

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Гірничо-металургійний
Кафедра Металургії чорних металів і ливарного виробництва
Спеціальність 136 «Металургія»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедрою _____
«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на випускню кваліфікаційну роботу
студента Грішина Кирила Максимовича

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи: **Розвиток процесу виробництва залізорудних окатишів в напрямку економії енергетичних ресурсів.**

Затверджена наказом ректора КНУ від «19» лютого 2026 р. №112с

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 03 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт та процес дослідження, умови дослідження.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити).

4.1. Обґрунтування актуальності теми, постановка завдань.

4.2. Критичний аналіз літературних джерел.

4.3. Викладення оброблених даних досліджень і їх аналіз.

4.4. Заключення.

4.5. Список літературних джерел.

Дата видачі завдання 20 лютого 2026 р.

Керівник _____ Савельєв С.Г. _____
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ Грішин К.М. _____
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання бакалаврської роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Аналітична частина	05.03.26-10.04.26	
2	Інноваційна частина	11.04.26-20.05.26	
3	Вступ, висновки, реферат	01.05.26-10.05.26	
4	Виконання графічної частини	11.05.26-25.05.26	
5	Перевірка випускової кваліфікаційної роботи на плагіат	26.05.26-03.06.26	
6	Оформлення і переплетіння роботи	04.06.26-06.26	
7	Подання випускової кваліфікаційної роботи до кафедри	07.06.26	
8	Захист випускової кваліфікаційної роботи	22.06.26-26.06.26	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Керівник випускової кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

до випускної кваліфікаційної роботи на тему:

РОЗВИТОК ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ В НАПРЯМКУ ЕКОНОМІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

Пояснювальна записка: 67 с., 10 табл., 11 рис., 45 джерел.

Об'єкт дослідження: процес виробництва залізорудних окатишів.

Предмет дослідження: конструктивні елементи випалювальної конвеєрної машини та технічні рішення, які впливають на питомі витрати енергетичних ресурсів при виробництві залізорудних окатишів

Мета роботи: дослідження процесу випалу залізорудних окатишів з метою оптимізації (мінімізації) витрат енергетичних ресурсів при заданих значеннях якісних показників готової продукції.

Методи дослідження: синтез, методи математичного програмування.

Результати роботи: на основі аналізу конструктивних елементів випалювальної конвеєрної машини та технічних рішень були запропоновані заходи з розкриття резервів енергоефективності випалювальних конвеєрних машин Центрального та Північного ГЗК, побудована математична модель та виявлені закономірності витрат енергетичних ресурсів від конструкції випалювальних конвеєрних машин та технологічних параметрів виробництва залізорудних окатишів.

ОКАТИШІ, ЕНЕРГЕТИЧНІ ВИТРАТИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,
СОБІВАРТІСТЬ, ПАЛЬНИКИ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗОНИ, ДИМОСОС

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	7
1.1 Загальна інформація про технологію виробництва окатишів	7
1.1.1 Короткий опис технологічної схеми виробництва окатишів.....	7
1.1.2 Шихтові матеріали для виробництва окатишів.....	9
1.1.3 Зміцнення (випал) сирих окатишів.....	11
1.1.4 Загальні вимоги до якості готових окатишів.....	12
1.2 Техніко – економічні показники різних способів випалу окатишів	13
1.3 Споживання енергетичних ресурсів при виробництві окатишів	21
1.4 Висновки за Розділом 1 та постановка задач	28
РОЗДІЛ 2. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	31
2.1 Вплив енергетичних витрат на собівартість готових окатишів «Центрального ГЗК»	31
2.2 Математична модель процесу випалу окатишів, як основа для оптимізації енергетичних витрат	35
2.3 Енергетична ефективності конвеєрних машин з випалу окатишів.....	41
2.3.1 Заходи з оптимізації витрат теплової енергії на випалювальних конвеєрних машинах	42
2.3.2 Заходи з оптимізації витрат електричної енергії на випалювальних конвеєрних машинах	47
2.4 Вплив основних технічних та конструктивних рішень на показники роботи випалювальних машин.....	51
ВИСНОВКИ.....	54

ВСТУП

В наш час українська металургія переживає найглибшу кризу за всю новітню історію України. Виробництво сталі скоротилося з більш ніж 50 млн. т./рік на початку 1990-х років до 21 млн. т./рік на початок 2022 року, а з початком повномасштабного вторгнення виплавка сталі знизилася до 6,3 млн. т./рік, та несуттєво збільшилась в 2024 році до 7,6 млн. т./рік, що складає трохи більше 15 % від початкових показників [1].

Металургійну кризу поглиблюють структурні проблеми, такі як зростання цін на енергоресурси (електричну енергію, природний газ та паливо), здороження логістичних витрат, дефіцит оборотних засобів, недоступність позикового капіталу та нехватка власного капіталу.

З усіх вищенаведених викликів, найбільшим для підприємств гірничо-металургійної галузі України на початку 2026 року вважається енергетичний дефіцит. Виробничі процеси потребують безперервного енергетичного живлення в сотні мегават. В результаті наявного дефіциту, підприємства вимушені зменшувати об'єми виробництва через неможливість забезпечити стабільний режим енергозабезпечення.

Держава не стоїть осторонь перед викликами, які постають перед підприємствами гірничо-металургійної галузі. Так Уряд України збільшив імпорт електроенергії з Європейського Союзу [2], що дає можливість в малих межах стабілізувати виробництво. Однак, здороження електричної енергії призводить до зростання собівартості продукції і зниженню її конкурентоспроможності на внутрішньому і зовнішньому ринках і, як наслідок, вимушеного скорочення рівня виробництва. Зниження виробництва та експорту негативно впливає на формування прибутку підприємства і як результат, на фінансові надходження до Держбюджету України [3].

В експортній структурі залізорудної сировини України окатиші є найбільш дорогим сегментом. В загальному обсязі виробництва залізорудної сировини – окатиші займають від 25 до 35%.

Аналіз витрат ВАТ «Центральний ГЗК» свідчить, що найвища вартість технологічного циклу складає виробництво окатишів 41,2 грн/т та концентрату 27,7 грн/т, в той час як вартість видобутку руди складає лише 8,6 грн/т., а її подрібнення – 2,0 грн/т. інакше кажучи, для зниження загальної вартості кінцевого продукту найбільший інтерес викликають витрати на процес виробництва окатишів [4].

З огляду на все вищесказане, актуальним постає питання оптимізації собівартості виробництва залізорудних окатишів, а саме мінімізація енергетичних витрат.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальна інформація про технологію виробництва окатишів

1.1.1 Короткий опис технологічної схеми виробництва окатишів

Виробництво окатишів відносно нова технологія з окускування залізорудної сировини, так перша виробнича фабрика з виробництва окатишів була побудована в 1955 році в місті Сільвер Бей, США (Silver Bay, USA), нині фабрика належить компанії Cleveland – Cliffs [5].

В Україні перша дослідно-промислова партія окатишів була виготовлена в 1958 році на промисловій площадці Південного гірничо-збагачувального комбінату (нині – АТ «Південний ГЗК»), який на той момент проектувався, як агломераційна фабрика. Саме на Південному ГЗК відпрацьовувалася технологія виробництва окатишів, яка стала прототипом для подальшого проектування всіх фабрик огрудкування на території України. Станом на кінець 2020 року загальне (всесвітнє) виробництво окатишів досягло позначки в 500 млн.т. на рік [6].

Основними перевагами в розвитку технології виробництва окатишів на початку ХХ століття стали:

- висока транспортабельність окатишів в порівнянні з агломератом;
- високі металургійні показники якості, а саме: вміст заліза, міцність, рівномірність гранулометричного складу, низький вміст дріб'язку (фракції мінус 5 мм);
- висока продуктивність установок з виробництва окатишів, порівняно з агломераційними машинами при виробництві неофлюсованого агломерату.

Окатиші, як і залізорудний агломерат, поділяються за ступеню офлюсування на наступні групи:

- неофлюсовані окатиші ($CaO/SiO_2 \leq 0,15$);
- частково офлюсовані окатиші ($CaO/SiO_2 \leq 1,0$);
- офлюсовані окатиші ($CaO/SiO_2 \geq 1,0$).

Виробництво окатишів, як правило, здійснюється на фабриках огрудкування, що зазвичай входять в структуру гірничо-збагачувальних підприємств.

Типова технологічна схема виробництва офлюсованих окатишів зображена на рисунку 1.1.

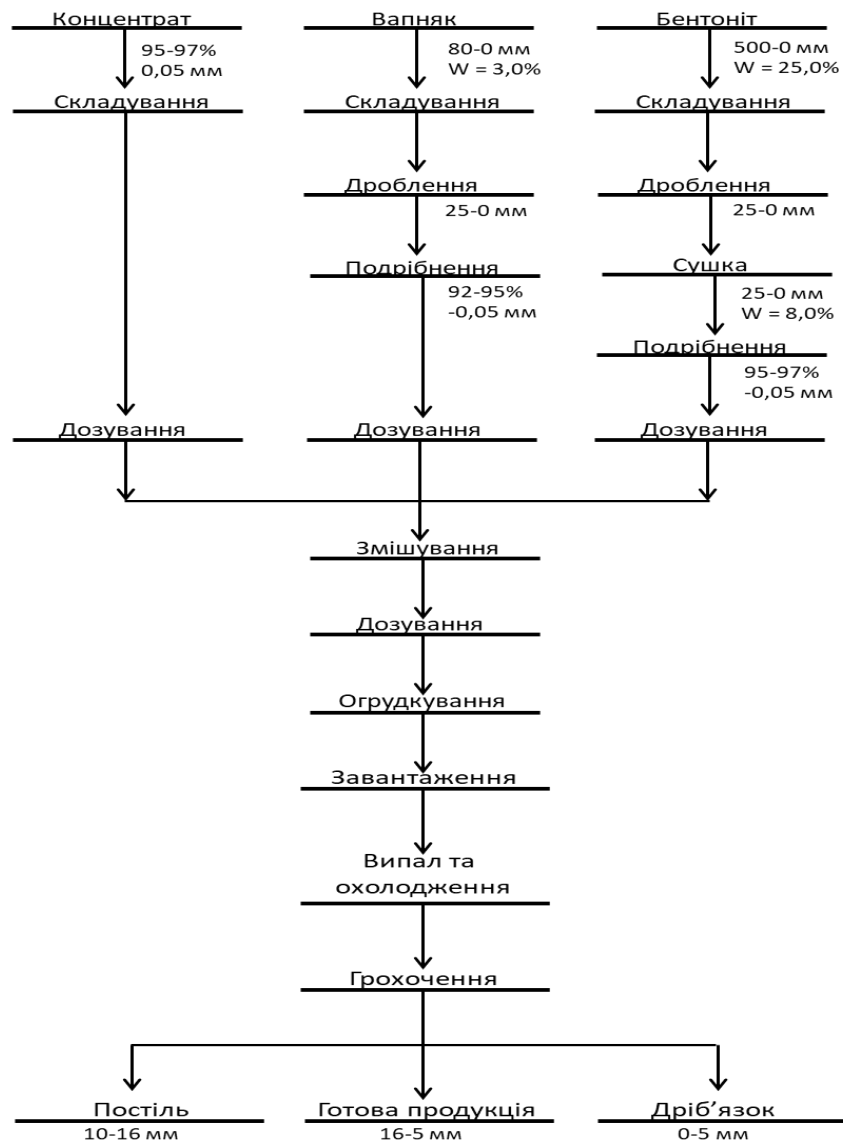


Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва офлюсованих окатишів

Концентрат, що поступає зі збагачувальної фабрики, після усереднення на складі, дозується в шихту з бункерів дозувального відділення. Бентоніт, який виступає в ролі сполучної добавки, після розвантаження з залізничних напіввагонів подається на дільницю дроблення, де подрібнюється до крупності 0 - 25 мм та висушується до вологості 8-10 %, після чого направляється на подрібнення до фракції мінус 0,05 мм. Вапняк, що поступає на фабрику огрудкування, так само подрібнюється до фракції 0-25 мм, після чого здрібнюється до фракції мінус 0,05 мм в об'ємі 92-95 %.

Після дозування, всі компоненти шихти подаються на змішування, де в барабанних огрудкувачах або в тарілчастих грануляторах формуються сирі окатиші, що мають розміри 5-18 мм.

Підготовлені сирі окатиші укладаються на конвеєрну випалювальну машину, де зміцнюються шляхом термічної обробки.

