

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО
ВИРОБНИЦТВА

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної магістерської роботи**

**зі спеціальності 136 – Металургія
за освітньо-професійною програмою – Металургія чорних металів**

**Тема роботи: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА
ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАПНА В ШИХТІ
ОГРУДКУВАННЯ»**

Виконав:
магістрант групи МЧМ-23-1м _____ Єгор БРЕХЕР

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Сергій САВЕЛЬСВ

Нормоконтролер _____ Сергій САВЕЛЬСВ

Завідувач кафедри _____ Сергій САВЕЛЬСВ

Кривий Ріг
2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИВОРИЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою _____

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на випускню кваліфікаційну роботу
студента Брехер Єгора Олександровича**

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи: Розробка технології виробництві залізородних окатишів з використанням вапна в шихті огрудкування.

Затверджена наказом ректора КНУ від «28» червня 2024 р. №545с

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 01 грудня 2024 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

4.2. Критичний аналіз звітів про НДР, літературних джерел

4.3. Викладення оброблених даних досліджень і їх аналіз

4.4. Економічна оцінка результатів роботи

4.5. Санітарно – екологічна оцінка

4.6. Заключення

4.7. Список літературних джерел

5. Консультанти по проекту (роботі)

Розділ	Консультант розділу	Підпис, дата	
		видачі завдання	виконання завдання
Критичний аналіз літературних джерел	Савельєв С.Г.		
Викладення оброблених результатів досліджень та їх аналіз	Савельєв С.Г.		
Економічна оцінка результатів НДР	Бондарчук О.М.		
Санітарно-екологічна оцінка результатів НДР	Шаповалов В.А.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання магістерської роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Критичний аналіз літературних джерел і передового досвіду працюючих підприємств	27.09.2024	
2	Результати досліджень і їх аналіз	25.10.2024	
3	Економічна оцінка результатів НДР	14.11.2024	
4	Санітарно-екологічна оцінка результатів НДР	21.11.2024	
5	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2024	
6	Виконання графічної частини	28.11.2024	
7	Подання дипломного проекту до кафедри	30.11.2024	
8	Захист проекту в ДЕК	18.12.2024	

7. Дата видачі завдання 28 червня 2024 р.

Студент-магістрант _____
(підпис)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

до випускної кваліфікаційної роботи на тему:

Розробка технології виробництва залізорудних окатишів з використанням вапна в шихті огрудкування

Пояснювальна записка: 85 с., 18 табл., 15 рис., 46 джерел.

Об'єкт дослідження: технологія виробництва офлюсованих залізорудних окатишів з використанням вапна.

Предмет дослідження: вплив вапна на якісні показники офлюсованих залізорудних окатишів та технологічні параметри процесів огрудкування та випалу.

Мета роботи: дослідження впливу вапна на якісні показники офлюсованих залізорудних окатишів та розробка технології виробництва окатишів з використанням вапна.

Методи дослідження: лабораторні дослідження.

Результати роботи: на підставі практичних даних отриманих в ході досліджень зроблено висновок про можливість застосування вапна у виробництві залізорудних офлюсованих окатишів, виявлені закономірності міцності офлюсованих окатишів від температурно–часового режимів випалу, проаналізовані міцнісні характеристики для подальшого використання в доменній плавці.

**ВАПНО, ПЕЧІ ДЛЯ ВИПАЛУ ВАПНА, ГАСІННЯ, ОГРУДКУВАННЯ,
РЕЖИМ ВИПАЛУ, МІЦНІСТЬ ОКАТИШІВ.**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	10
1.1. Сучасний стан та перспективи розвитку гірничо – металургійної галузі України.....	10
1.1.1. Сучасний стан гірничо – металургійної галузі України	10
1.1.2. Перспективи розвитку гірничо – металургійної галузі України	11
1.2. Технологія огрудкування та вимоги до якості готової продукції	12
1.2.1. Технологія виробництва залізородних окатишів.....	12
1.2.2. Вимоги до якості товарних окатишів.....	16
1.3. Дослідження умов використання вапна при виробництві окатишів.....	18
1.4. Вапно. Вимоги до якості та методи його отримання в промислових умовах.....	21
1.4.1. Теоретичні відомості про вапно	21
1.4.2. Технологія виробництва вапна	22
1.4.3. Промислові агрегати для отримання вапна	24
1.4.3.1 Шахтні печі.....	24
1.4.3.2 Довгі обертові печі	27
1.4.3.3 Регенеративні печі з паралельним потоком матеріалу	28
1.4.4. Вітчизняний досвід отримання вапна	30
1.4.5. Вимоги до якості агломераційного вапна.....	31
1.4.6. Аналіз ринку вапнякової галузі України	31
1.5. Оптимізація процесу виробництва окатишів з використанням вапна	35
1.5.1. Підготовка вапна до огрудкування шихти.....	35
1.5.2. Вплив вапна на процес огрудкування	36
1.5.3. Процес випалу окатишів з використанням вапна	37
1.5.4. Результати промислових випробувань окатишів з використанням вапна при їх виробництві	37
1.6. Висновки за Розділом 1 та постановка задач досліджень	38

РОЗДІЛ 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	41
2.1. Методика проведення досліджень.....	41
2.1.1. Мета досліджень.....	41
2.1.2. Обладнання.....	42
2.1.3. Сировинні матеріали.....	42
2.1.4. Блок схема процесу дослідження.....	43
2.1.5. Хід виконання досліджень.....	45
2.1.5.1 Підготовка шихти для огрудкування.....	45
2.1.5.2 Огрудкування шихти.....	46
2.1.5.3 Сушка та випалення окатишів.....	47
2.1.5.4 Оцінка фізико – механічних властивостей окатишів.....	47
2.1.6. Результати та їх аналіз.....	50
2.1.7. Висновки.....	53
2.2. Вплив якості вапна на процес огрудкування та випалу окатишів.....	55
2.3. Вибір та обґрунтування раціонального способу отримання вапна для використання в шихті огрудкування.....	56
2.4. Висновки за Розділом 2.....	63
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ ВАПНА У ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ.....	65
РОЗДІЛ 4. САНІТАРНО-ЕКОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАПНА В ШИХТІ ОГРУДКУВАННЯ.....	73
4.1. Санітарне забезпечення використання вапна при виробництві окатишів.....	73
4.2. Екологічні аспекти використання вапна при виробництві окатишів.....	74
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

ВСТУП

Обсяг світового ринку залізорудних окатишів в 2023 році оцінювався в 46,9 млрд. дол. США і прогнозується, що він буде зростати на 6,0% з 2024 по 2030 рік [www.grandviewresearch.com] за рахунок збільшення виробництва сталі в країнах, що розвиваються.

Урядова політика підвищення цін дозволів на викиди вуглецю в Європейському Союзі позитивно вплинула на рівень попиту на залізорудні окатиші з боку виробників сталі через зменшення викидів вуглецю, оскільки зменшують використання коксу в доменних печах.

Взаємозв'язок між попитом і пропозицією значною мірою впливає на коливання цін на окатиші, що безпосередньо впливає на вартість виробництва сталі та пов'язаної з нею продукції. Коливання цін відіграють ключову роль у прийнятті рішень щодо купівлі залізорудних окатишів, діючи як обмежувальний фактор для зростання ринку.

Глобальний ринок залізорудних окатишів характеризується суровою конкуренцією і правила гри на ньому значною мірою диктують транснаціональні корпорації (наприклад Vale та Rio Tinto), які ускладнюють вихід нових гравців (продавців).

З оглядом на ситуацію, що склалася в Україні в теперішній час, наша країна втрачає позиції на світовому ринку залізорудної сировини через проблеми з логістикою та енергетикою. Покращити свою позицію можна лише через підвищення купівельної привабливості залізорудної продукції. Одним із шляхів може стати перехід на виробництво залізорудних офлюсованих окатишів, які за своїми властивостями не поступаються, а в деяких значеннях перевершують якісні показники неофлюсованих окатишів.

