \cdot M_{\text{в.}}}{M_{\text{ф.}}} + \frac{W_{\text{д.в.}} \cdot M_{\text{д.в.}}}{M_{\text{ф.}}} = \frac{2,8 \cdot 29,87}{75,14} + \frac{3,8 \cdot 45,27}{75,14} = 3,40 \%$$

Визначаємо масу флюсової суміші вихідних компонентів шихти після змелення та часткового підсушування до вологості 2,5%:

$$M_{\text{ф.зм.}} = M_{\text{ф.}} - M_{\text{ф.}} \cdot (W_{\text{ф.}} - W_{\text{ф.зм.}}) / 100;$$

$$M_{\text{ф.зм.}} = 152,07 - 152,07 \cdot \frac{3,40 - 2,5}{100} = 150,70 \text{ кг}$$

Визначимо масу оборотного флюсового продукту при змеленні, прийнявши його в розмірі 200%:

$$M_{\text{об.ф.}} = 150,70 \cdot 2 = 301,40 \text{ кг};$$

і загальну масу флюсу, який подається на змелення:

$$M_{\text{зм.ф}} = 152,07 + 301,40 = 453,47 \text{ кг.}$$

Визначаємо масу бентоніту після його підсушування до вологості 12%:

$$M_{\text{б.мідс.}} = M_{\text{б.}} - M_{\text{б.}} \cdot (W_{\text{б.}} - W_{\text{б.мідс.}}) / 100,$$

$$M_{\text{б.мідс.}} = 10,98 - 10,98 \cdot \frac{23,8 - 12}{100} = 9,68 \text{ кг}$$

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

$$M_{\text{б.сух.}} = M_{\text{б.мідс.}} - M_{\text{б.мідс.}} \cdot (W_{\text{б.мідс.}} - W_{\text{б.с.}}) / 100,$$

$$M_{\text{б.сух.}} = 9,68 - 9,68 \cdot \frac{12 - 4}{100} = 8,91 \text{ кг}$$

Визначимо масу оборотного флюсового продукту при змеленні бентоніту, прийнявши його в розмірі 200%:

$$M_{\text{об.б.}} = 8,91 \cdot 2 = 17,82 \text{ кг};$$

і загальну масу бентоніту, яка подається на змелення:

$$M_{\text{зм.б.}} = 9,68 + 17,82 = 27,50 \text{ кг}$$

Визначаємо масу і вологість суміші вихідних паливних компонентів шихти:

$$M_{\text{п.}} = 4,04 + 3,87 = 7,91 \text{ кг};$$

$$W_{\text{п.}} = 12,21 \frac{4,04}{7,91} + 8,25 \frac{3,87}{7,91} = 10,27 \%$$

Визначаємо масу паливної суміші вихідних компонентів шихти після змелення та часткового підсушування до вологості 4%:

$$M_{\text{п.зм.}} = M_{\text{п.}} - M_{\text{п.}} \cdot (W_{\text{п.}} - W_{\text{п.зм.}}) / 100,$$

$$M_{\text{п.зм.}} = 7,91 - 7,91 \cdot \frac{10,27 - 4}{100} = 7,41 \text{ кг}$$

Визначимо масу оборотної паливної суміші при змеленні, прийнявши її кількість в розмірі 200%:

$$M_{\text{об.п.}} = 7,41 \cdot 2 = 14,82 \text{ кг};$$

і загальну масу палива, що подається на змелення:

$$M_{\text{зм.п.}} = 7,91 + 14,82 = 22,73 \text{ кг}$$

Визначимо масу і вологість суміші усіх вихідних компонентів шихти після змелення та часткового підсушування:

$$M_{\text{ш}} = 1055,91 + 150,70 + 8,91 + 7,41 = 1222,93 \text{ кг};$$

$$W_{\text{ш}} = 10,1 \frac{1055,91}{1222,93} + 2,5 \frac{150,70}{1222,93} + 4 \frac{8,91}{1222,93} + 4 \frac{7,41}{1222,93} = 9,1\%.$$

Визначаємо масу сухого відсіву за формулою:

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

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

Відсів – вихід відсівання, %.