Готові окатиші після випалу направляються на грохочення, де формуються три класи: кондиційні окатиші (+5-16 мм), постіль (+10-16 мм) та зворот (0-5 мм).

Розглядаючи типову технологічну схему виробництва окатишів, можна виділити дві основні самостійні стадії, котрі по суті своїй мають різні закономірності, а саме:

- Отримання сирих окатишів (огрудкування);
- Зміцнення сирих окатишів (випал).

1.1.2 Шихтові матеріали для виробництва окатишів

Шихта для виробництва окатишів складається з трьох основних складових: залізорудна частина, сполучні речовини та флюсуюча добавка (при виробництві офлюсованих окатишів).

До якості вхідних сировинних матеріалів для виробництва окатишів металурги висувають ряд вимог, основні з яких представлені на рисунку 1.2.

	Залізорудна частина	Сполучна речовина	Флюсуюча добавка
Гранулометричний склад	< 0,05 мм (95-97%)	< 0,05 мм (95-97%)	< 0,05 мм (92-95%)
Хімічний склад	Fe, % мас.	Na ₂ O+K ₂ O, % мас.	CaO+MgO, % мас.
Фізико – хімічні властивості	Насипна щільність Теплоємність Температура початку окислення Питома поверхня	Бентонітове число Набухаємість Ефективна в'язкість	Теплоємність Температура початку дисоціації Теплота дисоціації

Рисунок 1.2 – Основні вимоги до властивостей шихтових матеріалів при виробництві окатишів

Зазвичай при виробництві окатишів використовують концентрат із вмістом заліза більше 60,0%. У випадку, коли основним мінералом в концентраті є гематит Fe₂O₃, то максимальний вміст заліза не перевищує 70,0%, якщо магнетит Fe₃O₄, то – 72,0%[7].

Високі вимоги також стосуються і гранулометричного складу залізорудних концентратів, так як розмір частинок концентрату напряму впливає на механічну міцність сирого окатиша і міцність сирих окатишів тим вища, чим більше контактів між його окремими частинками. Бажана вологість залізорудних концентратів знаходиться в межах 8,5 – 10,0%, з інтервалом коливань не більше 0,20 – 0,25%.

Для надання окатишам достатньої міцності у виробництві застосовують різного роду сполучні речовини, основною з яких є бентоніт. Середні витрати бентоніту на одну тону окатишів складає від 2 до 10 кг і залежить від його якості. Бентонітові глини характеризуються високим вмістом оксидів кремнію

та алюмінію і мають здібність диспергувати з утворенням просторових коагуляційних структур, які можуть бути охарактеризовані бентонітовим числом.

При виробництві офлюсованих окатишів в шихту також додають флюсуючі добавки – карбонатні компоненти, такі як вапняк та/або доломіт.

1.1.3 Зміцнення (випал) сирих окатишів

Випал сирих окатишів здійснюється в різних агрегатах, найбільш розповсюдженими з яких є:

- конвеєрні випалювальні машини (близько 55 %) (далі в тексті - КВМ);
- установка «решітка – трубчаста піч – охолоджувач» (близько 40 %);
- шахтні печі (до 5 %).

В Україні фабрики огрудкування Центрального і Північного гірничо-збагачувальних комбінатів спроектовані та оснащені конвеєрними випалювальними машинами різної площі і відповідно продуктивності, а фабрика огрудкування Полтавського ГЗК оснащена чотирма комбінованими установками «конвеєрна решітка – трубчаста піч – кільцевий охолоджувач».

Термічна обробка окатишів на конвеєрній випалювальній машині складається з п'яти послідовних стадій: сушка, підігрів, випал, рекуперація та охолодження. Візуально розташування зазначених зон (зона рекуперації не показана) можна продемонструвати на рисунку 1.3.

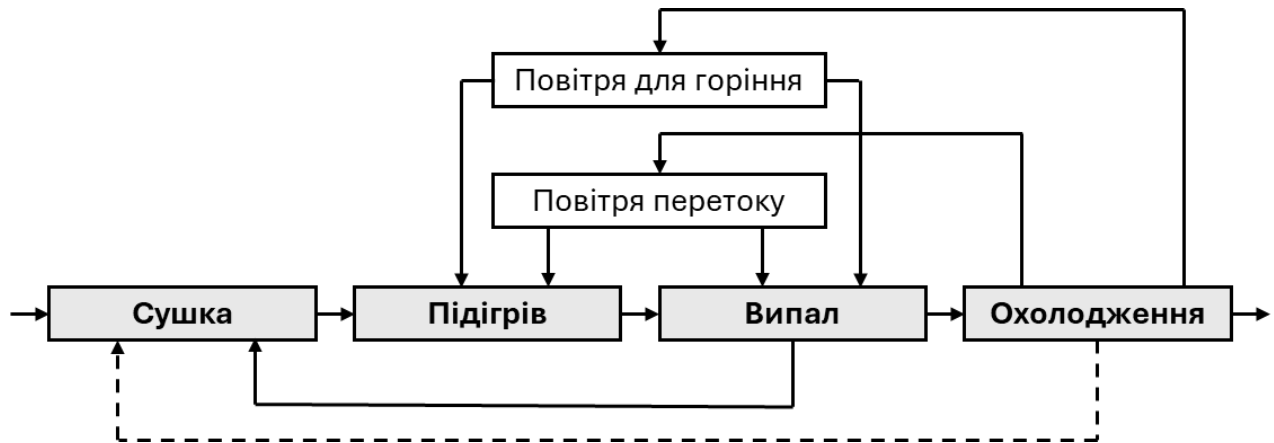


Рисунок 1.3 – Послідовність розташування основних зон термічної обробки окатишів

Розмір (площа) кожної технологічної зони, в загальному вигляді, може бути описана, як частка від загальної площі конвеєрної машини: зона сушки займає до 25 %, зона підігріву 9 – 32 %, зона випалу до 26 %, зона рекуперації 5-7 %, а зона охолодження 24 - 42%.

1.1.4 Загальні вимоги до якості готових окатишів

Разом з більш високим вмістом заліза загального, окатиші також мають більш високі показники міцності, на відміну від агломерату, і це робить їх металургійно та логістично більш привабливою сировиною для подальшого використання. А отже, одним з важливіших металургійних властивостей окатишів є міцність, як технологічна так і транспортна.

Окатиші мають витримувати навантаження без руйнування не менше 2,0-2,5 кН, барабана міцність (вихід фракції мінус 5 мм) має складати не більше 4,0 – 5,0% [8], при цьому міцність на роздавлювання має бути не нижче 150 кг/окатиш, згідно з ISO 4700 [9].

Не менш важливою характеристикою готових окатишів є відновлюваність, яка в порівнянні з агломератом має давати більш високі показники – 0,8 %/хв. і більше.

Узагальнюючи та конкретизуючи вищезазначене, слід сказати, що окатиші високою якості мають володіти наступними характеристиками [10]:

- оптимальний гранулометричний склад: вихід класу +8-16 мм більше 90 % (по стандарту ISO 4701), а вміст класу +0-5 мм – не більше 5,0 %;
- однорідний хімічний склад з високим вмістом заліза;
- низький вміст шкідливих домішок;
- високе значення барабанної проби: міцність на удар (клас плюс 5 мм) не менше 95 % мас.;
- високе значення гарячої міцності: вихід фракції +6,3 мм після відновлення має бути вище за 80 %, а фракції мінус 0,5 мм меншою за 15% [9];
- оптимальне значення відновлюваності – 0,8 %/хв. і більше;
- висока температура розм'якшення та плавлення;
- вузький інтервал розм'якшення;
- низька схильність до злипання [11].

1.2 Техніко – економічні показники різних способів випалу окатишів

В пошуках найбільш універсального, як з точки зору економічної ефективності, так і виробничих параметрів агрегату з випалу окатишів (які були раніше зазначені в розділі 1.1.3) звернемось до інструментів порівняльної методики авторів В.П. Адрєєва, Л.М. Воронкової та Р.Ф. Кузнецова. В основу даної методики покладено показник річної продуктивності різних фабрик

огрудкування, так як різні випалювальні агрегати значно відрізняються за основними техніко - економічними показниками роботи.

Порівняльний аналіз техніко – економічних показників проводився на основі показників роботи закордонних підприємств та фабрики Казахстану (Соколовсько-Сарбайський гірничо-збагачувальний комбінат) і України (Центральний гірничо-збагачувальний комбінат). За базовий варіант прийняті показники Соколовсько-Сарбайського гірничо-збагачувального комбінату, нині Соколовсько - Сарбайске гірничо-збагачувальне виробниче об'єднання [12].

Вихідні дані для порівняльного аналізу техніко – економічних показників представлені в таблиці 1.

Розрахунок кількості випалювальних агрегатів для порівняльного аналізу виконувався за наступною формулою:

$$N = \frac{Q}{F \cdot g \cdot T} \quad (1)$$

де Q – продуктивність фабрики, т/рік;

F – робоча площа (об'єм) випалювального агрегату, кв.м (куб.м);

g – питома продуктивність агрегату, т/(кв. м.*добу);

T – кількість робочих днів на рік.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для техніко – економічного аналізу фабрик огрудкування з різними агрегатами для випалювання окатишів з умовно прийнятою продуктивністю 8,4 млн. т./рік

Найменування показника	Од. вим.	Конвеєрні машини ВК-108	Установка «колосникова решітка – трубчаста піч» (94 кв.м/ 530 куб.м.)	Шахтні печі (95 куб.м.)
Питома продуктивність агрегату	т/ (кв.м·добу)	22,30	31,00/5,30	10,56
Кількість агрегатів	шт.	11	9	26
Витрати палива	куб.м/т	21,2	20,0	17,4
Витрати електричної енергії	кВт·год/т	30,0	32,0	20,0
Обслуговуючий персонал	1 агрегат	17	20	3

Витрати шихтових матеріалів (концентрату, вапняку та бентоніту) приймалися однаковими. У варіанті с шахтними печами в шихту додатково дозувався коксик в кількості 10 кг на тону концентрату.

Витрати тепла для кожного з описаних варіантів приймалися по мінімальним значенням, що були досягнуті на фабриках огрудкування різних країн світу, це ж стосується витрат електричної енергії у варіантах конвеєрних машин та шахтних печей, а в варіанті агрегату «колосникова решітка – трубчаста піч», витрати електричної енергії приблизно прирівняні до показників конвеєрних випалювальних машин.

З наведених в таблиці 1.1 даних видно, що найкращі показники з енергетичних витрат мають шахтні печі, при умовно невисокій продуктивності.

Капітальні інвестиції за всіма варіантами були розраховані на основі проектних даних інституту «Механобр» та фактичних витрат на будівництво фабрик огрудкування ССГЗВО та ЦГЗК.

Порівняльний економічний аналіз показників представлено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Техніко – економічні показники фабрик огрудкування при різних способах випалу

Найменування показника	Од. вим.	Конвеєрні машини	Установка «колосникова решітка – трубчата піч»	Шахтні печі
Річна продуктивність	млн.т.	8,4	8,4	8,4
Кількість випалювальних агрегатів	шт.	11,0	9,0	26,0
Ефективність персоналу: на одного працюючого на одного робітника	т/рік	5975 12445	6042 12591	6260 13043
Питомі капітальні витрати	у.о./т	8,50	8,00	7,07
Собівартість продукції	у.о./т	9,57	9,44	9,02

Собівартість при випалі окатишів в шахтних печах на 6 % нижче, ніж на конвеєрних машинах і на 4,5 % нижче, ніж на комбінованих агрегатах «колосникова решітка – трубчата піч».

Найбільша продуктивність труда робітників досягається на шахтних печах 13,0 тис.т./рік, що на 10,5 % вище, ніж на конвеєрних машинах та агрегатах «колосникова решітка – трубчаста піч».

Для більш детального аналізу виробничих витрат різних способів випалу окатишів були виконані розрахунки зведених витрат, які наглядно характеризують ефективність випалу окатишів. Дані отримані при розрахунках представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Розрахункові витрати по фабрикам огрудкування при різних способах випалу окатишів, млн. у. о.