За результатами дослідів [1] можна зробити висновки, що збільшення модуля основності залізородних окатишів на 0,1 част. од. основності зменшує витрати коксу при доменній плавці на 1,5%. Збільшення вмісту заліза в доменній шихті на 1,0% збільшує продуктивність печі на 2,5% і сприяє зниженню витрат скіпового коксу на 1,0 – 1,5%. Зниження вмісту фракції 0,3 – 0,5 мм на 1,0% в окатишах покращую газопроникність стовпа шихти в печі, що дозволяє збільшити кількість дуття і підвищити її продуктивність на 0,7-1,0% при зниженні витрат коксу на 0,3-0,5%.

Шляхом підвищення купівельної привабливості залізородних окатишів, як з точки зору покращення роботи доменних печей, так і з точки зору зниження викидів забруднюючих речовин, може стати виробництво залізородних офлюсованих окатишів з використанням вапна.

Виробництво окатишів з використанням вапна можливе на всіх фабриках огрудкування України. Використання вапна є резервом підвищення ефективності роботи, як доменних печей, так і фабрик огрудкування та випалу окатишів.

РОЗДІЛ 1. КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1. Сучасний стан та перспективи розвитку гірничо – металургійної галузі України

1.1.1. Сучасний стан гірничо – металургійної галузі України

На території України налічується п'ять залізорудних басейнів: Криворізький, Кременчуцький, Білозерський, Приазовський, Керченський. У Державному балансі запасів корисних копалин України враховано 60 родовищ, 25 з яких розробляються; загальні запаси залізних руд становлять 31,4 млрд. т., ресурси – 133,0 млрд. т. Видобуток залізної руди у 2019 р. склав 157,4 млн. т. руди [2], що повністю задовольняє потреби гірничо-металургійної промисловості України і забезпечує можливості експорту залізних руд на світові ринки залізорудної сировина (ЗРС). За даними сайту worldstorexports.com в 2023 році Україна посіла 8 місце в списку найбільших світових експортерів залізної руди з показником в 1,1% від загальносвітового експорту залізної руди.

Найвагомішими за видобутком залізних руд в Україні є гірничо – збагачувальних комплексів (ГЗК) групи «Метінвест», які за 2019 рік видобули 93,57 млн. т. залізних руд, що склало близько 60% всіх залізних руд, видобутих в Україні [3].

Більшість гірничо – збагачувальних комплексів має в своєму складі фабрики з огрудкування та випалу окатишів. Згідно із даними виробничих показників за 2023 рік, що опубліковані на сайті групи «Метінвест» www.metinvestholding.com, доля окатишів у виробленій (товарній) продукції всього гірничодобувного сегменту групи складає більшу половину, а саме 56,5%.

1.1.2. Перспективи розвитку гірничо – металургійної галузі України

Залізорудна галузь України відіграє ключову роль в економіці країни, вносячи вагомий внесок в наповнення державного бюджету і може розглядатися, як один із головних інструментів подолання світових економічних криз та основу у відновленні України в післявоєнні часи, про що свідчать результати роботи [4] зі встановлення наявного взаємозв'язку між ВВП країни, об'ємом експорту залізної руди та світовими і вітчизняними цінами на руду.

Для підтримки конкурентоспроможності підприємств важливим питанням є зниження собівартості виробництва, а в умовах воєнного стану воно стало критичним, враховуючи втрату ринків збуту.

На собівартість продукції промислового підприємства впливає велика кількість факторів, серед яких основними є дотримання технологічних вимог виробничого процесу, заходи зі зниження витрат та підвищення економічної ефективності виробництва.

Як свідчить аналіз мінерально – сировинної бази залізних руд України, подальший розвиток гірничо - металургійної промисловості буде пов'язаний насамперед з існуючими підприємствами, хоча в Україні відомо багато інших перспективних ділянок розробки. Враховуючи значні терміни забезпеченості існуючих ГЗК, незважаючи на певні їх проблеми, впровадження нових об'єктів виглядає недоцільним, особливо з погляду на значну конкуренцію з боку вже функціонуючих ГЗК. Це ускладнює інвестування нових проектів, які виглядатимуть неконкурентоспроможними порівняно з існуючими підприємствами. Тому майбутнім потенційним інвесторам можна рекомендувати вкладення коштів не в нові проекти, а в ті, які давно розроблюються різними промислово-фінансовими групами, гірничо-збагачувальними комбінатами, шляхом їх акціонування.

1.2. Технологія огрудкувння та вимоги до якості готової продукції

1.2.1. Технологія виробництва залізорудних окатишів

Ідея огрудкування дрібної вологої руди в барабані з подальшим її сушінням та випалом належить шведу А. Г. Андерсону (Swedish Patent No 35124, 1912). Однак комерційне виробництво окатишів розпочалося в Сполучених Штатах Америки після Другої Світової Війни. Перший завод з виробництва окатишів був ведений в експлуатацію в 1955 році в місті Сільвер Бей, Міннесота, що і понині працює в складі корпорації Cleveland – Cliffs Inc [5].

Основними причинами інтенсивного розвитку виробництва окатишів в світі стали:

- збільшення видобутку бідних руд, що потребують глибокого збагачення;
- розвиток виробництва тонкоподрібненого концентрату;
- низька продуктивність агломераційних машин при спіканні тонкоподрібнених концентратів особливо при отриманні неофлюсованого агломерату;
- висока ступінь транспортабельності окатишів в порівнянні з агломератом;
- високі показники якості (вміст заліза, холодна міцність, низький вміст дріб'язку, рівномірний гранулометричний склад).

Виробництво окатишів здійснюється на фабриках огрудкування та випалу окатишів, які в більшості випадків є частиною гірничо – збагачувальних комбінатів або металургійних заводів.

Шихта для виробництва залізорудних окатишів складається з залізорудної частини – концентрату, сполучної добавки – бентоніту та флюсу.

Підготовлені компоненти шихти подаються на дозування та змішування. Якість процесу дозування забезпечується з одного боку розрахунком шихти, з іншого точністю дозування – роботою дозувального обладнання.

Структура шихти та вимоги до її компонентів, що забезпечують необхідні властивості окатишів, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. – Загальні вимоги до шихтових компонентів для виробництва окатишів.

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

З бункерів шихтового відділення концентрат, бентоніт, вапняк дозуються на збірний конвеєр за допомогою дискових, стрічкових та шнекових вагових дозаторів. Після чого шихта подається на стадію змішування. Операція змішування шихтових матеріалів визначає однорідність шихти та може бути здійснена в одну або декілька стадій в залежності від змішувача. На цьому етапі використовуються шнекові, роторні, барабанні змішувачі, та змішувачі інтенсивного перемішування.

Технологічна схема виробництва окатишів представлена на рисунку 1.1.