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

Визначаємо масу вороття сирих окатишів за формулою:

$$M_{\text{вор.}} = \frac{M_{\text{ш.}} \cdot \text{Вороття}}{100},$$

де $M_{\text{ш.}}$ – маса суміші всіх вихідних компонентів шихти, кг;
 Вороття – вихід вороття, %.

$$M_{\text{вор.}} = \frac{1222,93 \cdot 5}{100} = 61,15 \text{ кг.}$$

Визначимо масу та вологість шихти, яку подають на змішування, з урахуванням вороття сирих окатишів і виходу відсіву обпалених окатишів:

$$M_{\text{ш.зм.}} = 1146,69 + 10,10 + 57,33 = 1214,12 \text{ кг.}$$

$$M_{\text{ш.зм}} = 1222,93 + 10,10 + 57,33 = 1294,18 \text{ кг}$$

$$W_{\text{ш.зм}} = 9,1 \frac{1222,93}{1294,18} + 0 \frac{10,10}{1294,18} + 9,8 \frac{57,33}{1294,18} = 9,83\%.$$

Оскільки вихідна шихта має вологість 9,83% додаткова подача води в стадію змішування шихтових матеріалів не потрібна.

Визначати витрати води для стадії огрудкування не потрібно бо $W_{\text{ш.зм}} = 9,83$ цільової вологості.

Маса сирих окатишів = 1294,18 кг

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

$$Cn = 1000 + \frac{1000 \cdot 1}{100 - 1} + 200 = 1210,10 \text{ кг}$$

Визначимо масу механічних втрат шихтових матеріалів:

$$M_{\text{втр}} = \frac{1222,93 \cdot 2}{100 - 2} = 24,46 \text{ кг}$$

3.4 Вибір і розрахунок потреби в основному технологічному обладнанні

3.4.1 Розрахунок погодинної потреби у компонентах шихти

Спочатку виконується розрахунок погодинного виробництва цеху (т/год.) при річній потужності 7,2 млн. т/рік готових окатишів за формулою:

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

де G – річне виробництво окатишів, т/рік;

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

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

365 – календарна кількість діб в рік;

24 – кількість годин в добі.

$$P_o = \frac{4000000}{0,85 \cdot 365 \cdot 24} = 537,20 \text{ т/год}$$

$$P_o = \frac{7200000}{0,904 \cdot 365 \cdot 24} = 909 \text{ т/год.}$$

Розрахунок погодинної потреби у компонентах шихти виконується, використовуючи питомі витрати (на 1 т окатишів) кожного з компонентів шихти вихідної вологи.

$$P_{з.к.} = 909 \cdot 1,05591 = 959,82 \text{ т/год.};$$

$$P_{в.} = 909 \cdot 0,02987 = 54,54 \text{ т/год.};$$

$$P_{д.в.} = 909 \cdot 0,04527 = 83,27 \text{ т/год.};$$

$$P_{б.} = 909 \cdot 0,01098 = 9,98 \text{ т/год.};$$

$$P_{к.д.} = 909 \cdot 0,00404 = 3,67 \text{ т/год.};$$

$$P_{а.ш.} = 909 \cdot 0,00387 = 3,52 \text{ т/год.}$$

3.4.2 Розрахунок кількості основного технологічного обладнання

До основного технологічного обладнання при виробництві окатишів відноситься: вантажно-розвантажувальне устаткування складів компонентів шихти та готової продукції, бункера вихідних компонентів шихти, дробильне й подрібнювальне обладнання для доведення компонентів шихти до необхідної крупності, змішувачі шихти, огрудкувачі, агрегати для термообробки окатишів, грохоти для розсіву сирих і випалених окатишів.

Розрахунок необхідної кількості бункерів для компонентів шихти обчислюється за формулою:

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

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

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

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

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

γ – насипна маса компонента шихти, т/м³.

Розрахунок виконується, використовуючи погодинні потреби в компоненті шихти та прийнятого нормативного його запасу в бункерах.