Найменування показника	Конвеєрні машини	Установка «колосникова решітка – трубчата піч»	Шахтні печі
Експлуатаційні витрати	80,4	79,3	75,8
в.т.ч. на випал окатишів	15,0	13,9	9,4
Капітальні витрати	71,1	67,0	59,5
в.т.ч. на випал окатишів	43,7	39,6	32,0
Зведені витрати*	91,1	89,4	84,7
в.т.ч. на випал окатишів	21,6	19,8	14,2

* - нормативний коефіцієнт порівняльної ефективності капітальних витрат прийнятий на рівні 0,15

Як видно з даних таблиці 1.3, найкращі, з точки зору мінімального значення, зведені витрати отримані при випалі окатишів в шахтних печах. Інакше кажучи, використання шахтних печей при випалі окатишів в масштабі фабрики огрудкування з річною продуктивністю 8,4 млн.т. в порівнянні з фабрикою, що використовує конвеєрні випалювальні машини дозволяє зменшити капітальні витрати на 11,7 млн. у.о. та зменшити експлуатаційні витрати на 4,6 млн. у.о. на рік.

Таблиця 1.4 – Основні виробничі показники випалу окатишів

Найменування показника	Конвеєрна машина		Комбінована установка	Шахтна піч
	без постілі	з постіллю		

Найменування показника	Конвеєрна машина		Комбінована установка	Шахтна піч
	без постілі	з постіллю		
Витрати на устаткування, дол./т. рік)	8,00	8,25	8,80	7,70
Витрати тепла, МДж/т. на випал окатишів:				
концентрат магнетитовий	735-840	-	735	336-840
концентрат гематитовий	1050	-	1050	840-1470
Витрати електричної енергії, кВт·год/т.	25,0	-	20,0	30,0
Експлуатаційні витрати, дол./т.: в.т.ч.:	1,529	1,630	1,511	1,496
адміністративні витрати	0,066	0,066	0,066	0,066
прямі трудові витрати	0,148	0,158	0,180	0,180
витрати на ремонт	0,190	0,201	0,190	0,190
матеріальні витрати (ремонт)	0,270	0,290	0,270	0,270
бентоніт	0,225	0,225	0,225	0,225
паливо	0,300	0,320	0,300	0,225
енергія	0,250	0,290	0,200	0,260
інші витрати	0,080	0,080	0,080	0,080

За виробничими даними шведської компанії LКАВ (Кіруна, Швеція) [13], капітальні витрати на будівництво фабрик, що використовують агрегат «колосникова решітка – трубчатая піч» - найвищі, конвеєрні випалювальні машини на 10% нижче, а шатні печі – на 1 8% нижче. Найнижче значення витрат електричної енергії мають агрегати «колосникова решітка – трубчатая піч». Дані шведських промислових об'єктів, які містяться в таблиці 1.4, відносно промислових витрат, витрат палива, кількості обслуговуючого персоналу, в основному корелюються з даними ВНДІМТ, які були представлені на IX Міжнародному Конгресі зі збагачення корисних копалин, що відбувся в Празі в 1970 році.

Таблиця 1.5 – Основні показники роботи шведських агрегатів для випалу окатишів

Найменування показника	Од. вим.	Конвеєрні машини	Установка «решітка – піч - охолоджувач»	Шахтні печі
Виробничі показники				
Продуктивність	млн.т./рік	1,73	0,60	0,38
Робочий час	год/рік	6409	2586	6280
Робочий час	год/т	0,11	0,19	0,10
Витрати рідкого палива	л/т	20	20	19
Витрати електроенергії	кВт·год/т	27	22	30
Витрати бентоніту	кг/т	7	9	8
Якісні показники:				
вміст Fe	%	64,7	64,6	66,0
вміст SiO ₂	%	4,3	4,6	3,0
міцність	кг/окатиш	240	300	300
вихід фр.+0,6мм	%	94	98	95
пористість	%	28	25	24
відновлюваність	% O ₂ /хв.	0,55	0,45	0,28
набухання	%	14,5	20	26

З даних таблиці 1.5 видно, що при порівняно однакових значеннях якісних та виробничих показниках різних агрегатів з випалу окатишів, продуктивність конвеєрних випалювальних машин на 1,13 млн. т./рік вище за установку «Колосникова решітка – трубчаста піч кільцевий охолоджувач» та на 1,35 млн.т./рік ніж шахтна піч.

Країни соціалістичного табору в часи свого активного промислового розвитку, при наявності умовно необмежених ресурсів, робили ставку здебільшого на продуктивність агрегатів з випалу окатишів, саме тому в нашій країні найбільшої популярності здобули саме конвеєрні випалювальні машини

не дивлячись на більш ефективну роботу шахтних печей, які в наш час здобули «друге дихання» у вигляді агрегатів прямого відновлення заліза (MIDREX та Energiron) і стали основою зеленої металургії.

Повертаючись до конвеєрних випалювальних машин, виконаємо порівняльний аналіз їх енергоефективності в залежності від робочої площі агрегату.

Таблиця 1.6 – Параметри енергоефективності випалювальних конвеєрних машин [14]

Найменування параметру	Тип конвеєрної випалювальної машини				
	ВК-108	ВК-228	ВК-306	ВК-520	ВК-592
Робоча площа, кв.м.	108	228	306	520	592
Висота шару окатишів, мм	300	330	320	430	450
Питома продуктивність, т/кв.м·год.	0,875	0,855	0,976/ 0,850	1,290/ 1,150	1,066
Питомі витрати газу, куб.м/т	14,50	14,50	11,84/ 13,85	9,52/ 13,78	10,00
Питомі витрати електроенергії, кВт·год./т	32,4	29,0	39,95/ 47,8	34,98/ 38,84	36,0
Питомі витрати води, куб.м/т.	1,3	1,2	1,1	1,2	1,0
Час термічної обробки, хв	39,5	42,5	35,2	35,3	38,0

* - в чисельнику – при виробництві неофлюсованих окатишів; в знаменнику – при виробництві офлюсованих окатишів.

За даними таблиці 1.6 видно, що зі збільшенням корисної площі випалювальної машини збільшується її питома продуктивність при зменшенні енергетичних витрат. Залежність енергетичних витрат від типу конвеєрної випалювальної машини (за даними таблиці 1.6) ілюструє рисунок 1.4.

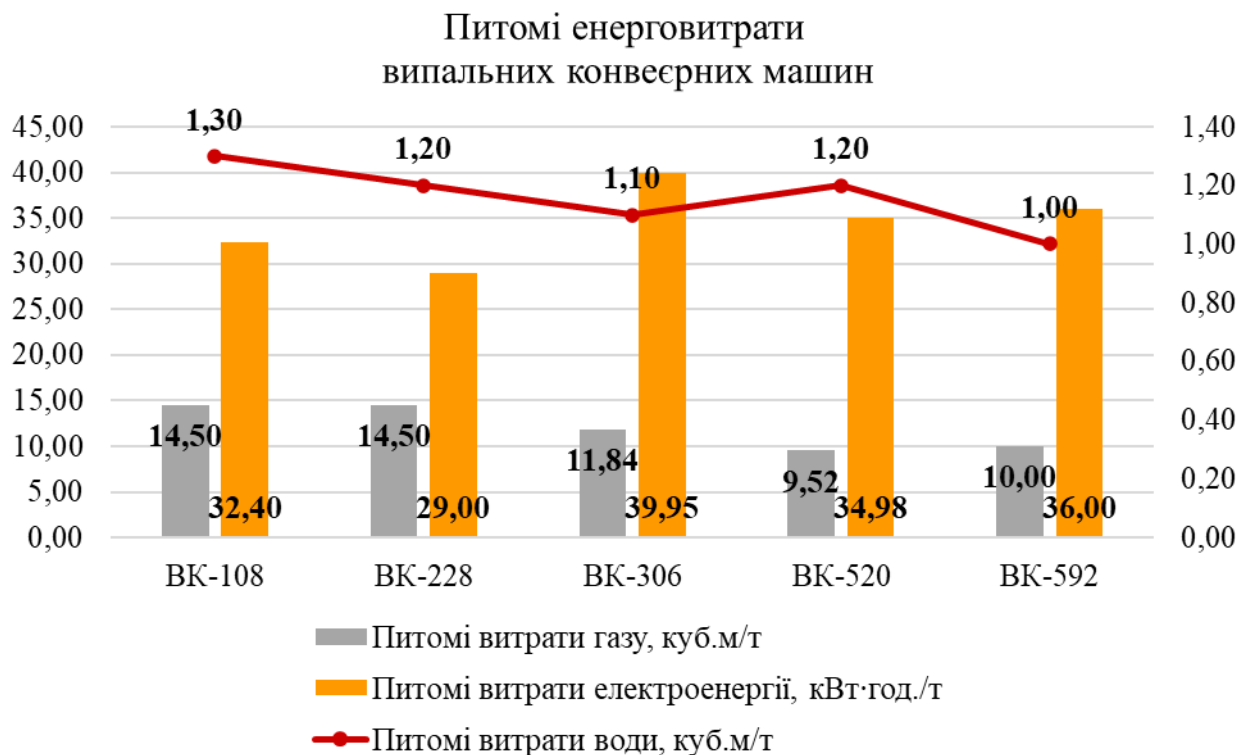


Рисунок 1.4 – Питомі витрати енергетичних ресурсів випалювальних конвеєрних машин

З графіка, що зображено на рисунку 1.4 видно, що збільшення площі конвеєрних випалювальних машин, призводить до незначного збільшення питомих витрат електричної енергії та незначного зменшення питомих витрат природного газу. Основною причиною може бути більш сучасна система газоходів, яка збільшує витрати електричної енергії (за рахунок встановлення додаткових димососів) при зменшенні витрат теплової енергії (за рахунок рециркуляції газів та більш повного використання тепла).

1.3 Споживання енергетичних ресурсів при виробництві окатишів

Виробництво залізорудних окатишів, як і більшість металургійних переділів, супроводжується високотемпературними процесами, які

використовують велику кількість енергетичних ресурсів: теплової та електричної енергії, а також технічної води.

Показники енергетичного споживання найкращих європейських виробників залізорудних окатишів представлений в таблиці 1.7 [15].

Таблиця 1.7 – Повний матеріально-енергетичний баланс при виробництві окатишів

Вхідний потік		Вихідний потік	
Концентрат, кг/т	935 – 965	Окатиші, кг/т	1000
Бентоніт, кг/т	4,1 – 6,8		
Олівіни, кг/т (1)	0 – 27,6	Трубні гази, нкуб.м/т	1940-2400
Вапняк, кг/т	0 – 5,0	Пил, г/т	14-150
Доломіт, кг/т (2)	0 – 13,5	Пил мг/нкуб.м	7-70
Природний газ, МДж/т	14		
Коксовий/доменний газ, МДж/т (3)	306		
Коксовий дріб'язок, МДж/т (3)	342		
Вугілля, МДж/т (4)	223		
Нафта, МДж/т (4)	43-186		
Електрична енергія, МДж/т	54-99		
Вода технічна, куб.м/т	0,11-1,25		
Стиснене повітря, н. куб.м/т	6,2-12,8		

Коментарі: зазначені в таблиці дані охоплюють 63% виробничих потужностей, що розміщені в Європейському союзі.

1 – при виробництві окатишів для доменної плавки; 2 – при виробництві окатишів прямого відновлення; 3 – для підприємств з повним металургійним циклом; 4 – при виробництві окатишів на автономній установці (Швеція);

З досвіду роботи фабрик огрудкування пострадянських країн маємо наступні показники енергетичних витрат при виробництві окатишів:

▪ витрати електричної енергії, кВт*год/т	32,5 – 48,5
▪ витрати природного газу, кг.у.п./т	10,1 – 20,0
▪ витрати технічної води, куб.м./т	0,2 – 2,4

Порівняння даних про витрати енергетичних ресурсів при виробництві окатишів європейських країн (таблиця 1.7) та країн СНД не представляється можливим, так як при розрахунках середніх значень показників в країнах ЄС використовувалися всі типи установок з випалу окатишів, тоді як дані по країнам СНД формувалися на основі роботи конвеєрних випалювальних машин.

Теплова енергія

Основні витрати теплової енергії відбувається на етапі випалу та сушки окатишів, а також на стадії сушки при подрібненні шихтових матеріалів, а саме: флюсуючих та сполучних компонентів шихти.

З метою деталізації і подальшої візуалізації теплового балансу процесу випалу сирих окатишів, звернемося до ретроспективних експериментальних даних, які були отримані на конвеєрній випалювальній машині ВК-108 фабрики огрудкування Соколовсько - Сарбайського гірничо-збагачувального комбінату (Казахстан).

Розташування технологічних зон на випалювальній машини виглядало наступним чином: зона сушки – 18,6%, зона підігріву – 11,1%, зона випалу (дві секції) – 22,2%, зона рекуперація – 14,8% та зона охолодження – 32,3%.