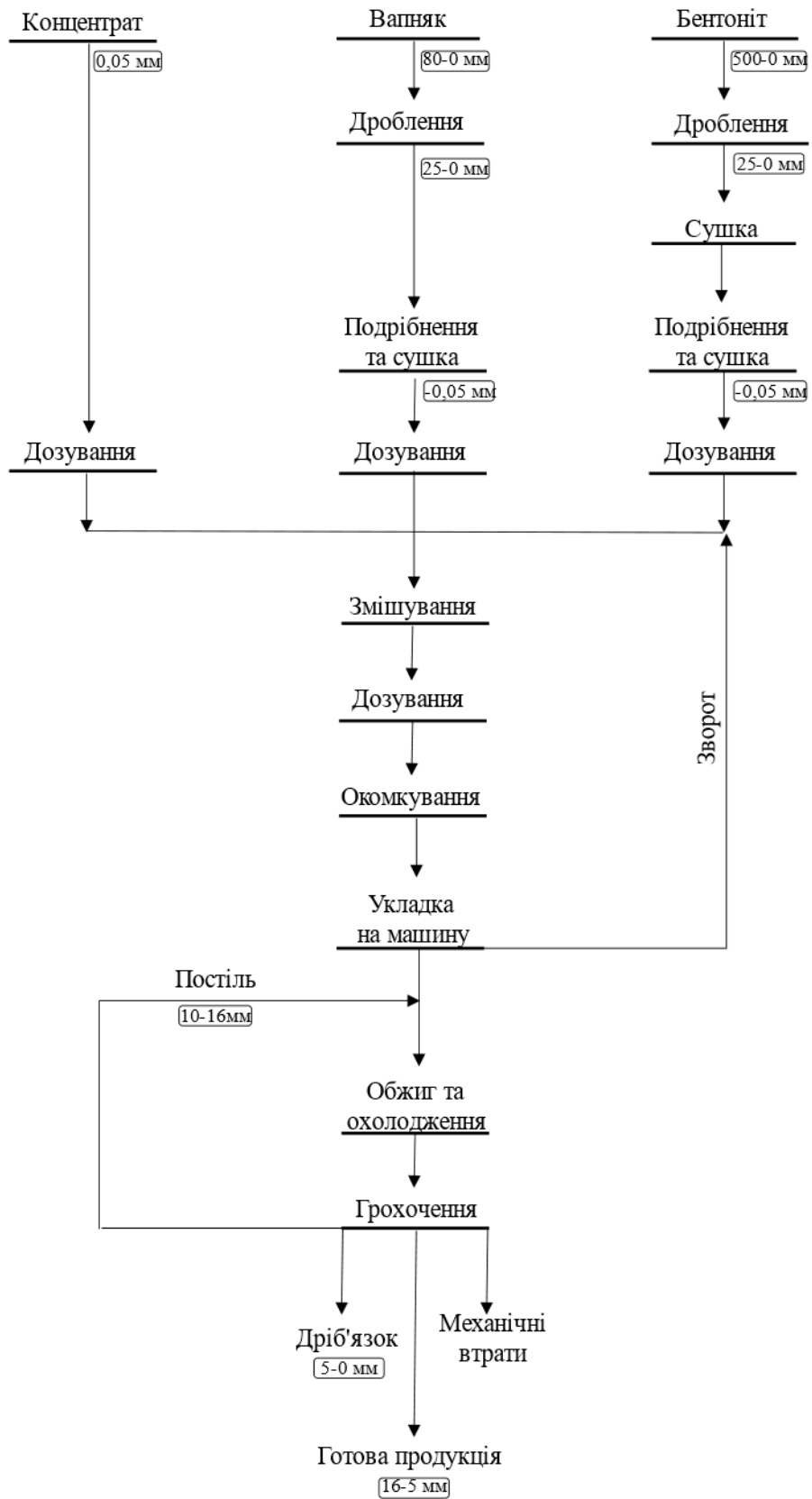


Рисунок 1.1. – Технологічна схема виробництва окатишів.

Після змішування шихта потрапляє на стадію огрудкування.

Процес отримання сирих окатишів відбувається в два етапи. На першому етапі з шихти, що подається на огрудкування, утворюються зародиши окатишів. На другому – відбувається зростання та зміцнення окатишів за рахунок того, що зародиши накочують на себе шар концентрату з часточками сполучного та флюсуючого компонентів шихти, перетворюючись в гранули шароподібної форми. Огрудкування шихти відбувається в конусних, чашових (тарілчастих) або барабанних огрудкувачах та їх комбінацій.

Отриманні сирі окатиші потрапляють на класифікацію до роликкових грохотів, де як правило, відбувається розділення на три класи: - 5 мм, + 16 (18) мм та кондиційний клас крупності –16 (18) + 5 мм.

Годний клас сирих окатишів укладається на випалювальну машину. Розподілення окатишів по ширині палети здійснюється маятниковим або човниковим укладальником.

Випал окатишів є однією з найбільш складних технологічних стадій виробництва. Основною метою якої є отримання випалених залізородних окатишів, які максимально відповідають вимогам доменного виробництва та зберігають свої міцнісні характеристики при зберіганні, транспортуванні та перевантаженнях.

В процесі термічної обробки окатиші проходять послідовно наступні технологічні зони: сушка, нагрів, високотемпературний випал, рекуперацію та охолодження. В кожній технологічній зоні підтримуються певні температурні та аеродинамічні режими, що регламентуються картою технологічного процесу та складом окатишів.

Зона сушки призначена для видалення вологи з сирих окатишів і підготовки їх до високотемпературного нагріву. Зона нагріву має на меті видалення залишкової вологи з середніх і нижніх шарів окатишів та підготовку їх до випалу. В цій зоні активно проходять процеси окислення магнетиту,

розкладання карбонатів і гідратів концентрату, флюсу, бентоніту та формуються міцнісні властивості верхнього шару окатишів.

Зона охолодження призначена для охолодження окатишів до температури менш ніж 150 °С.

Сортування готової продукції відбувається методом грохочення. Товарні окатиші відвантажуються в залізничний транспорт через відвантажувальні бункери або конвеєрними трактами потрапляють на наступний етап технологічного переділу. При необхідності, окатиші можуть направлятися на складі за допомогою штабелеукладача.

1.2.2. Вимоги до якості товарних окатишів

Світовий тренд зі збільшення відсотка окатишів при виплавці чавуну вимагає покращення якості окатишів для високоефективної роботи доменних печей. Якщо спробувати узагальнити вимоги до окатишів зі сторони доменного виробництва, то вони зводяться до наступних [6]:

а) по хімічному складу:

- максимальний вміст $Fe_{\text{загл.}}$;
- основність, що забезпечує вивід сирого вапняку з доменної шихти;
- вміст FeO до 2,0%;
- мінімальний вміст шкідливих домішок;
- стабільність хімічного складу (відхилення по $Fe \pm 0,2\%$, по основності $\pm 0,02\%$).

б) по фізичним властивостям:

- висока механічна міцність (не нижче 150 кг/окатиш по ISO 4700);
- низький ступень подрібнення;
- висока міцність на стирання;

в) по фізико – хімічним властивостям:

- висока відновлювальність, не менш 0,8 %/хв.;
- висока температура початку розм'якшення;

- вузький температурний інтервал розм'якшення.

Нижче в таблиці 1.2. наведено цифрові значення основних параметрів металургійних властивостей товарних окатишів.

Таблиця 1.2. – Вимоги до металургійних властивостей окатишів для доменної плавки.

Металургійні властивості	Значення параметра
Фізико-механічні властивості	
Фракційний склад товарних окатишів, мм	8,0 – 18,0
- вихід товарних окатишів, % мас.	більше 90,0
- вміст дріб'язку (- 5 мм), % мас.	менше 5,0
Міцність на роздавлювання (стискання), кН/окатиш	2,0 – 3,0
Барабана проба:	
- міцність на удар (плюс 5 мм), % мас.	95,0
- міцність на стирання (мінус 0,5 мм), % мас.	менше 3,0
Властивості при відновленні	
Гаряча міцність:	
- вихід фракції, плюс 5 мм, % мас.	більше 80,0
- вихід фракції, мінус 0,5 мм, % мас.	менше 5,0
Розбухаємість, %	менше 12,0
Відновлювальність, %/хв.	більше 5,0
Стабільність хімічного складу:	
- вміст заліза загального, % мас.	±0,2
- основність, долі од.	±0,02

Покращення якості окатишів – максимізація вмісту заліза та основності, збільшення механічної міцності в холодному та гарячому стані є найважливішим напрямком технічного прогресу в доменному виробництві. Рішенням питання покращення металургійної привабливості окатишів може стати перехід на безбентонітові окатиші з використанням в якості сполучної добавки випаленого вапна.

1.3. Дослідження умов використання вапна при виробництві окатишів

За даними World Steel Association в 2022 року світове виробництво чавуну склало 1,39 млрд. т., в тому числі 1,28 млрд. т. в доменних печах. Україна в 2022 році посіла 15 місце в рейтингу світових виробників чавуну з показником 6,39 млн. т. (зменшення на 69,8% у порівнянні з попереднім 2021 роком).

Близько чверті всього об'єму видобутої залізної руди в 2010 році було використано у виробництві окатишів і цей показник з кожним роком має тенденцію до зростання [7]. При цьому на більшості металургійних підприємств доля окатишів в доменній плавці складає 20 – 40%, з яких 100% неофлюсовані окатиші [8].