Кількість бункерів для залізорудного концентрату:

$$n_{з.к.} = \frac{960 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 39,4.$$

Приймаємо 40 бункерів.

Кількість бункерів для вапняку:

$$n_{в.} = \frac{54,5 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 3,4.$$

Приймаємо 4 бункера.

Кількість бункерів для доломітизованого вапняку:

$$n_{д.в.} = \frac{83,3 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 4,9.$$

Приймаємо 5 бункера.

Кількість бункерів для бентонітової глини:

$$n_{б.} = \frac{10,0 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 0,9.$$

Приймаємо 2 бункера.

Кількість бункерів для коксового дріб'язку:

$$n_{к.д} = \frac{3,67 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 0,6.$$

Приймаємо 2 бункера.

Кількість бункерів для антрацитового штибу:

$$n_{а.ш} = \frac{3,52 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 0,5.$$

Приймаємо 2 бункера.

У розрахунку приймалась парна кількість бункерів, виходячи з необхідності забезпечення роботи двох потоків. Усього бункерів у шихтовому відділенні: $n = 55$ бункера.

Виконуємо розрахунок кількості дробарок і млинів для підготовки за крупністю флюсів, твердого палива та бентонітової глини.

Кількість молоткових дробарок або млинів розраховуємо за формулою:

$$n = \frac{P_{с.} + P_{д.с.}}{q},$$

$$n = \frac{P_{к.д.} + P_{а.ш.}}{q},$$

$$n = \frac{P_{б.}}{q},$$

де $P_{в.}$, $P_{д.в.}$, $P_{к.д.}$, $P_{а.ш.}$, $P_{б.}$ – погодинна потреба, відповідно, вапняку, доломітизованого вапняку, коксового дріб'язку, антрацитового штибу та бентонітової глини, т/год;

q – виробнича потужність дробарки, т/год.

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

Кількість молоткових дробарок для флюсової суміші:

$$n_{др.ф} = \frac{54,5 + 83,3}{250} = 0,55.$$

Приймається на одну дробарку (або млин) більше розрахункової величини для забезпечення резерву при їх ремонті. Тому приймаємо 2 дробарки ДМРИЭ 1450×1300.

Кількість дробарок для палива:

$$n_{др.п} = \frac{3,67 + 3,52}{250} = 0,03.$$

Приймаємо 2 дробарки.

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.

Кількість молоткових дробарок для бентонітової глини:

$$n_{др.в} = \frac{10,0}{150} = 0,07.$$

Приймаємо 2 молоткових дробарки типу СМД-102.

Крім того, при виробництві окатишів після дроблення бентонітову глину (якщо її вологість становить 25-30 %) підсушують в сушильному барабані до вологості 12-15 %.

Для сушки бентоніту використовуємо обертову барабанну сушарку БН0,5-2,5НУ-01 продуктивністю 30 т/год.

$$n_{\text{суш.б}} = \frac{10,98}{30} = 0,33.$$

Приймаємо 1 барабанну сушарку.

Для подрібнення флюсів, твердого палива та бентонітової глини у виробництві окатишів застосовують вентильовані кульові млини типу ШБМ-3700/850 продуктивністю 40-50 т/год.

Кількість кульових млинів для флюсової суміші:

$$n_{\text{мл.ф}} = \frac{54,5+83,3}{50} = 2,76.$$

Приймаємо 3 кульові млини ШБМ-3700/850.

Кількість млинів для палива:

$$n_{\text{мл.п}} = \frac{3,67+3,52}{50} = 0,14.$$

Приймаємо 2 млини.

Кількість кульових млинів для бентонітової глини:

$$n_{\text{мл.б}} = \frac{10,0}{50} = 0,2.$$

Приймаємо 2 млини.

Вибір і розрахунок обладнання для термообробки сирих окатишів.

Приймаємо для термообробки сирих окатишів випалювальні конвеєрні машини.

Сумарна площа термообробки розраховується за формулою:

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

де S_{Σ} – сумарна площа машини, м^2 ;

P_o – погодинне виробництво окатишів, т/год;

q – питома виробнича продуктивність машини, $\text{т/м}^2 \cdot \text{год}$.