Сирі окатиші, що подавалися на конвеєрну машину, мали наступні характеристики:

Гранулометричний склад сирих окатишів:

Вміст (%) фракції, мм				
+16	-16+14	-14+12	-12+10	-10+0
2,4	41,4	46,6	8,8	0,8

Вологість сирих окатишів – 8,80 %;

Міцність – 1,26 кг/окатиш;

Кількість скидань без руйнування з висоти 300 мм – 15;

Вміст, %:

Fe 62,8;

FeO 25,3;

S 0,20;

Основність 1,15 част.од. основності.

Продуктивність випалювальної конвеєрної машини склала 82,0 т/год.;

Питомі витрати тепла становили 1215 МДж/т. або 290 тис. ккал./т;

В результаті проведених досліджень було виявлено, що 95% вологи сирих окатишів видаляється в зоні сушки, окислення магнетиту та видалення сірки починається на початку зони підігріву, а основний розвиток цих процесів відбувається в зоні випалу, саме тому теплотехнічні параметри термічної обробки в цих зонах має першочерговий вплив на показники якості готових окатишів.

За результатами дослідів був складений тепловий баланс процесу термічної обробки окатишів. Загальний вигляд теплового балансу представлений на рисунку 1.5.

З наявних даних вбачається, що витрати тепла на дисоціацію вапна складають 3,6 % від загальних витрат тепла на випал окатишів та 7,3 % від витрат тепла палива. В даному випадку ці витрати тепла повністю компенсуються за рахунок тепла окислення магнетиту.

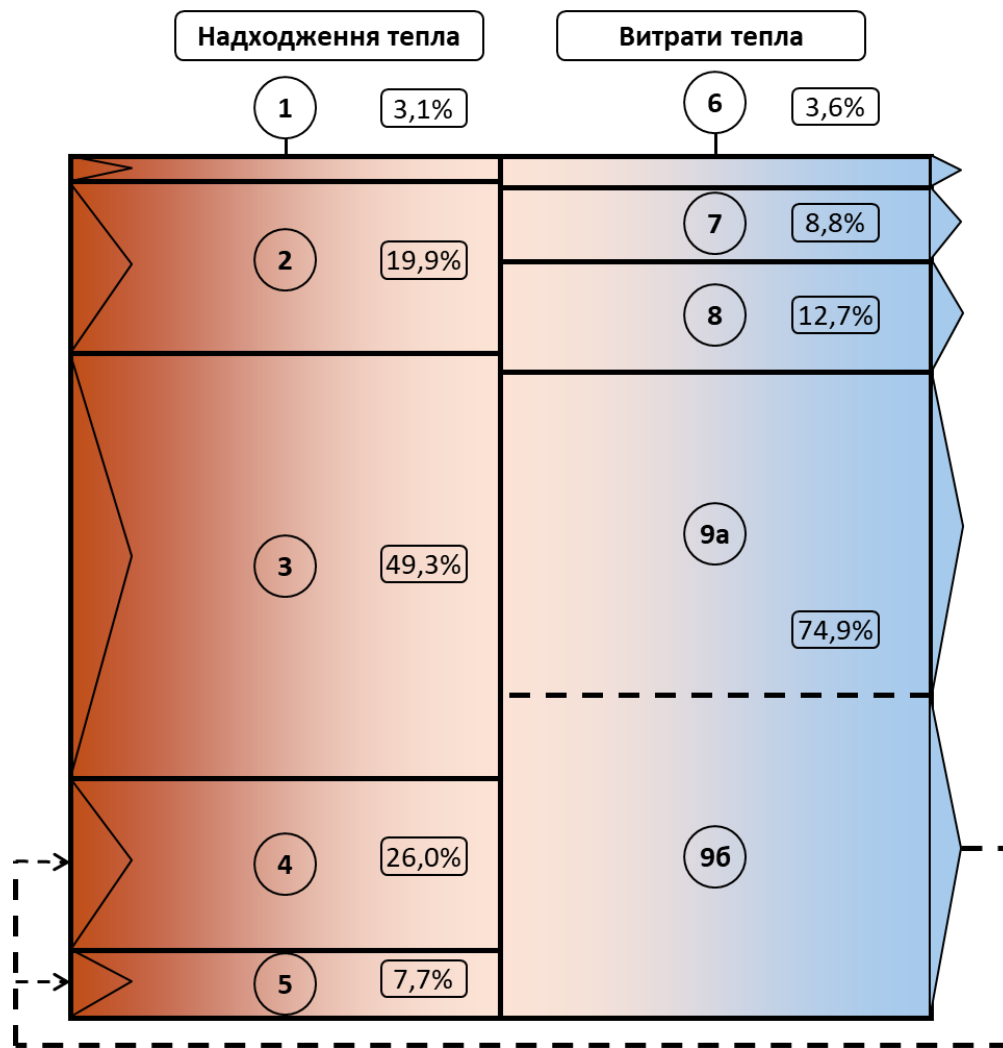


Рисунок 1.5 – Тепловий баланс випалу окатишів на конвеєрній машині ВК-108

Надходження тепла: 1 – тепло, що надходить з сирими окатишами та повітрям на охолодження; 2 – тепло окислення магнетиту; 3 – тепло горіння природного газу; 4 – тепло теплоносія з зони сушки; 5 – тепло, що надходить з повітрям для горіння природного газу.

Витрати тепла: 6 – тепло на дисоціацію вапняку; 7 – тепло на випаровування води; 8 – втрати тепла з готовими окатишами; 9 – тепло відхідних газів, 9а – трубних газів; 9б – тепло рециркуляційних газів.

З рисунку 1.5 видно, що з повної ентальпії трубних газів, що складає 74,9% від загальних витрат тепла, повторно використовуються 26,0%. Збільшення відсотку рециркуляційного тепла з використанням принципу прямого перетоку дозволяє зменшити витрати палива приблизно на 20 – 25%.

Електрична енергія

Основні витрати електричної енергії при виробництві окатишів витрачаються на роботу обладнання з подрібнення, змішування, транспортування, згрудкування та іншого устаткування при підготовці шихти, приводів конвеєрів випалювальних машин, грохотів і димососів.

Витрати електричної енергії складають велику частку в собівартості виробництва окатишів і можуть досягати 25 – 30% від загальної собівартості готових окатишів [16].

Витрати електричної енергії при виробництві окатишів залежать від наступних факторів:

- технологічна схема виробництва окатишів;
- технічні характеристики технологічного устаткування;
- витрати твердого палива;
- тип та конструкція випалювального агрегату;
- інше

З огляду на зазначені фактори, варто спробувати конкретизувати питомі витрати електричної енергії на різних етапах технологічного процесу виробництва окатишів [17,18]. В таблиці 1.8 наведено основні показники питомого споживання електричної енергії, які пов'язані з різними етапами та технологічними операціями процесу виробництва окатишів.

Таблиця 1.8 – Типові питомі витрати електричної енергії при виробництві окатишів

Найменування технологічної операції	Питомі витрати, кВт*год/т	Коментарі
Змішування	1 – 2	залежить від технічних параметрів змішувача
Огрудкування	2 – 3	Залежить від циркуляційного навантаження
Випал окатишів: 1. Устаткування випалювального агрегату; 2. Димососи конвеєрної машини; 3. Димососи трубчастої печі	0,5 – 1,0 17 – 23 10 – 15	В основному залежить від виду окатишів, використання твердого палива, керування потоками повітря/газів та ін.
Газоочищення	2 – 4	В залежності від технічних даних обладнання
Допоміжне устаткування	5 – 7	В залежності від технічних даних обладнання

Дані таблиці 1.8 підтверджують зазначений раніше факт, що витрати електричної енергії в основному залежать від схеми ланцюга апаратів, технічних характеристик обладнання, а також від вихідних характеристик сировини та технологічної карти виробництва окатишів. Тому дуже важливо на етапі проектування фабрик огрудкування проводити концептуальні дослідження, щоб мінімізувати споживання електричної енергії на промисловому майданчику. Більш детальніше про концептуальні дослідження та шляхи оптимізації витрат електричної енергії для вже побудованих фабрик огрудкування, мова піде в розділі 2.

Дані з діючих європейських заводів [17,18] свідчать, що загальне споживання електричної енергії коливається в діапазоні від 45 до 65 кВт*год/т

окатишів для фабрик у складі гірничо-збагачувальних підприємств (включно з виробництвом концентрату) та від 25 до 40 кВт*год./т окатишів для фабрик огрудкування.

Технічна вода

Технічна вода відіграє одну з ключових ролей в процесі виробництва окатишів, так як формування сирих окатишів фізично не можливе без її використання. За даними авторів [19], вологість шихти напряду впливає на міцність сирих окатишів. Варто зазначити, що весь об'єм води, який поступає в технологічний процес, для утворення сирих окатишів в моменті їх випалу повністю видаляється.

Технічна вода також має важливе значення в процесах охолодження технологічного устаткування, боротьбі з викидами твердих частинок в оточуюче середовище, тощо.

1.4 Висновки за розділом 1 та постановка задач

1. Сучасна українська металургія переживає найглибшу кризу за всю новітню історію України. Виробництво сталі скоротилося з більш ніж 50 млн. т./рік на початку 1990-х років до 7,6 млн. т./рік станом на 2024 рік.

2. В експортній структурі залізорудної сировини України окатиші є найбільш дорогим сегментом і складають від 25 до 35 % всього об'єму.

3. Найбільш розповсюдженими агрегатами з випалу окатишів є: конвеєрні випалювальні машини (близько 55 %), установка «решітка – трубчаста піч – охолоджувач» (близько 40 %) та шахтні печі (до 5 %).

4. При порівняно однакових значеннях якісних та виробничих показників різних агрегатів з випалу окатишів, продуктивність конвеєрних випалювальних машин вище за установку «колосникова решітка – трубчаста піч» та шахтні печі.

5. В 60-х – 80-х роках минулого століття в нашій країні, при наявності умовно необмежених ресурсів, робили ставку здебільшого на продуктивність агрегатів з випалу окатишів, саме тому в цей період найбільшої популярності здобули саме конвеєрні випалювальні машини.

6. Повна ентальпія трубних газів складає 74,9 % від загальних витрат тепла, з повторним використанням лише 26,0 % (досвід роботи ССГВО). Збільшення відсотку рециркуляції тепла з використанням принципу прямого перетоку дозволяє зменшити витрати палива приблизно на 20 – 25 %.

7. Витрати електричної енергії в основному залежать від схеми ланцюга апаратів, технічних характеристик обладнання, а також від вихідних характеристик сировини та технологічної карти виробництва окатишів.

8. Збільшення площі конвеєрних випалювальних машин, призводить до незначного збільшення питомих витрат електричної енергії та незначного зменшення питомих витрат природного газу. Основною причиною може бути більш сучасна система газоходів, яка збільшує витрати електричної енергії (за рахунок встановлення додаткових димососів) при зменшенні витрат теплової енергії (за рахунок рециркуляції газів та більш повного використання тепла).

9. Аналіз виробничих витрат ВАТ «Центральний ГЗК» свідчить, що найвища вартість технологічного циклу складає виробництво окатишів 41,2 грн/т, в той час як вартість виробництва концентрату складає 27,7 грн/т видобутку руди – 8,6 грн/т., а її подрібнення – 2,0 грн/т.

Основними задачами подальшого дослідження процесу виробництва залізорудних окатишів в напрямку економії енергетичних ресурсів є:

1. Аналіз собівартості виробництва окатишів на конвеєрних випалювальних машинах з метою виявлення основних статей для оптимізації витрат з подальшим реінвестуванням в заходи по зниженню енергетичних витрат;

2. Побудова математичної моделі для скорочення часу розробки процесів та устаткування, оптимізації конструктивних і режимних параметрів та забезпечення високих техніко-економічних показники процесу виробництва окатишів;

3. Огляд найкращих проектних рішень по оптимізації енергетичних витрат при виробництві окатишів;

4. Огляд заходів та методів оптимізації витрат теплової енергії в процесі виробництва окатишів;

5. Огляд заходів та методів оптимізації витрат електричної енергії в процесі виробництва окатишів;

6. Надання рекомендацій щодо зниження витрат енергетичних ресурсів при виробництві окатишів для підприємств Кривого Рогу – Центрального ГЗК та Північного ГЗК.

РОЗДІЛ 2. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Вплив енергетичних витрат на собівартість готових окатишів «Центрального ГЗК»

Фінансові здобутки гірничо-збагачувальних підприємств (ГЗК) вельми обмежені, перш за все, за рахунок монотоварності виробництва та інерційності впровадження технологій. Основна частка прибутку ГЗК формується за рахунок об'єму реалізації, інші джерела отримання прибутку – незначні [20].