Якість окатишів відіграє ключову роль у зниженні витрат відновлювального агенту (коксу) і підвищенні продуктивності доменної печі. Так при виробництві окатишів за класичною схемою (див. рисунок 1), в якості сполучної добавки використовують бентоніт. Додавання бентоніту в об'ємі 0,5 – 0,7% збільшує кислотність окатишів, що негативно впливає на економічні показники виробництва чавуну і зниженню вмісту заліза на 0,6% [9]. Деякі форми бентоніту містять більше ніж 65% SiO_2 або 85% ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$). Додатковий кремнезем, що вноситься з бентонітом, погіршує пористість

окатишів перешкоджаючи потраплянню в середину них відновлювального реагенту, що негативно впливає на відновлюваності окатишів. Низький показник відновлюваності окатишів потребує додаткових витрат енергії при виробництві чавуну. Збільшення кремнезему в окатишах на 1,0% призводить до збільшення собівартості виробництва сталі на 4 – 7 дол. США/тон [10]. Паралельно з цим, використання окатишів з меншим вмістом порожньої породи і додаванням флюсу може зменшити витрати енергії на 2,5 дол. США, на кожен 1% зменшення вмісту SiO_2 [11].

Вітчизняні дослідження також свідчать про покращення доменної плавки при впровадженні офлюсованих окатишів. Так, збільшення основності окатишів на 0,1 част. од. основності скорочує витрати скіпового коксу на 1,5 - 1,8% [12]. При заміні 1 тони звичайних окатишів на 1 тону безбентонітових окатишів отриманих в умовах промислової фабрики огрудкування ЦГЗК, при виплавці чавуну в доменній печі металургійного заводу імені Г.І. Петровського, витрати вапняку зменшилися на 60 – 65 кг, коксу на 5,3%, а продуктивність печі збільшилась на 3,5% при зменшенні кількості шлаку [1].

В останні роки велику увагу приділяють використанню офлюсованих окатишів у доменній плавці через їх високі показники міцності, кращу здатність до відновлення та показники розм'якшення – плавлення. Як правило, якість окатишів залежить від породи руди, концентрату, пов'язаної з ним пустою породою, типу та кількості доданого флюсу та їх подальшої обробки і взаємодії при виготовленні окатишів.

Зазначені вище фактори спонукають до переходу на використання в доменній плавці офлюсованих безбентонітових окатишів. Аналіз літературних джерел свідчить, що заміником бентоніту при виробництві окатишів може виступати вапно.

Найбільший інтерес при використанні вапна викликає вплив його на міцнісні характеристики сирих та випалених окатишів. Більшість зарубіжних та вітчизняних авторів, що займаються визначенням впливу вапна на міцність

окатишів [13-15], сходяться в думці, що показники міцності сухих та випалених окатишів з використанням вапна не поступаються окатишам з використанням бентоніту та в повній мірі можуть задовольнити потреби доменного виробництва.

Механізм зміцнюючої дії вапна відбувається за рахунок перетворення рідких містків силікатів заліза на залізо кальцієві силікати з одночасним їх збільшення у кількості [16], нижчу температуру утворення феритів і алюмосилікатів кальцію, що також позитивно впливає на міцність окатишів та взаємодії Ca(OH)_2 верхнього шару окатиша з атмосферним CO_2 з утворенням твердого сполучення CaCO_3 [17,18].

Крім того, про покращення показників міцності свідчать досліді, що були виконані в Інституті чорної металургії по ГОСТ 21707 – 76 і продемонстрували, що усадка шару окатишів фракції +10–15 мм з використанням вапна у порівнянні зі звичайними окатишами ЦГЗК зменшилась з 46 до 18 мм, перепад тиску з 107,8 до 62,7 Па, при одночасному збільшені ступеню відновлення з 89,8 до 93,4% [19]. Також незначною є ступінь руйнації (зменшення міцності) випалених окатишів при їх тривалому зберіганні (40 діб), що становить 8,6% (з 2680 до 2510 Н/окатиш) [20] і є наближеною до показників окатишів виготовлених з використанням бентоніту.

Автори робіт [14, 21] свідчать, про зниження міцності сирих окатишів, що викликано трищіноутворюванням, яке в основному виникає за рахунок використання негашеного вапна в процесі огрудкування, що при взаємодії з водою вступає в екзотермічну реакцію з виділенням пари, яка утворює тиск всередині окатишів. В момент, коли пара намагається вивільнитися на поверхню окатиша утворюються пори, що в подальшому перетворюються у тріщини;

Крім покращення параметрів міцності, в окатишах з використанням вапна, також спостерігається підвищення вмісту заліза [22].

На ефективність використана вапна в якості сполучної добавки у виробництві окатишів велику роль відіграють, як якісні характеристики самого матеріалу, так і технологічні процеси: підготовка шихти до огрудкування, оптимізація температурних та часових режимів випалу, точність дозування у заданих межах та інше.

Ступінь впливу вапна на технологічні параметри виробництва окатишів розглянуто в розділі «Оптимізація процесу виробництва окатишів з використанням вапна».

1.4. Вапно. Вимоги до якості та методи його отримання в промислових умовах

1.4.1. Теоретичні відомості про вапно

Вапно виготовляють з природних кальцієво – магнієвих гірських порід, що складаються з карбонату кальцію CaCO_3 та карбонату магнію MgCO_3 , а також домішок у вигляді піску та глини. При нагріванні в печі кальцієво – магнієвих порід до температури $900 - 1300^\circ\text{C}$ вони розкладаються на окис кальцію (CaO), окис магнію (MgO), та вуглекислий газ (CO_2). Отриманий продукт, крім чистих окислів, завжди містить деяку кількість інших речовин (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) та їх поєднання з CaO .

По виду основного окислу (CaO або MgO) вапно поділяється на кальцієве, магнезіальне та доломітове. Кальцієве вапно містить 40 - 96% CaO і до 8% MgO , виробляється шляхом використання для випалу вапняку з низьким вмістом доломіту. Магнезіальне вапно містить в собі 50 - 85% CaO і до 20% MgO , доломітове вапно – 50 - 80% CaO і до 40% MgO [23].

Кожен окремих вид вапна характеризується певною активністю, яка в свою чергу, регламентується областю використання та специфікою процесу виробництва. Властивості готового вапна на пряму залежать від властивостей

вихідного вапняку, типу печі та палива, що використовується в процесі випалу. Наприклад, при випалу вапняку в печах з використанням коксу отримують вапно з середньою та низькою активністю, а в печах з використанням природного газу з паралельними потоками – з високою активністю.

Властивості вапна визначаються, головним чином, вмістом активних СаО та MgO і чим вищим є вміст активних окислів, тим краще якість готового вапна.

1.4.2. Технологія виробництва вапна

Дані досліджень [24], що були проведені на дослідно – промисловій фабриці ЦГЗК, свідчать що міцність випалених окатишів залежить від коефіцієнту активності вапна і тем вище міцність, чим вище значення коефіцієнту. При цьому постає питання економічної доцільності використання вапна з високим коефіцієнтом активності і способу його отримання.

Основними етапами у виробництві вапна є:

- видобуток вапняку;
- підготовка вапняку до випалу;
- випалення вапняку;
- зберігання вапна та його транспортування.

Класична технологічна схема отримання вапна може бути представлена наступним чином:

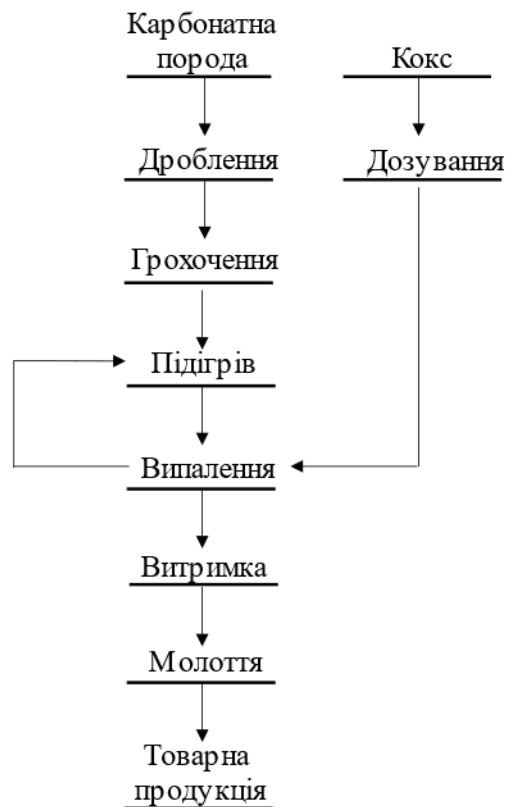


Рисунок 1.2. – Технологічна схема виробництва вапна.