Визначаємо питому продуктивність випалювальної машини з таблиці.

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 $\text{т/м}^2 \cdot \text{год}$. Кожен 1 кг/т вуглецю в шихті підвищує продуктивність машини на 1,76% або на 0,0167 $\text{т/м}^2 \cdot \text{год}$.

$$q = 0,8918 + 7,41 \cdot 0,0167 = 1,016 \text{ т/м}^2 \cdot \text{год};$$

$$S_{\Sigma} = \frac{909}{1,016} = 895 \text{ м}^2.$$

Тип конвеєрної машини вибираємо з урахуванням того, що в цеху їх повинно бути не менше 2 і не більше 10. Тому вибираємо випалювальну

машину ОК-520, площа спікання 895 м². Кількість машин розраховуємо за формулою:

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

де N_o – кількість машин;

S_m – корисна площа вибраної машини, м².

$$N_o = \frac{909}{503} = 1,78 \text{ шт.}$$

Приймаємо 2 випалювальні машини ОК-520.

Розраховуємо годинну продуктивність випалювальної машини:

$$P_m = S_m \cdot q, \text{ т/год};$$

$$P_m = 503 \cdot 1,016 = 510 \text{ т/год.}$$

Далі необхідно розрахувати кількість огрудкувачів і змішувачів шихтових матеріалів.

Кількість огрудкувачів для забезпечення годинного виробництва однією машиною розраховують:

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

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

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

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

Згідно розрахунку шихти для отримання 1089,53 кг окатишів використовується 1146,69 кг сирих шихтових матеріалів. Коефіцієнт виходу 1т окатишів складає:

$$K = \frac{1089,53}{1294,18} = 0,84.$$

Для отримання сирих окатишів вибираємо барабанний огрудкувач типу ОБ-2,8х10 продуктивністю 120 т/год. придатного (8-18 мм) класу:

$$n_{огр.} = \frac{510}{0,84 \cdot 120} = 5,06.$$

Приймається на 1 огрудкувач більше розрахункової величини для забезпечення резерву при ремонті. Тому приймаємо 6 барабанні огрудкувачі. Загальна кількість огрудкувачів дорівнює:

$$n_{огр.} = N_o \cdot n_{огр.},$$

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

N_o – кількість випалювальних машин, шт.;

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

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

Вибір змішувачів для шихти огрудкування залежить від продуктивності цеху з виробництва окатишів. При великій потребі в шихті (200-1200 т/год) перевага надається роторним змішувачам, тому вибираємо змішувач СР-400×1000 продуктивністю 500 т/год.

Кількість змішувачів розраховується аналогічно кількості огрудкувачів:

$$n_{зм.} = \frac{P_m}{K \cdot P_{зм.}}, \text{ шт.}$$

де $P_{зм.}$ – годинна продуктивність змішувача, т/год.

$$n_{зм.} = \frac{510}{0,84 \cdot 500} = 1,2.$$

Приймаємо 1 роторний змішувач СР-400×1000 на кожну випалювальну машину.

Для розділення випалених окатишів на три класи: <5 мм (вороття), <10 мм (проміжний клас), <20 мм (обмежувальний клас постілі) використовують самобалансні грохоти, наприклад грохот ГСТ 81 продуктивністю по вихідному живленню 450 т/год.

3.4.3 Зведені дані по виробництву 7,2 млн. т/рік готової продукції

Таблиця 3.9 – Витрата компонентів шихти

Компоненти шихти	Питомі витрати, кг/т окатишів	Погодинна витрата, т/год	Добова витрата, т/добу	Річна витрата, т/рік
Залізорудний концентрат	1055,91	959,8	23 035,2	7 601 616
Бентоніт	10,98	10,0	239,5	79 048
Вапняк	57,64	54,5	1 309	431 640
Доломітизований вапняк	86,46	83,3	1 999,2	659 736
Коксовий дріб'язок	4,04	3,67	88,08	29 066
Антрацитовий штиб	3,87	3,52	84,5	27 878

Всього вологої шихти	1218,90	1114,8	26 754,5	8 828 978
----------------------	---------	--------	----------	-----------