Зараз в умовах жорсткої ринкової конкуренції, економічним механізмом керування рівнем прибутку є мінімізація витрат на виробництві шляхом встановлення граничних значень витрат на основі співставлення валового прибутку з валовими витратами [21].

З метою зниження витрат виконують їх системний аналіз та розробляють і впроваджують заходи по зниженню витрат. Специфіка виробництва на гірничо – збагачувальному підприємстві формує необхідність впроваджувати калькуляцію собівартості готової продукції на кожному етапі технологічного процесу. Облік витрат на виробництві виконується по наступному ланцюгу: видобуток руди, її подрібнення, збагачення та огрудкування. Аналіз структури наскрізних витрат готової продукції дозволяє розробляти та впроваджувати конкретні (адресні) технічні рішення та організаційні заходи, які направлені на зниження собівартості продукції, а також дати характеристику основної продукції підприємства з точки зору трудових, енергетичних витрат та витрат на утримання основних фондів та їх відновлюваність.

З основних переділів ГЗК найбільші витрати електричної енергії мають процеси збагачення (15,2 грн/т) та огрудкування (13,2 грн/т) і також ці процеси мають найбільші витрати (близько 7,0 грн/т) на ремонт та утримання основних фондів. На амортизацію основних фондів витрачаються незначні кошти (збагачення 0,6 грн/т, видобуток руди 0,42 грн/т), також невеликі затрати (біля 2,0 грн/т) пов'язані з оплатою труда на стадіях збагачення та огрудкування, при цьому на стадії видобутку руди затрати підвищуються до 4 грн/т. Відповідно, слід знижувати перш за все енергетичні витрати на процеси збагачення та огрудкування.

Автоматизована система контролю та керування використання енергетичних ресурсів, яка впроваджена на Центральному ГЗК та працює в режимі контролю та аналізу витрат електричної енергії, передбачає оплату використаної електричної енергії за однією ставкою тарифу з диференціюванням за зонами доби, а саме: в нічний час – 0,008, час полупікового навантаження – 0,036, пікове – 0,068 дол. США за 1 кВт*год. [!!!]. Розроблено графік споживання електричної енергії, згідно з яким добове споживання електричної енергії в середньому складає: в нічний час – 30 % (695 тис. кВт*год), полупікове – 50 % (1140 тис. кВт*год) і пікове – 20 % (455 тис. кВт*год). В середньому підприємство Центральний ГЗК витрачає на оплату електричної енергії за двохтарифною системою біля 2 480 тис. дол США на місяць, а по графіку, що впроваджено, розрахункова вартість електричної енергії складає 2 326 тис. дол. США.

Структура собівартості залізородних окатишів Центрального ГЗК зображено на рисунку 2.1 [22].

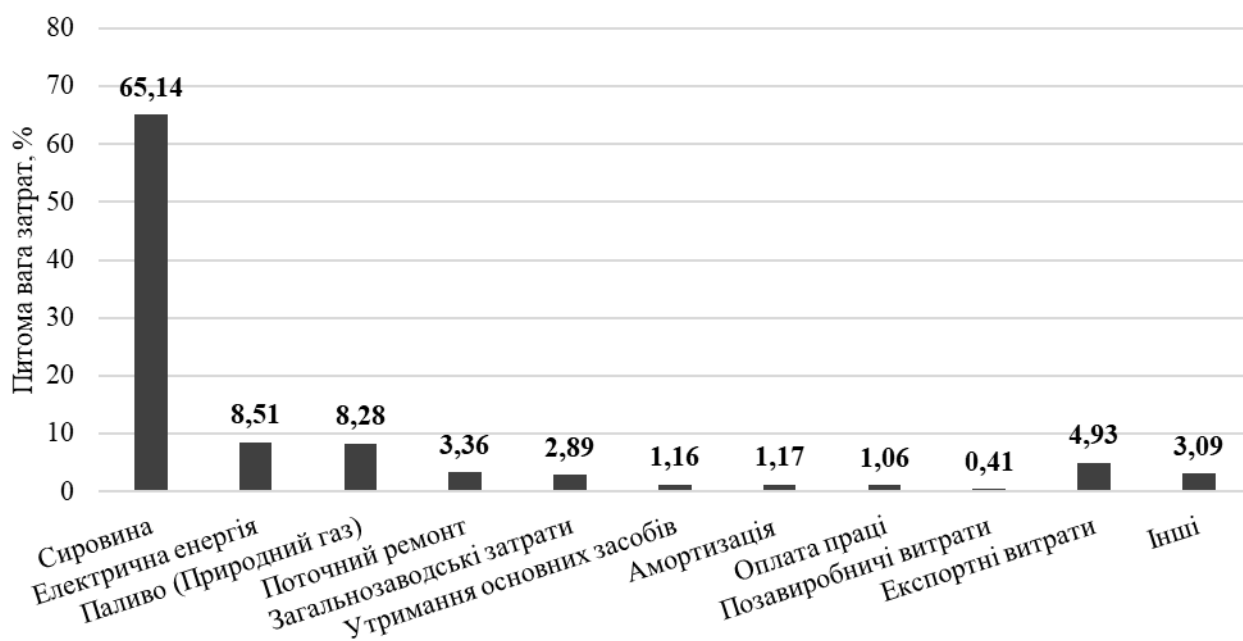


Рисунок 2.1 – Структура собівартості залізрудних окатишів Центрального ГЗК

Як видно з рисунку 2.1 найбільшу вагу в структурі собівартості залізрудних окатишів має стаття «Сировина» - 65,14 % та енергетичні витрати (електрична енергія, паливо, природний газ) – 16,79 %.

Впливаючи на ці дві статті собівартості через заходи оптимізації технологічного процесу можна отримати найкращий (вагоміший) економічний ефект і тим самим вплинути на загальний прибуток підприємства.

У витрати на виробництво окатишів входять затрати на вапняк та бентоніт в розмірі 7,0 % від загальних витрат за статтею «Сировина». Аналіз структури собівартості залізрудних окатишів при різних об'ємах виробництва (1500 і 2500 тис. т/р.) показав, що «ефект масштабності» у виробництві окатишів має значний вплив, тобто при зростанні виробництва на 1000 тис. т./р собівартість зменшується на 20 %.

Витрати по кожній стадії переділу в графічному вигляді зображено на рисунку 2.2.

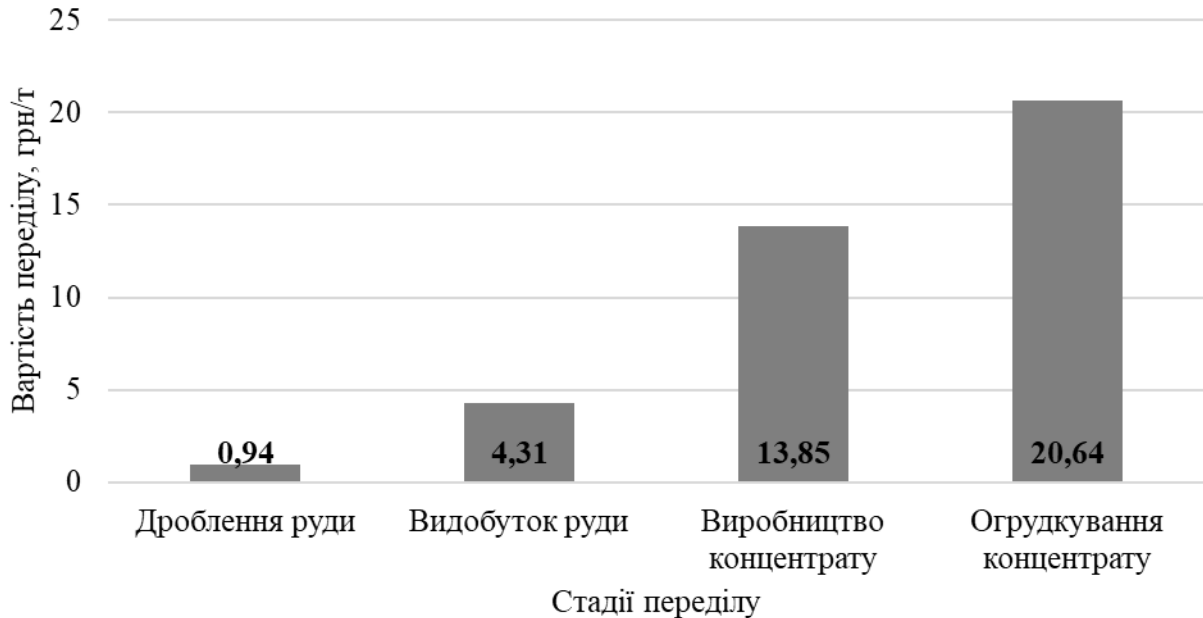


Рисунок 2.2 – Витрати по переділу на гірничо – збагачувальному підприємстві (дані ЦГЗК)

За статтею «Паливо» в собівартості концентрату основні затрати приходяться на дизельне пальне – 79,4 % та газ природний – 17,7 %, в собівартості окатишів затрати на газ природний приходиться 62,3 %, дизельне паливо – 2,0 %. Дані аналізу затрат фабрики огрудкування Центрального ГЗК свідчать, що матеріальні затрати слід знижувати перш за все за рахунок оптимізації норм витрат електричної енергії, природного газу, експортних витрат та витрат на поточні ремонти.

2.2 Математична модель процесу випалу окатишів, як основа для оптимізації енергетичних витрат

Технічний прорив, що відбувся в галузі комп'ютерних наук дав інженерам, в тому числі інженерам – металургам інструменти, які змістили фокус з емпіричних методів досліджень в бік концептуальних досліджень – розробки нових моделей, частина яких побудована на основі математичних моделей.

Використання надійних математичних моделей дозволяє значно скоротити час розробки процесів та устаткування, оптимізувати конструктивні і режимні параметри та забезпечити високі техніко – економічні показники. Разом з тим, в області автоматизації без надійного математичного моделювання неможливо вирішення таких питань, як супутні виміри параметрів технологічного процесу, їх прогнозування та оптимізацію по різних критеріям з відповідними цілями та обмеженнями.

Використання методів математичного програмування дозволяє прогнозувати основні показники технологічного процесу термічної обробки (випалу) окатишів на конвеєрних машинах, які впливають на економічну ефективність всього процесу виробництва окатишів:

- питома продуктивність агрегату ($G_{\text{пит.}}$);
- питомі витрати тепла ($Q_{\text{пит.}}$);
- питомі витрати палива ($V_{\text{п.пит.}}$);
- питомі витрати електричної енергії ($E_{\text{пит.}}$);
- показники металургійних властивостей товарних окатишів.

Всі ці показники залежать від конструктивних параметрів конвеєрної випалювальної машини та технологічних режимів ведення процесу випалу окатишів:

- тиску (розрядження) в газоповітряних камерах (P_j);
- розподілу тиску (розрядження) в газоповітряних камерах;

- температури теплоносія (охолоджуючого агенту) на вході в шар окатишів (t_{rj});
- розподілу температури теплоносія на вході в шар по довжині зон;
- температури повітря;
- коефіцієнта витрати повітря (α);
- висоти шару окатишів ($H_{ш.}$) та постілі;
- діаметру окатишів шару ($d_{ш.}$) та постілі;
- пористості шару окатишів ($\epsilon_{ш.}$) та постілі;
- розподілу площі випалювальної машини по технологічним зонам;
- наявності або відсутності циркуляційного теплоносія в технологічних зонах;
- наявності або відсутності переточного колектору і системи селективного відбору нагрітого повітря від зони охолодження.

Математична модель процесу термообробки залізорудних окатишів на конвеєрних випалювальних машинах з використанням зазначених параметрів дозволяє досліджувати закономірності технологічного процесу в широкому діапазоні, що недоступно на реальних конвеєрних машинах. В свою чергу, знання реальних закономірностей, дозволяє оцінити вплив різних технологічних параметрів процесу і на їх основі побудувати алгоритми оптимізації технологічних режимів, а також розрахувати оптимальні конструктивні параметри (співвідношення площ технологічних зон, напрям потоків теплоносія, тощо) [23-25].

Математичні моделі оптимізації параметрів описані в загальному вигляді.

Загальний критерій оптимізації – максимум економічного ефекту, можна записати в наступному вигляді:

$$E = E_{\text{прод.}} + E_{\text{пал.}} + E_{\text{е/е}} \rightarrow \max \quad (2.2)$$

де: $E_{\text{прод.}}$, $E_{\text{пал.}}$, $E_{\text{е/е}}$ – складові економічного ефекту, який отримується за рахунок збільшення продуктивності, зменшення витрат палива та електричної енергії, відповідно.