Виробництво вапна є енергоємним процесом. Вартість енергії складає 50 – 60% вартості готової продукції. У випальних печах використовують тверде, рідке та газоподібне паливо, а також горючі відходи і біомасу. Як було зазначено вище, використання палива для печей лімітується вимогами до якості готового вапна. Тенденція останніх років свідчить про перехід у використанні в якості палива горючих відходів, замість горючих корисних копалин. В таблиці 1.3. наведено дані з розподілом видів палива, що було використано для виробництва вапна у ЄС в 2003 році [25].

Таблиця 1.3. – Розподіл по виду палива, що використовувалося для виробництва вапна у ЄС в 2003 р.

Вид палива	Доля, %
Газоподібне паливо	43,0
Тверді корисні копалини	41,0
Рідкі корисні копалини	7,0
Горючі відходи	8,0
Біомаса	1,0

1.4.3. Промислові агрегати для отримання вапна

Вапно в промислових масштабах отримують у випальних печах. Станом на 2006 рік [25], в Європейському Союзі (включно з Великобританією) налічувалося 211 агрегатів з виробництва товарного вапна, що поділяються на 6 основних типів печей, а саме:

- Довгі обертові печі (LRK);
- Обертові печі з теплообмінником поза піччю (PRK);
- Регенеративні печі з паралельним потоком матеріалу (PFRK);
- Кільцеві шахтні печі (ASK);
- Шахтні пересипні печі (MFSK);
- Печі інших конструкцій (двошахтні печі, багатокамерні шахтні печі, печі з поворотним подом) (OK).

Найбільше розповсюдження отримали PFRK та OK печі з сумарною долею в 60% від загальної кількості печей.

1.4.3.1 Шахтні печі

Шахтна піч для випалу вапняку представлена у вигляді вертикальної шахти із сталевим кожухом, що має багатошарову футеровку. Вапняк подається у верхню частину печі, де за допомогою завантажувально – розподільчого пристрою рівномірно розподіляється по горизонтальному перетину печі.

Завантаження вапняку здійснюється автоматично, що дозволяє підтримувати постійний рівень матеріалу в печі. У печі вапняк проходить через три зони шахти печі, перетворюючись у вапно. Принцип дії шахтної печі відображено на рисунку 1.3.

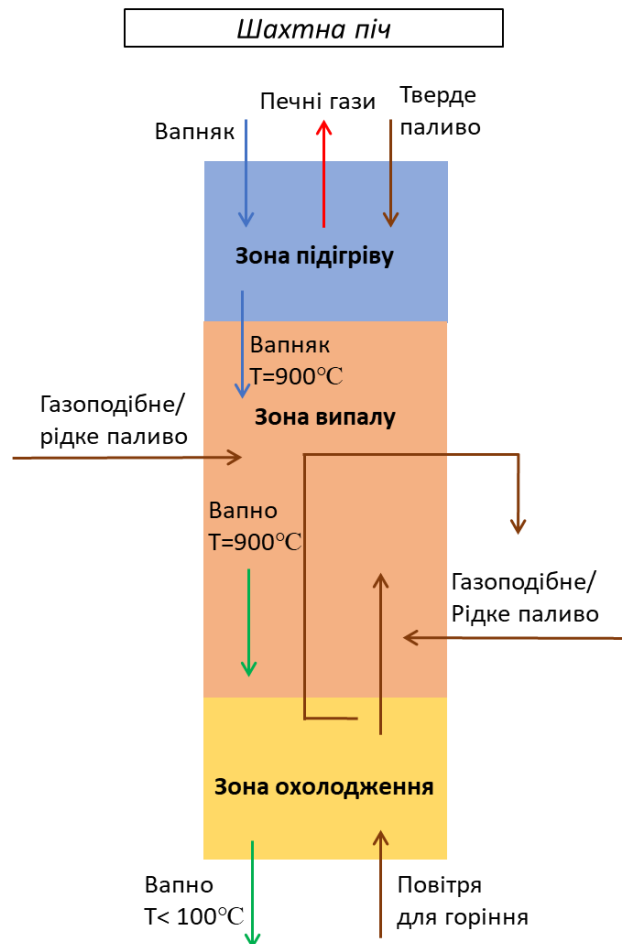


Рисунок 1.3. – Принцип дії шахтної печі.

У верхній частині печі розташований димовідвід через який відводяться газі. Завдяки спеціальній конструкції димоходу, газі рівномірно піднімаються по всьому профілю печі, забезпечуючи рівномірний випал вапняку.

В зоні попереднього нагріву, розташований у верхній частині печі, відбувається нагрів вапняку за рахунок тепла газів, після чого вапняк потрапляє в зону випалу з температурою $900 - 950^{\circ}\text{C}$. В зоні випалювання встановлено пальники через які паливо і повітря подаються в шар вапняку.

Після проходження зони кальцинації вапно переміщається в зону охолодження, в якій охолоджується за рахунок холодного повітря, що подається знизу печі.

Вивантаження вапна відбувається за рахунок зворотно – поступального руху колосникових ґрат. Перетин решіток підбираються з урахуванням фракції вапняку і гранулометричного складу готового вапна.

В шахтній печі отримують негашене вапно, яке по своїй активності поступається вапну, що отримують в обертових печах, при тому ж рівні CaCO_3 . В якості палива в печі використовують малозольний кокс, розміри якого наближені до розміру вапняку. Основні технічні характеристики шахтної печі представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. – Технічні характеристики шахтних пересипних печей [26].

Параметр	Значення
Спосіб подачі палива	Суміш з вапняком
Продуктивність, т/доба	60 – 200
Витрати тепла, МДж/т. вапна	3800 – 4700
Витрати електричної енергії, кВт год/т. вапна	5 – 15
Конструкція	Вертикальний футерований циліндр
Крупність вапняку, мм	20 – 200
Вид палива	Кусковий металургійний кокс і антрацит
Повітря для горіння	Охолоджуюче повітря з основи печі
Вивантаження вапна	Обертova пластина

1.4.3.2 Довгі обертові печі

Обертові печі дозволяють випалювати вапняки, які неможливо використовувати в шахтних печах.

У довгих обертових печах випалюють маломіцну карбонатну сировину, яка містить велику кількість дрібної фракції і має вологість до 40%.

Довгі обертові печі складаються з циліндра (діаметром 2,0 – 4,5 м. і довжиною до 150 м.), що обертається, який має кут нахилу 1,0 – 4,0 град. Основні технічні характеристики довгих обертових печей представлені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5. – Технічні характеристики довгих обертових печей [26].

Параметр	Значення
Спосіб подачі палива	Пальник в нижній частині печі
Продуктивність, т/доба	160 – 1500
Витрати тепла, МДж/т. вапна	6000 – 9200
Витрати електричної енергії, кВт год/т. вапна	18 – 25
Конструкція	Наклонений футерований циліндр
Крупність вапняку, мм	2 – 60
Вид палива	Газоподібне, рідке та подрібнене тверде паливо
Повітря для горіння	Підігріте повітря з охолоджувача вапна
Вивантаження вапна	до охолоджувача вапна

Вапняк завантажується у верхню частину печі, паливо і повітря подаються у нижню частину. Негашене вапно вивантажується з печі в

охолоджувач в якому вапно підігріває повітря для подачі його у піч. Принцип дії довгої обертової печі відображено на рисунку 1.4.