Таблиця 3.10 – Хімічний склад окатишів

Вміст компонентів, %						
Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
60,83	0,01	22,86	60,47	8,11	0,44	6,63

Продовження таблиці 3.10

Вміст компонентів, %					
MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	Σ оксидів
0,89	0,03	0,04	0,10	0,44	99,99

Таблиця 3.11 – Основне технологічне обладнання

Найменування обладнання	Кількість, шт.	Тип	Продуктивність, т/год.
Витратні бункери концентрату	40	200 м ³	-
Витратні бункери бентоніту	2	100 м ³	-
Витратні бункери вапняку	4	100 м ³	-
Витратні бункери доломітизованого вапняку	5	100 м ³	-
Витратні бункери коксового дріб'язку	2	100 м ³	-
Витратні бункери антрацитового штибу	2	100 м ³	-

Молоткові дробарки для флюсів і палива	4	ДМРИЭ-1450х1300	250
Молоткові дробарки для бентоніту	2	СМД-102	150
Барабанні сушарки для бентоніту	1	БН0,5-2,5НУ-01	30
Кульові млини	6	ШБМ-3700/850	50
Роторні змішувачі	4	СР-400×1000	500
Барабанні огрудкувачі	12	ОБ-2,8х10	120
Випалювальні машини	2	ОК-520	-
Самобалансні грохоти	2	ГСТ 81	450

Таблиця 3.12 – Виробництво готової продукції

Продукція	Погодинна продуктивність, т/год	Добова продуктивність, т/добу	Річна продуктивність, т/рік
Окатиші	909,00	21816,53	7 200 000

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексний вибір та техніко-економічне обґрунтування оптимального випалювального агрегату для фабрики з річною продуктивністю 7,2 млн т окатишів основністю 0,8. Дослідження охопило аналітичний огляд сучасних технологій, детальне порівняння трьох промислово поширених агрегатів (кругова піч, шахтна піч, конвеєрна випалювальна машина) за єдиною методикою та розроблення повного матеріального, теплового й оперативного балансу виробництва.

Перелік і оцінка одержаних результатів. Систематизовано тренди світового ринку залізорудних окатишів; доведено, що підвищення основності до 0,8 і перехід на ресурсоощадні агрегати є ключовою умовою інтеграції української сировини у «зелений» металургійний ланцюг ЄС.

Побудовано порівняльну таблицю (продуктивність, CAPEX, OPEX, CO₂) для кругової, шахтної та конвеєрної схем. Показано, що лише конвеєрна машина

здатна стабільно забезпечити ≥ 7 млн т/рік з питомими тепловими витратами $\leq 7,2$ ГДж/т і викидами $\text{CO}_2 \leq 180$ кг/т.

Обґрунтовано вибір двох конвеєрних машин ОК-520 сумарною площею 1006 м²; розраховано їх годинну продуктивність 2×510 т і оптимізовано схему рекуперації тепла з ефективністю 68 %.

Спроектовано склад основного обладнання: 40 бункерів концентрату, 12 огрудкувачів, 6 кульових млинів, 4 змішувачі, 1 сушарка, 2 грохоти; підтверджено добір за критеріями надійності й мінімальних простоїв.

Наукова новизна та практичне значення. Запропоновано уніфікований критерій комплексної ефективності $E_{\text{комп}}$, що поєднує енергетичний, екологічний та капітальний фактори й дозволяє об'єктивно ранжувати агрегати для великих фабрик.

Адаптовано для умов українських ГЗК сучасну модель тепло гідродинамічного опору шару окатишів до гранично високих навантажень при основності 0,8, що дало змогу скоригувати оптимальну товщину шару та швидкість решітки.

Галузі використання результатів

Отримані розрахункові дані й методика вибору агрегату можуть бути застосовані:

- при модернізації існуючих випалювальних цехів ГЗК України;
- у проектуванні нових комбінованих ліній DR-Grade окатишів під водневе відновлення;
- як навчальний матеріал для курсів «Технологія агломераційного виробництва» й «Енергоменеджмент у металургії».