Детальний розгляд критерію оптимізації і аналіз технології показують (див. рисунок 2.3), що величина економічного ефекту визначається:

1. Основними конструктивними елементами;
2. Параметрами термообробки шару окатишів;
3. Технічним виконанням елементів теплотехнічних схем.

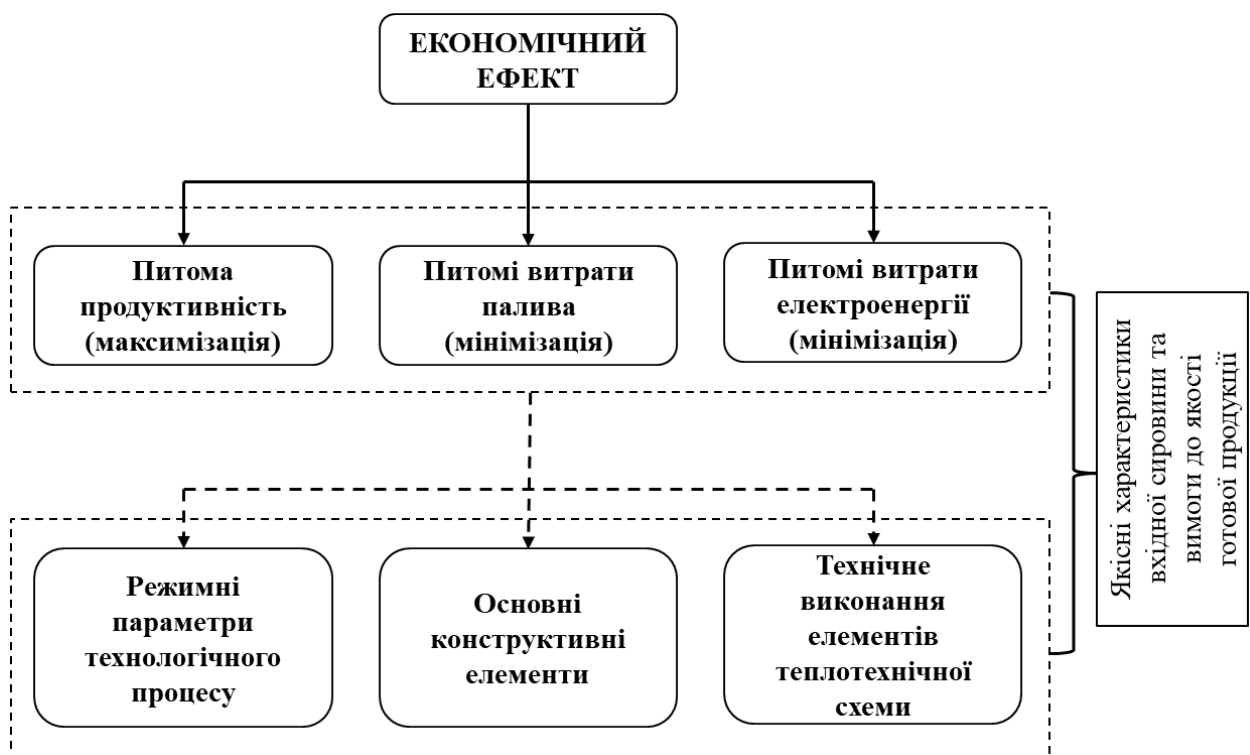


Рисунок 2.3 – Критерії оптимізації технологічного процесу виробництва окатишів та взаємозв'язок між ними

Максимізація продуктивності конвеєрної випалювальної машини:
 $G_{\text{пит.}} \rightarrow \max$, при наступних умовах (обмеженнях):

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{пит.}} = E_{\text{пит.1}} + E_{\text{пит.2}} + \dots + E_{\text{пит.n}} \leq E_{\text{пит.зад.}}; \\ Q_{\text{пит.}} = Q_{\text{пит.1}} + Q_{\text{пит.2}} + \dots + Q_{\text{пит.n}} \leq Q_{\text{пит.зад.}}; \\ V_{\text{н}} \leq V_{\text{н.о.}}; \\ V_{\text{охл.}} \leq V_{\text{охл.о.}}; \\ t_{\text{м}} = t_{\text{м}}^{\text{зад}}(\tau, H); \\ \sigma \geq \sigma_{\text{зад.}}; \\ t_{rj}^{\text{нм}} \leq t_{rj} \leq t_{rj}^{\text{вм}}; \\ t_{rj}^{\text{нм}} \leq t_{rj} \leq t_{rj}^{\text{вм}}; \\ t_{\text{виз.}} \leq t_{\text{виз.о.}}; \\ S_1 \cdot G_{\text{пит.1}} = S_2 \cdot G_{\text{пит.2}} = \dots = S_n \cdot G_{\text{пит.n}} = S_{\Sigma} \cdot G_{\text{пит.}} = G; \\ S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}; \\ G_{\text{пит.i}} = G_{\text{пит.i}}(E_{\text{пит.i}}, Q_{\text{пит.i}}). \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Мінімізація питомих витрат тепла (палива), може бути досягнуто при вирішенні нерівності: $Q_{\text{пит.}} = Q_{\text{пит.1}} + Q_{\text{пит.2}} + \dots + Q_{\text{пит.n}} \rightarrow \min$, при наступних обмеженнях:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{пит.}} = E_{\text{пит.1}} + E_{\text{пит.2}} + \dots + E_{\text{пит.n}} \leq E_{\text{пит.зад.}}; \\ Q_{\text{пит.}} \leq Q_{\text{пит.зад.}}; \\ V_{\text{н}} \leq V_{\text{н.о.}}; \\ V_{\text{охл.}} \leq V_{\text{охл.о.}}; \\ t_{\text{м}} = t_{\text{м}}^{\text{зад}}(\tau, H); \\ \sigma \geq \sigma_{\text{зад.}}; \\ t_{rj}^{\text{нм}} \leq t_{rj} \leq t_{rj}^{\text{вм}}; \\ t_{rj}^{\text{нм}} \leq t_{rj} \leq t_{rj}^{\text{вм}}; \\ t_{\text{тел.}} \leq t_{\text{тел.о.}}; \\ S_1 \cdot G_{\text{пит.1}} = S_2 \cdot G_{\text{пит.2}} = \dots = S_n \cdot G_{\text{пит.n}} = S_{\Sigma} \cdot G_{\text{пит.}} = G; \\ S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}; \\ Q_{\text{пит.i}} = Q_{\text{пит.i}}(E_{\text{пит.i}}, G_{\text{пит.i}}). \end{array} \right. \quad (4)$$

Мінімізація питомих витрат електричної енергії, може бути досягнуто при вирішені нерівності: $E_{\text{пит.}} = E_{\text{пит.1}} + E_{\text{пит.2}} + \dots + E_{\text{пит.n}} \rightarrow \min$, при наступних обмеженнях:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{пит.}} = Q_{\text{пит.1}} + Q_{\text{пит.2}} + \dots + Q_{\text{пит.n}} \leq Q_{\text{пит.зад.}}; \\ Q_{\text{пит.}} \leq Q_{\text{пит.зад.}}; \\ V_{\text{н}} \leq V_{\text{н.о.}}; \\ V_{\text{охл.}} \leq V_{\text{охл.о.}}; \\ t_{\text{м}} = t_{\text{м}}^{\text{зад}}(\tau, H); \\ \sigma \geq \sigma_{\text{зад.}}; \\ t_{rj}^{\text{нм}} \leq t_{rj} \leq t_{rj}^{\text{вм}}; \\ t_{rj}^{\text{нм}} \leq t_{rj} \leq t_{rj}^{\text{вм}}; \\ t_{\text{віз.}} \leq t_{\text{віз.о.}}; \\ S_1 \cdot G_{\text{пит.1}} = S_2 \cdot G_{\text{пит.2}} = \dots = S_n \cdot G_{\text{пит.n}} = S_{\Sigma} \cdot G_{\text{пит.}} = G; \\ S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}; \\ E_{\text{пит.i}} = E_{\text{пит.i}}(Q_{\text{пит.i}}, G_{\text{пит.i}}). \end{array} \right. \quad (5)$$

де $i = 1 - n$ – номери технологічних зон конвеєрної випалювальної машини;

j – координати вздовж конвеєрної машини;

$Q_{\text{пит.зад.}}, G_{\text{пит.зад.}}, E_{\text{пит.зад.}}, V_{\text{н.о.}}, V_{\text{охл.о.}}, t_{\text{віз.о.}}$ – обмеження питомої продуктивності, питомі витрати тепла та електричної енергії, швидкості нагріву та охолодження окатишів, температури візка, відповідно;

$t_{\text{м}} = t_{\text{м}}^{\text{зад}}(\tau, H)$ – задане розподілення температури матеріалу;

$t_{rj}^{\text{нм}}, t_{rj}^{\text{вм}}$ – обмеження по температурі газу на вході в шар (нижня та верхня межа);

$t_{\text{віз.}}$ – температура візка конвеєрної випалювальної машини;

S_{Σ}, G – площа та продуктивність випалювальної машини, відповідно.

Виконання всіх умов зазначених в рівняннях (3-5) дозволяє гарантувати необхідну якість готових окатишів за рахунок обмеження швидкості нагріву та охолодження шару окатишів, забезпечення необхідної температури випалу та ін. при вирішенні задач по оптимізації енергетичних витрат процесу випалу.

Таким чином, для вирішення зазначених вище задач з оптимізації процесу випалу, необхідно за допомогою математичних моделей досліджувати закономірності технологічного процесу і визначити жорсткі залежності вихідних параметрів від вхідних [26], як для кожної окремої технологічної зони, так і для конвеєрної випалювальної машини загалом.

В зв'язку зі складністю досліджуваного об'єкту авторами [27] запропоновано метод поетапної оптимізації конвеєрної випалювальної машини.

На першому етапі досліджуються та оптимізуються основні конструктивні елементи схеми в тому числі схеми організації газових потоків в зонах сушки та охолодження окатишів, побудови системи опалення горну і повернення тепла газів з зони охолодження в зони нагріву та ін.

На другому етапі оптимізуються конструктивні та режимні параметри термообробки шару окатишів за технологічними зонами [28].

Третій етап включає оптимізацію окремих елементів теплотехнічної схеми на основі додаткових та систематизованих принципів конструювання, що забезпечує підвищення продуктивності конвеєрної випалювальної машини, зниження питомих витрат палива та електричної енергії, покращення екологічних показників.

На виробництві, дослідженнями авторів виправдано [29] та підтверджена на практиці [30] висока ефективність оптимізації режимних параметрів конвеєрної випалювальної машини шляхом реалізації АСК ТП з використанням математичних моделей, які дозволили зекономити паливо (до 9,57 %), електричну енергію (до 7,9 %) та підвищити продуктивність агрегату (до 4,35 %) [31].

2.3 Енергетична ефективності конвеєрних машин з випалу окатишів

Конвеєрні випалювальні машини, на відміну від агломераційних машин, спроектовані таким чином, що завжди передбачають утилізацію вторинних енергетичних ресурсів (тепла). До прикладу, гаряче повітря з зони охолодження використовується в якості частини повітря для зон горна випалювальної машини, в той час, як частина теплового потоку зони випалу подається в зону сушки.

Теплова схема конвеєрної випалювальної машини визначає основні показники ефективності виробництва окатишів: питома продуктивність, питомі витрати енергетичних ресурсів, склад та кількість димових газів. Однією з головних складових теплової схеми випалювальної машини є розподіл робочої площі машини за технологічними зонами та забезпечення їх необхідною кількістю теплоносія та охолоджуючого агенту.

Приклад типової теплової схеми конвеєрної випалювальної машини проілюстровано на рисунку 2.4.