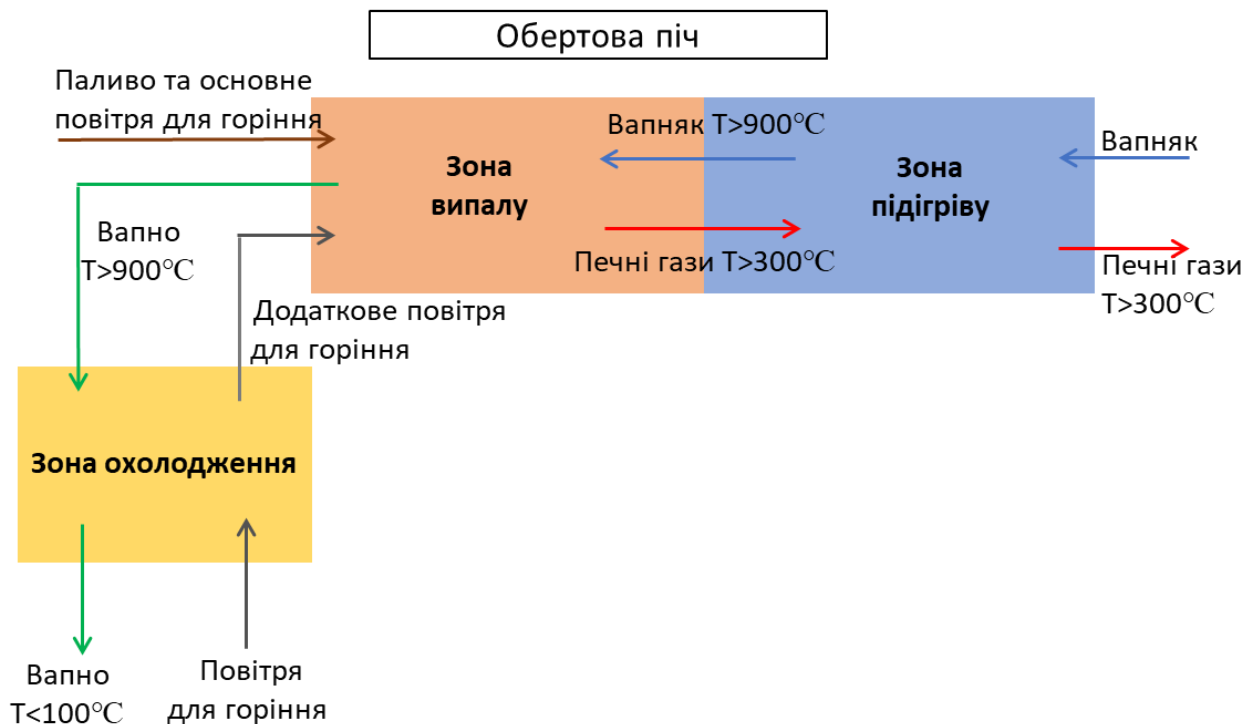


Рисунок 1.4. – Принцип дії довгої обертової печі.

Втрати тепла в обертовій печі набагато вищі ніж в печах шахтного типу і складають близько $8 - 12 \text{ кВт/м}^2$, а температура газів складає 370°C .

1.4.3.3 Регенеративні печі з паралельним потоком матеріалу

Регенеративні печі з паралельним потоком матеріалу мають особливість у вигляді двох поєднаних перехідним каналом циліндричних шахт, що дозволяє використовувати зону підігріву кожної шахти, як регенеративний теплообмінник.

Режим роботи таких печей поділяється на два рівні періоди тривалістю $8 - 15$ хв. На першому етапі паливо подається в першу шахту для випалу вапняку. Далі для охолодження випаленого вапна знизу шахти першої печі подається

охладжуюче повітря, яке в поєднанні з продуктами горіння ($t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$) через перехідний канал потрапляє в другу шахту.

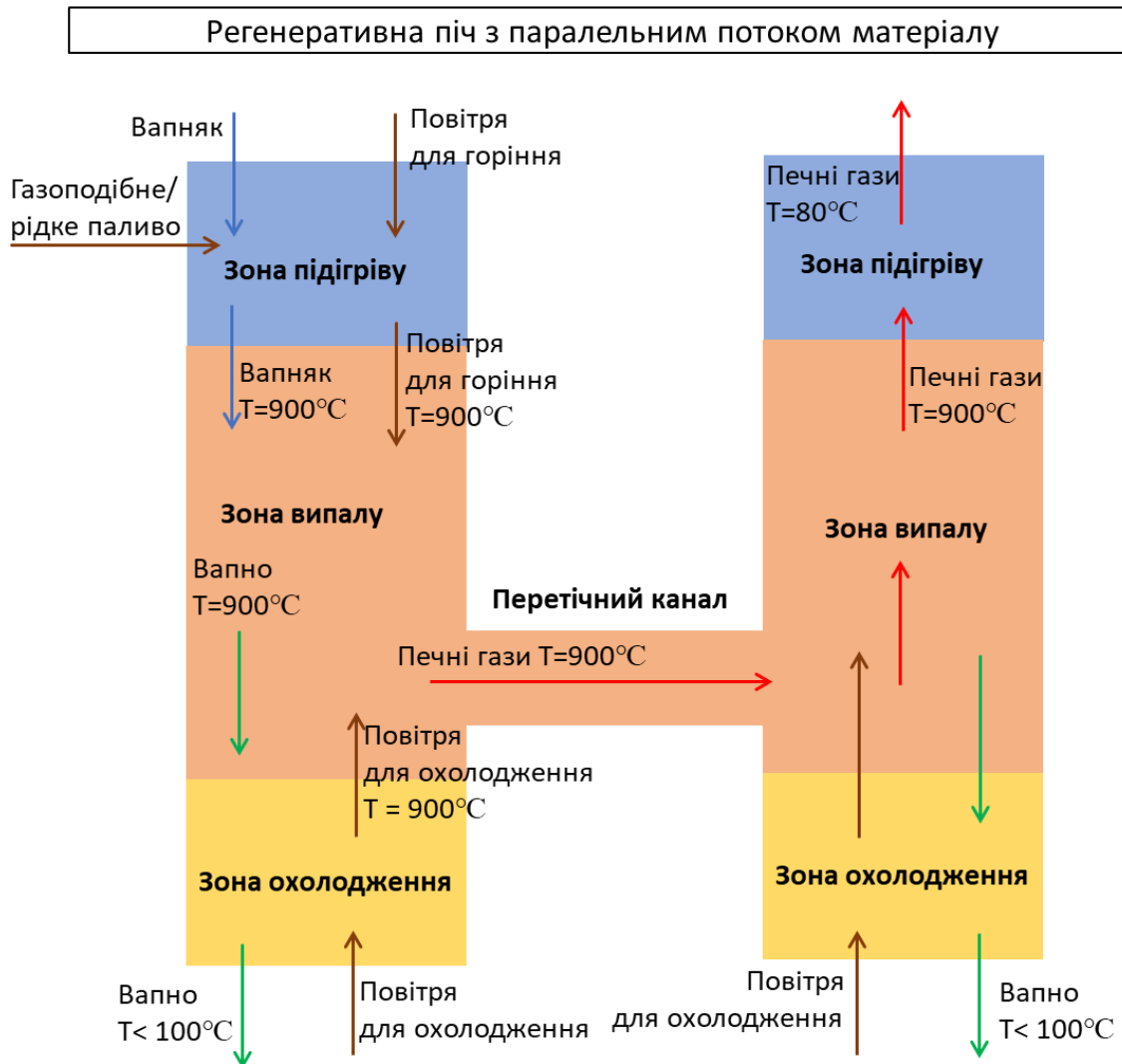


Рисунок 1.5. – Принцип дії регенеративної печі з паралельним потоком матеріалу.

Основні технічні характеристики регенеративних печей з паралельним потоком матеріалу представлені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6. – Технічні характеристики регенеративних печей с паралельним потоком матеріалу [26].

Параметр	Значення
Спосіб подачі палива	через пальники в шар вапняку
Продуктивність, т/доба	100 – 600
Витрати тепла, МДж/т. вапна	3600 – 4200
Витрати електричної енергії, кВт год/т. вапна	20 – 41
Конструкція	Два або три вертикальні футеровані циліндри поєднані перехідними каналами
Крупність вапняку, мм	10 – 200
Вид палива	Газоподібне, рідке та подрібнене тверде паливо, біомаса
Повітря для горіння	90% подається зверху і 10% через пальники
Вивантаження вапна	Обертова пластина

1.4.4. Вітчизняний досвід отримання вапна

У вітчизняній практиці для виробництва вапна використовують горизонтальні випалювальні машина ОПР, кільцеві шахтні випалювальні машини РОП, конвеєрні машини КМ, машину БЦРМ, шахтні печі та печі кип'ячого шару. Найбільше розповсюдження отримали шахтні печі, причиною чого стали простота конструкції, низькі капітальні витрати на будівництво і висока теплова ефективність. Витрати тепла на виробництва вапна становлять $3560 \div 4000$ кДж/кг на коксі, 4520 кДж/кг на антрациті, 5280 кДж/кг на

природному газі, 5090 кДж/кг на мазуті [27,28], при теоретично необхідних витратах для одержання 1 кг CaO в 3180 кДж [29].