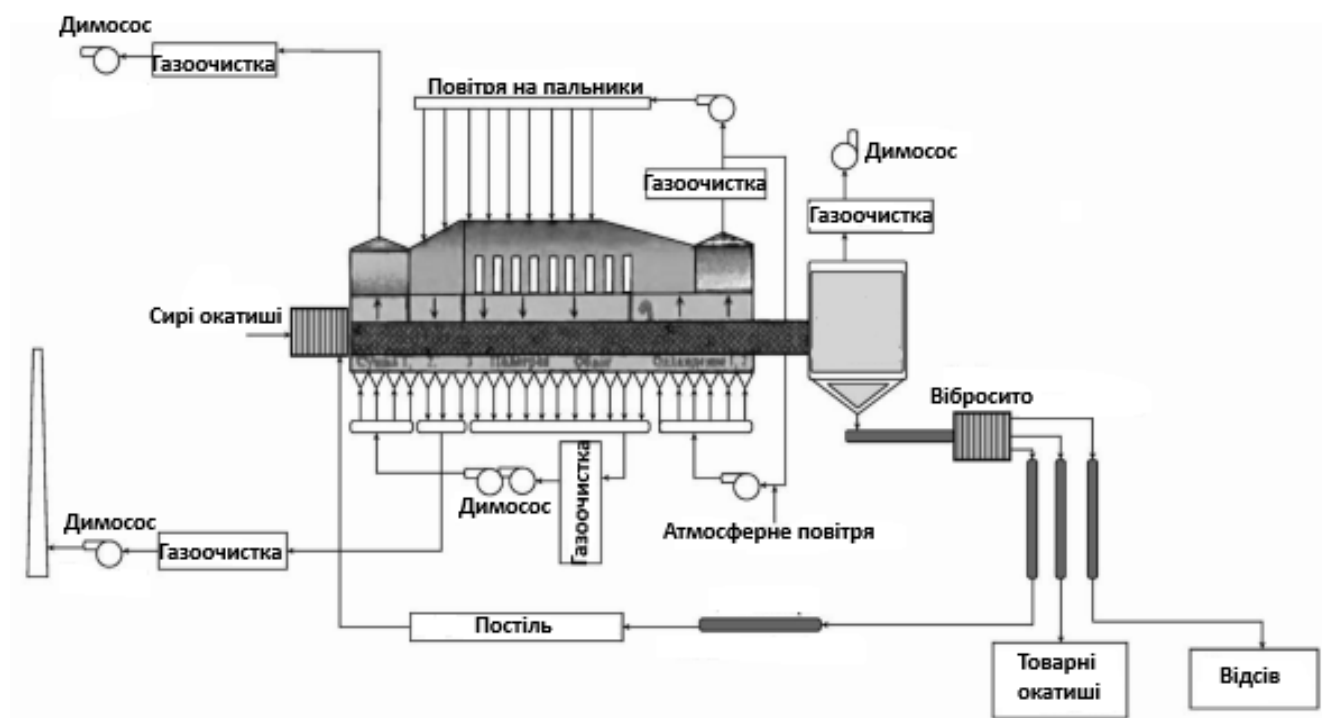


Рисунок 2.4 – Типова теплотехнічна схема конвеєрної випалювальної машини

Базовими вимогами до теплової схеми випалювальної машини є:

- Ефективний (оптимальний) розподіл робочої площі за технологічними зонами;
- Оптимальна конструкція горілочних пристроїв та їх ефективна робота;
- Відповідність димососів характеристикам повітропроводів випалювальної машини.

2.3.1 Заходи з оптимізації витрат теплової енергії на випалювальних конвеєрних машинах

Пальникові пристрої

Як зазначалося раніше в розділі 2.3 конвеєрні випалювальні машини мають значні перетоки вторинного теплоносія (повітря) з зон охолодження в зони нагріву і горна (підігріте повітря використовується для подачі на пальникові пристрої).

На випалювальних машинах застосовуються наступні види пальників:

- інжекційний пальники;
- вихрові пальники;
- вихрові газо-мазутні пальники;
- комбіновані пальники;
- пальники для спалення газу в шарі.

Ефективність роботи пальників впливає, як на витрати газу, так і склад димових газів. З метою зменшення оксидів азоту застосовують інжекційні пальники.

Дослідження роботи горну показують, що використання інжекційних пальників проти пальників з примусовою подачею окислювача, дозволяє збільшити частку високотемпературного ($800 - 1000^{\circ}\text{C}$.) теплоносія, який поступає з зони охолодження в зону нагріву прямим перетоком, що в свою чергу дозволяє повисити окислювальний потенціал теплоносія і ступінь окислення окатишів. При цьому, спостерігається зменшення питомих витрат природного газу на $2,0 - 3,0$ н.куб.м/т; покращення якості окатишів [32]; збільшення продуктивності випалювальної машини; зменшення питомих витрат електричної енергії. Інакше кажучи, використання інжекційних пальників позитивно впливає на всі технологічні параметри і має бути рекомендовано до реалізації (впровадження).

Теплові схеми

Конструктивні та технологічні заходи, що мають на меті оптимізацію питомих витрат енергетичних ресурсів мають забезпечувати високі якісні характеристики кінцевої продукції – окатишів, а також мінімальні витрати природного газу (не більше 10 нкуб.м/т) та електричної енергії (не більше 36 кВт*год/т) при малому об'ємі викидів димових газів в атмосферу (не більше 1600 нкуб.м/т). Найкращі показники за цими параметрами демонструє конвеєрна випалювальна машина четвертого покоління ВК-592 (МВК-1-592) тепла схема [33] якої зображено на рисунку 2.5, а основні технічні характеристики наводяться в Додатку 1.

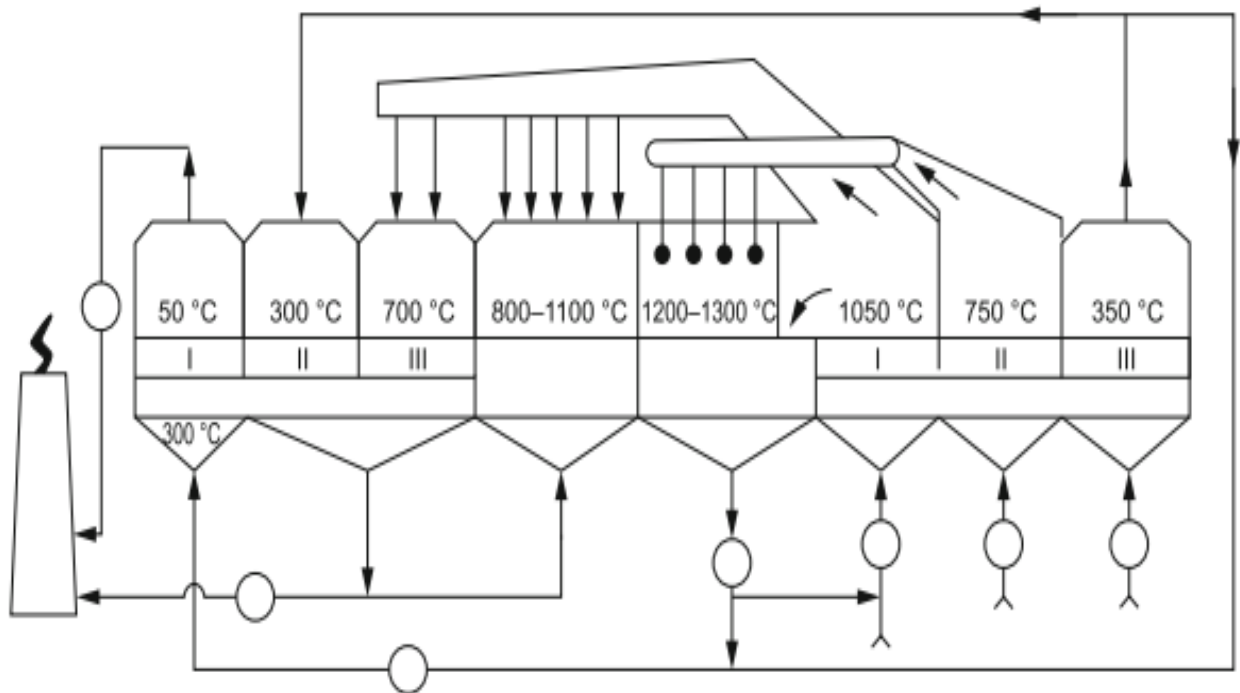


Рисунок 2.5 – Теплова схема конвеєрної випалювальної машини четвертого покоління MBK-1-592

Як відомо термообробка окатишів відбувається в п'яти технологічних зонах, а саме: сушка, нагрів, випал, рекуперація та охолодження. Всі ці технологічні зони у MBK-592-1 мають наступні характеристики:

- Зона сушки. З метою недопущення руйнування сирих окатишів при висушуванні зона сушки розділена на 3 секції: сушка I з подачею повітря (250 – 300°C) знизу; сушка II з подачею повітря (~ 300°C) зверху; сушка III з подачею повітря (~ 700°C) зверху;
- Зона нагріву. Температура зони нагріву коливається в межах 800 - 900°C для окатишів для доменної плавки та 800 – 1100 °C для окатишів для металізації;
- Зона випалу. Температура теплоносія в даній зоні залежить від типу окатишів і знаходиться в діапазоні 1200 – 1350°C.
- Зона рекуперації. Дана зона слугує для вирівнювання температур по висоті шару окатишів та забезпечення відповідної тривалості

високотемпературної обробки за зоною випалу, куди частково потрапляє повітря з зони охолодження з температурою 1050-1150°C;

- Зона охолодження. З метою найбільш ефективного використання тепла від готових окатишів вона поділена на 3 секції: охолодження I – холодоагент с температурою не більше 250°C; охолодження II – холодоагент – атмосферне повітря; охолодження III – холодоагент – атмосферне повітря.

Гаряче повітря з зони охолодження I з температурою 1050 – 1150°C розподіляється на 2 потоки, більша частина якого направляється в зони сушки та нагріву, менша частина – в зону рекуперації. Внутрішня рециркуляція відбувається за рахунок перепаду тиску в системі перетоку.

Остаточне охолодження готових окатишів відбувається в зоні охолодження III, атмосферне повітря нагрівається до температури 350°C і подається в зону сушки II. Високу ступінь рециркуляції димових газів дозволяє отримувати реальну економію енергетичних ресурсів.

Конвеєрна випалювальна машина MBK-1-592 ввібрала в себе останні досягнення в техніці та сучасний досвід модернізації конвеєрних машин з випалу окатишів [34]. Вперше створена випалювальна машина 3-хколекторного типу з 3-хсекційною зоною сушки і розподілом газових потоків за температурними характеристиками, що дозволяє цілеспрямовано подавати заданий теплоносій в потрібну технологічну зону. Саме з цією метою зона охолодження поділена на чотири секції (третя секція має 2 кожуха для роздільного відбору теплоносія). Високотемпературні гази внутрішньої рециркуляції переміщуються за рахунок перепаду тиску по переточній системі, а низькотемпературні – по газохідній системі за рахунок димососів [35]. З метою стабілізації швидкості руху газів передбачається аеродинамічна форма

переточних колекторів, стиковка опускних патрубків форкамер виконуються під кутом 45 град., для мінімізації турбулентності газових потоків.

За рахунок повторного використання газів для термообробки шару окатишів значно знижуються викиди в атмосферу, так в трубу викидаються лише низькотемпературні гази з зони сушки [36], і в поєднанні із застосуванням електрофільтрів – ступінь очистки газів від пилу підвищується до 98%.

Підводячи проміжні висновки, можна сказати, що висока технологічна та енерго-екологічна ефективність випалювальної машини МВК – 592 була досягнута за рахунок впровадження наступних рішень:

- оптимізація співвідношення площ окремих технологічних зон випалювальної машини, що забезпечує з одного боку, повне протікання всіх фізико – хімічних процесів, а з іншого – гарантує високу ступінь збалансованості теплової схеми;
- селективне транспортування нагрітого повітря з зон охолодження в зони нагріву та випалу, що гарантує повне використання кисневого та теплового потенціалу газів;
- високий ступінь рециркуляції теплоносія, що передбачає повторне використання тепла димових газів та зменшення кількості викидів в атмосферу;
- використання інжекційних пальників малої довжини з низькими витратами палива;
- рівномірне розподілення теплоносія в шарі, що дозволяє отримати стабільні якісні показники готових окатишів.

2.3.2 Заходи з оптимізації витрат електричної енергії на випалювальних конвеєрних машинах

Як зазначалося раніше в тексті розділу 2.1 частка електричної енергії на приводи димососів при виробництві окатишів на конвеєрних випалювальних машинах в грошовому виразі досягає 100% від витрат природного газу, саме тому питання зменшення питомих витрат електричної енергії мають велике значення.

Витрати електричної енергії при виробництві окатишів, перш за все формуються відносно теплотехнічної схеми і залежать від правильності вибору димососів, які фільтрують теплоносії через шар окатишів та формують потоки газів в газоповітряних трактах.

Питомі витрати електричної енергії на привід димососів у випалювальних машинах різної конструкції коливаються в широких межах: від 42,5 кВт·год/т для ВК-108/116 АТ «Соколовсько - Сарбайського гірничо-збагачувального комбінату» (Казахстан) до 18,0 кВт·год/т – для Lurgi-480 ВАТ «ОЕМК» [37].

До основних елементів, які впливають на витрати електричної енергії при виробництві окатишів, відносяться: димососи, газоповітряні тракти, схема організації потоків. З огляду на це, можна припустити, що з метою зменшення витрат електричної енергії необхідно працювати в наступних напрямленнях:

- максимізація ККД димососів;
- скорочення теплоносія, що транспортується димососами;
- зменшення коефіцієнту аеродинамічного супротиву мережі;
- оптимізувати теплотехнічну схему випалювальної машини.

Візуально зазначенні фактори можна згрупувати та зобразити за допомогою рисунка 2.6.



Рисунок 2.6 – Шляхи зниження питомих витрат електричної енергії при виробництві окатишів

1. Максимізація ККД димососів передбачає наступні дії:

- Використання димососів з максимальним ККД;
- Димосос має працювати в режимі максимального ККД (характеристики димососа та газоходів мають бути відповідними);
- Обирати привід димососів з найбільшим ККД і оптимальним навантаженням;
- Використовувати найбільш ефективні методи регулювання продуктивності димососів (частотне регулювання, дроселювання).

2. Зменшення кількості теплоносія, який переміщується димососами:

- Кількість газоповітряних камер має бути такою, що не виключає необхідність відкриття дроселю підсосу атмосферного повітря з метою зменшення температури теплоносія, при зміні технологічного процесу;
- Використання колектору прямого перетоку для подачі максимальної кількості високотемпературного теплоносія з зони охолодження в зону нагріву і збільшення частки переточного теплоносія;
- Використання інжекторних пальників, що зменшує витрати повітря на горіння, яке подається димососами;
- Зменшення кількості неорганізованих підсосів за рахунок встановлення повздовжних бортових та поперечних ущільнювачів в горні та газоповітряних камерах;
- Оптимізація співвідношення ширини випалювального візка та довжини випалювальної машини з метою мінімізації загальної кількості підсосів. В наш час, частка прососів зменшилася при збільшенні ширини випалювального візка з 2 до 5 м. [38].

3. Зменшення аеродинамічного супротиву шару окатишів:

- Оптимізація гранулометричного складу окатишів, які подаються на випалювальну машину шляхом мінімізації фракції мінус 5 мм та фракції плюс 18 мм, а також збільшення міцності сирих окатишів;
- Впровадження способу укладання окатишів шаром з високою газопроникністю [39].
- Визначення оптимальної висоти шару сирих окатишів, що забезпечує мінімальні витрати електричної енергії;
- Зменшення аеродинамічного супротиву постілі та колосників випалювальних візків;

- Форма та конструкція колосників мають забезпечувати їх самоочищення при виході випалювальних візків з холостої на робочу гілку випалювальної машини.

4. Зменшення аеродинамічного супротиву газоповітряних трактів:

- Уникати різких поворотів повітропроводів, їх розширення та звуження;
- На різких поворотах необхідно встановлювати направляючі лопатки;
- Мінімізувати довжину повітропроводів;
- Діаметр повітропроводів має відповідати об'єму теплоносія, а його швидкість переміщення не має перевищувати 15 – 20 м/с;

5. Зменшення аеродинамічного супротиву газоочисток:

- Використання електричних фільтрів, які мають найменший аеродинамічний супротив і втрати напору, а також високий ККД очистки при низьких витратах електричної енергії;
- Використання димососів стійких до абразивного зносу для виключення газоочисток на внутрішніх газопроводах.

6. Синтез оптимальних теплотехнічних схем випалювальних машин:

з метою мінімізації витрат електричної енергії в цілому по випалювальній машині, в першу чергу, треба визначити оптимальне співвідношення площ зон і необхідний тиск (розрядження) в газоповітряних камерах, які в свою чергу залежать від характеристик вхідної сировини, вимог до якості готових окатишів та ін. Слід також відмітити, що в наш час процес конструювання оптимальних схем до кінця не сформований в зв'язку з його складністю та різноманітністю.

2.4 Вплив основних технічних та конструктивних рішень на показники роботи випалювальних машин

Провівши аналіз технічних рішень, котрі були розглянуті в розділі 2.3 цієї роботи, можна дійти висновку, що всі технічні рішення і основні конструктивні елементи, які розглядаються на етапі розробки теплотехнічних схем випалювальних машин, можна класифікувати за їх ефективністю на три основні групи:

1. Технічні рішення, які потрібно застосовувати в кожному випадку: реверсивна сушка (продув/просмоктування), однопоточна система прямого перетоку, інжекційні пальники, безреверсивна схема охолодження атмосферним повітрям. Разом з цим, слід відмітити, що доцільність використання зазначених технічних рішень практично не залежить від вимог до якості готових окатишів і вхідної сировини.

2. Технічні рішення, використання яких необхідно додатково обґрунтовувати (прорахувати): двох – і більше поточна система прямого перетоку [40], охолодження окатишів на першій стадії нагрітим повітрям [41-44], що призводить до зниження продуктивності зони охолодження и випалювальної машини, відповідно.

3. Технічні рішення, які не рекомендуються до впровадження: сушка шару з просмоктування теплоносія, вентиляторна система перетоку з розбавленням теплоносія, двухпроводні пальники, реверсування теплоносія при охолоджені або охолодження у виносному охолоджувачі.

В таблиці 2.1 наведені основні конструктивні елементи теплотехнічних схем та їх вплив на показники роботи випальної машини.

Таблиця 2.1 – Вплив основних конструктивних елементів на показники роботи конвеєрних випалювальних машин

№ з/п	Найменування конструктивного елементу	Вплив на показник			
		Продуктивність	Витрати палива	Витрати електроенергії	Економічний ефект
1.	<i>Організація зони сушки</i>				
1.1	Реверсивна сушка (продув/просмоктування теплоносія)	+	–	–	+
1.2	Сушка з просмоктуванням теплоносія	–	+	+	–
1.3	Сушка з просмоктуванням та пошаровим завантаженням	–	+	+	–
2.	<i>Система рекуперації тепла з зони охолодження в зону нагріву</i>				
2.1	Вентиляторна з розбавленням теплоносія		–	–	–
2.2	З переточним колектором		+	+	+
3.	<i>Система опалення горна машини</i>				
3.1	З двохлапними турбулентними пальниками	–	–	–	–
3.2	З інжекційними пальниками	+	+	+	+
4.	<i>Проектування зони охолодження</i>				
4.1	Реверсивне охолодження	–	–	–	–
4.2	Охолодження у виносному охолоджувачі	–	–	–	–
4.3	Охолодження атмосферним повітрям	+	–	+	+
4.4	Комбіноване охолодження (нагрітим та атмосферним повітрям)	–	+	–	–

Коментар: «+» впровадження цього конструктивного елементу призводить до покращення показника, «–» впровадження цього конструктивного елементу призводить до погіршення показника.

Підводячи проміжні підсумки по розділу, хотілось би на основі зазначених вище технічних рішень розкрити потенціал модернізації випалювальних машин підприємств з виробництва окатишів, які знаходяться в Кривому Розі, а саме Центрального ГЗК та Північного ГЗК.

Представимо пропозиції, щодо варіантів модернізації конвеєрних випалювальних машин в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Резерви підвищення ефективності роботи конвеєрних випалювальних машин Центрального ГЗК та Північного ГЗК

Найменування підприємства	Тип агрегату, виробник	Інжекційні пальники	Наявність колектору прямого перетоку	Охолодження атмосферним повітрям замість нагрітого	Оптимізація співвідношення площ технологічних зон	Оптимізація тиску (розрядження) в камерах	Оптимізація режиму термічної обробки
Центральний ГЗК	БК-324 Уралмаш	–	–	–	+	+	+
Північний ГЗК	БК-306 Уралмаш	+	–	+	+	+	+
	БК-278 LURGI	+	–	–	+	+	+
	БК-552 LURGI	–	–	–	+	+	+

Коментар: «+» - наявність резерву з покращення показників за рахунок впровадження зазначеного технічного рішення, «–» відсутність резерву з покращення показників.

ВИСНОВКИ

1. Сучасна українська металургія переживає найглибшу кризу за всю новітню історію України. Виробництво сталі скоротилося з більш ніж 50 млн. т./рік на початку 1990-х років до 7,6 млн. т./рік станом на 2024 рік.
2. В експортній структурі залізорудної сировини України окатиші є найбільш дорогим сегментом і складають від 25 до 35 % всього об'єму.
3. Найбільш розповсюдженими агрегатами з випалу окатишів є: конвеєрні випалювальні машини (близько 55 %), установка «решітка – трубчаста піч – охолоджувач» (близько 40 %) та шахтні печі (до 5 %).
4. При порівняно однакових значеннях якісних та виробничих показників різних агрегатів з випалу окатишів, продуктивність конвеєрних випалювальних машин вище за установку «колосникова решітка – трубчаста піч» та шахтні печі.
5. Країни соціалістичного табору в часи свого активного промислового розвитку, при наявності умовно необмежених ресурсів, робили ставку здебільшого на продуктивність агрегатів з випалу окатишів, саме тому в нашій країні найбільшої популярності здобули саме конвеєрні випалювальні машини.
6. Повна ентальпія трубних газів складає 74,9 % від загальних витрат тепла, з повторним використанням лише 26,0 % (досвід роботи ССГВО). Збільшення відсотку рециркуляції тепла з використанням принципу прямого перетоку дозволяє зменшити витрати палива приблизно на 20 – 25 %.
7. Витрати електричної енергії в основному залежать від схеми ланцюга апаратів, технічних характеристик обладнання, а також від вихідних характеристик сировини та технологічної карти виробництва окатишів.
8. Збільшення площі конвеєрних випалювальних машин, призводить до незначного збільшення питомих витрат електричної енергії та незначного

зменшення питомих витрат природного газу. Основною причиною може бути більш сучасна система газоходів, яка збільшує витрати електричної енергії (за рахунок встановлення додаткових димососів) при зменшені витрат теплової енергії (за рахунок рециркуляції газів та більш повного використання тепла).

9. Аналіз виробничих витрат ВАТ «Центральний ГЗК» свідчить, що найвища вартість технологічного циклу складає виробництво окатишів 41,2 грн/т, в той час як вартість виробництва концентрату складає 27,7 грн/т видобутку руди – 8,6 грн/т., а її подрібнення – 2,0 грн/т.

10. З основних переділів ГЗК найбільші витрати електричної енергії мають процеси збагачення (15,2 грн/т) та огрудкування (13,2 грн/т) і також вони мають найбільші витрати (близько 7,0 грн/т) на ремонт та утримання основних фондів.

11. Використання надійних математичних моделей дозволяє значно скоротити час розробки процесів та устаткування, оптимізувати конструктивні і режимні параметри та забезпечити високі техніко – економічні показники роботи конвеєрної випалювальної машини.

12. Базовими вимогами до теплової схеми випалювальної машини є: ефективний (оптимальний) розподіл робочої площі за технологічними зонами; оптимальна конструкція горілочних пристроїв та їх ефективна робота; відповідність димососів характеристикам повітропроводів конвеєрної випалювальної машини.

13. Використання інжекційних пальників позитивно впливає на всі технологічні параметри і має бути рекомендовано до впровадження у всіх варіантах модернізації.

14. Найефективніша з точки зору використання теплової енергії є конвеєрна випалювальна машина 3-хколекторного типу з 3-хсекційною зоною сушки і розподілом газових потоків за температурними характеристиками, що дозволяє цілеспрямовано подавати заданий теплоносій в потрібну технологічну зону.

15. Витрати електричної енергії при виробництві окатишів, перш за все залежать від теплотехнічної схеми і правильності вибору димососів, які фільтрують теплоносії через шар окатишів та формують потоки газів в газоповітряних трактах.

16. Зменшення витрат електричної енергії може бути досягнуто наступним заходами: максимізація ККД димососів; скорочення теплоносія, що транспортується димососами; зменшення коефіцієнту аеродинамічного супротиву мережі; оптимізувати теплотехнічну схему випалювальної машини.

17. Розкрити потенціал в модернізації конвеєрних випалювальних машин на підприємствах з виробництва окатишів, які знаходяться в Кривому Розі, а саме Центрального ГЗК та Північного ГЗК, можна шляхом впровадження наступних рекомендацій: оптимізація співвідношення площ технологічних зон; оптимізація тиску (розрядження) в камерах; Оптимізація режиму термічної обробки шару окатишів