1.4.5. Вимоги до якості агломераційного вапна

Якість вапна, що використовується в процесах огрудкування залізорудної сировина визначається масовою часткою у вапні (CaO+MgO)акт, величиною втрат при прожарюванні та реакційною здатністю. Найкраще вимоги до агломераційного вапна описує галузевий стандарт ГСТ 14-16-35-88, що був розроблений Донецьким науково-дослідним інститутом чорної металургії (ДонНДІчорметом), який передбачає класифікацію вапна на дві категорії за крупністю: –3 мм і –10 мм і три сорти за масовою часткою CaO + MgO.

Залежно від масової частки хімічних сполук агломераційне вапно згідно з ТУ 14-16-43-90 ділять на 2 сорти [30].

Таблиця 1.7. –Хімічний склад агломераційного вапна (ТУ 14-16-43-90)

Хімічна сполука	Масова частка, %	
	1-й сорт	2-й сорт
(CaO+MgO), не менше	91,0	81,0
MgO, не більш	8,5	9,0
SiO ₂ , не більш	3,5	4,0
В.п.п., не більш	4,0	11,0

1.4.6. Аналіз ринку вапнякової галузі України

Вапнякова галузь в Україні представлена трьома крупними виробниками: ПрАТ "Новотроїцьке рудоуправління", ТзОВ "Виробнича компанія "Гірничодобувна промисловість" (Група ГДП) та ПрАТ "Тернопільський кар'єр", загальна частка яких складає 74,0% всього виробництва вапняку.

За даними Української асоціація вапнякової промисловості структура виробництва вапняку в 2018 році по підприємствах України представлена на рисунку 1.6.

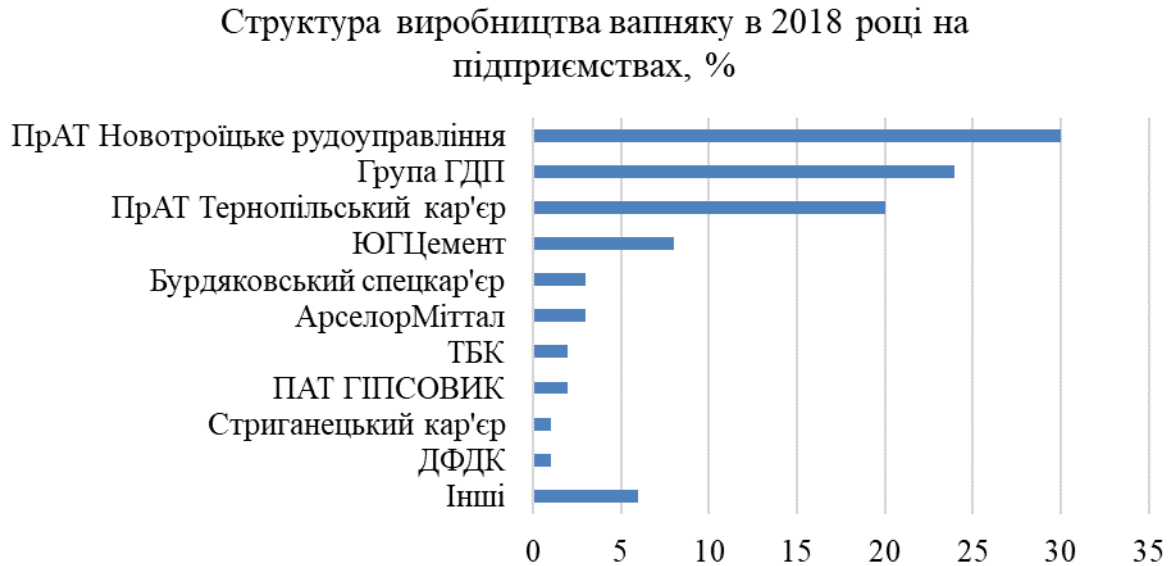


Рисунок 1.6 – Структура виробництва вапняку в Україні в 2018 році по підприємствах.

Після різкого спаду у 2014 - 2015 роках, ринок вапняку в 2017 році стабілізувався на рівні близько 16 млн. т. Разом з тим, щорічно збільшувався імпорт з піковим значенням у 2,7 млн. т. в 2018 році. Ретроспективна ситуація на ринку вапняку України представлена на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7. – Динаміка об'ємів ринку вапняку (виробництво, імпорт), млн. т.

В 2014 році Україна втратила контроль над кар'єрами в Криму та на окупованих територіях частини Донецької та Луганської областей, що призвело до зменшення вітчизняного виробництва вапнякової сировини та до збільшення імпорту, що чітко відслідковується на рисунку 1.7.

Основним споживачем видобутого вапняку в Україні є металургія, споживання якого складає близько двох третин всього об'єму видобутку.



Рисунок 1.8. – Структура споживання вапняку в 2019 році за галузям.

В останні місяці 2019 року гірничо – металургійний комплекс показав різкий спад. По факту було зупинено повністю або частково кілька металургійних підприємств (ДМК, ДМЗ, виробництво агломерату Південним ГЗК). На кризові передумови 2019 року також наклалася ситуація з протидією поширенню коронавірусу, що в результаті зумовлює посилення негативних очікувань в майбутніх періодах.

Нижче на рисунку 1.9. наведена динаміка виробництва та імпорту вапняку за 2019 рік. Загальний об'єм виробництва якого склав 2195,6 тис. т., імпорт – 85,4 тис. т. [32].

Динаміка об'ємів виробництва та імпорту вапна в Україні
за 2019 рік, тис.т.

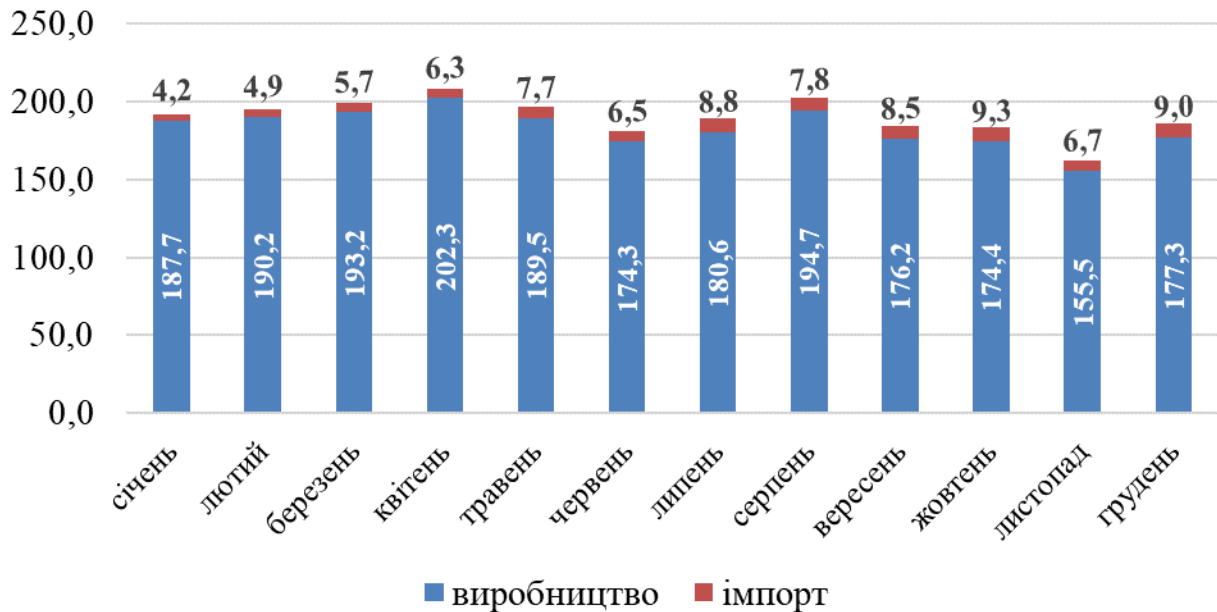


Рисунок 1.9. – Динаміка об'ємів виробництва та імпорту вапна в Україні за 2019 рік.

Основним споживачем, як і у випадку з вапняком залишається металургійна галузь. Нижче на рисунку 1.10., наведено структуру ринку вапна за галузями виробництва за 2018 рік.

Структура ринку вапна за галузями виробництва у 2018 році



Рисунок 1.10. – Структура ринку вапна за галузями виробництва у 2018 році.

За підсумками 2019 року 67% вапна в Україні виробили металургійні підприємства [33].

До найбільших виробників вапна в Україні входять:

- ММК ім. Ілліча – 15%;
- «Азовсталь» – 15%;
- «АрселорМіттал Кривий Ріг» – 14%;
- ДМК – 11%;
- «Запоріжсталь» – 10%;
- Інтерпайп НТЗ – 2%.

З початку 2024 року вищенаведені дані зазнали значних негативних змін.

1.5. Оптимізація процесу виробництва окатишів з використанням вапна

Введення вапна в технологічний процес виробництва окатишів потребує всебічного аналізу, так як від способу введення вапна залежить ефективність його використання та якість готової продукції.

Основними технологічними етапами які потребують додаткового вивчення при введенні вапна в процес виробництва окатишів є:

- підготовка шихтових матеріалів;
- процес огрудкування;
- температурно – часові параметри випалу.

1.5.1. Підготовка вапна до огрудкування шихти

Використання негашеного вапна передбачає збільшення часу на процес його підготовки до огрудкування, а саме на його гідратацію («гашення») : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 63,7 \text{ кДж/моль}$. Саме гідрат оксиду кальцію Ca(OH)_2

утворює пересичений розчин з якого випадає осад колоїдного типу, який і виступає в ролі сполучника. При використанні гашеного вапна $\text{Ca}(\text{OH})_2$, час витримки шихти перед подачею її на огрудкування зменшується.

Для отримання високих показників якості окатишів процес підготовки вапна має забезпечити повну гідратацію, в зв'язку з чим ефективнішим є використання високоактивного вапна зі стабілізованими фізико – хімічними властивостями.

Так за даними [34], оптимальними часовими проміжками підготовки шихти до огрудкування є перемішування впродовж 10 хв., та витримка впродовж 30 хв. Подальше збільшення часу перемішування та витримки не впливає значною мірою на міцнісні характеристики окатишів. Причиною є відносно інтенсивне гасіння вапна впродовж перших 20 хв.

1.5.2. Вплив вапна на процес огрудкування

На ступінь огрудкування головним чином впливають два основні фактори: гранулометричний склад та волога шихти.

Вапно, що водиться в шихту може розглядатися, як регулятор загальної вологості шихти. Процес формування гранул шихти з використанням вапна розвивається інтенсивно та майже не відрізняється від процесу огрудкування з бентонітовою глиною. Хоча сполучні властивості бентонітової глини мають значну перевагу перед вапном, аналіз досліджень [35] показників максимальної молекулярної вологоємності шихти з використанням вапна і бентонітовмістні шихти мають наближені значення. Вирівнювання цих показників відбувається за рахунок різної кількості внесення сполучних добавок, що регламентуються основністю окатишів. Витрати вапна в 5 – 8 разів більше, ніж бентонітової глини. Таким чином, при виробництві окатишів можуть використовуватися концентрати підвищеної вологості без зміни кількості витрат вапна.

1.5.3. Процес випалу окатишів з використанням вапна

В лабораторних дослідженнях [15,36] з випалу окатишів двох типів з використанням вапна та вапняку з додаванням бентоніту, було встановлено, що найкращім з точки зору показника холодної міцності є випал окатишів впродовж 15 хв., при температурі випалу 1300 °С. При цьому, випал окатишів впродовж 10 хв. при температурі 1280 °С також демонструє хороші показники холодної міцності в 260 кг/окатиш для комбінації вапняку з бентонітом і 290 кг/окатиш для окатишів з використанням вапна. Такі результати пов'язані з кращою дисперсійною здатністю $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в окатишах ніж у вапнякового дріб'язку.

1.5.4. Результати промислових випробувань окатишів з використанням вапна при їх виробництві

Промислові випробування виробництва окатишів з вапном на Північному ГЗК, що були виконані на дослідно – промисловій установці оснащеної випалювальною машиною площею 108 кв.м. і описані в роботі [37] свідчать про можливість збільшення основності окатишів, так як використання вапна в шихті зменшує потребу у вапняку, додаткові витрати якого звужують допустимі межі температур випалу окатишів, зменшує продуктивність випалювальної машини.

Результати використання окатишів з додаванням вапна у шихті (60% залізорудної частини) доменної печі №6 Дніпропетровського металургійного заводу імені Петровського показали зниження витрат коксу на 0,8% і збільшення продуктивності печі на 1,3%.

1.6. Висновки за Розділом 1 та постановка задач досліджень

Ресурсний фонд України по об'ємам видобутку залізної руди має показник у 133,0 млрд. т. та лише 25 з 60 родовищ корисних копалин розробляються в наш час, що свідчить про значний потенціал в цьому напрямку.

Більша половина видобутої в Україні залізної руди використовується у виробництві окатишів. Цей фактор обумовлює необхідність покращення якості окатишів, з метою підвищення їх ринкової привабливості на внутрішньому і світових ринках, в зв'язку з тим, залізорудна галузь відіграє важливу роль в економіці країни у всі часи.

Покращення якості випалених окатишів, з огляду на вимоги сучасного доменного виробництва, зводиться до наступних основних показників: максимізація вмісту заліза загального, забезпечення основності окатишів, достатньої для виключення вапняку з доменної шихти, а також їх висока механічна прочність.

Ряд вітчизняних та зарубіжних лабораторних та промислових досліджень свідчать про те, що покращити вищезгадані показники можна за рахунок впровадження технології виробництва залізорудних окатишів з використанням вапна в шихті огрудкування.

У відношенні міцності окатишів з використанням вапна сформувалося два протилежні точки зору, з одного боку є дослідження, що свідчать про покращення цих показників, з іншого – навпроти, зниження показника міцності.

Використання вапна в процесі виробництва окатишів, як замітника бентоніту, збільшує вміст заліза, підвищує основність окатишів, що призводить до зниження собівартості тони чавуну та підвищення продуктивності доменної печі.

Паралельно з покращенням якості товарних окатишів, введення вапна у шихту огрудкування має позитивний вплив на гомогенізацію шихти при

змішуванні, процес її огрудкування, за рахунок оптимізації вологості шихти, а також температурних режим випалу.

На технологічні процеси і фізико – хімічні властивості окатишів головним чином впливає якість підготовленого вапна. Для отримання високих показників якості окатишів процес підготовки вапна має забезпечити повну гідратацію, в зв'язку з чим ефективнішим є використання високоактивного вапна зі стабілізованими фізико – хімічними властивостями. Основними з яких є масова частка $(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{акт}}$, величина втрат при прожарюванні та реакційна здатність.

Для отримання високих показників якості окатишів процес підготовки вапна має забезпечити повну гідратацію, в зв'язку з чим ефективнішим є використання високоактивного вапна зі стабілізованими фізико – хімічними властивостями.

Оптимальним часом підготовки шихти до огрудкування з використанням вапна є перемішування впродовж 10 хв., та витримка впродовж 30 хв., що позитивно впливає на міцнісні характеристики окатишів. Причиною є відносно інтенсивне гасіння вапна впродовж перших 20 хв.

Основними задачами подальшого дослідження з впровадження вапна у виробництві залізородних окатишів, вбачаю наступними:

1. Провести дослідження впливу вапна на міцнісні характеристики окатишів, а саме:
 - 1.1. розробити методику дослідження;
 - 1.2. виконати дослідження, згідно з методикою;
 - 1.3. проаналізувати отриманні дані;
 - 1.4. оформити результати досліджень.
2. Вплив якості вапна на процес огрудкування та випалу окатишів.
3. Вплив технологічних параметрів отримання окатишів на показники процесу і якості готового продукту.

4. Вибір та обґрунтування раціонального способу отримання вапна для використані в шихті огрудкування.

5. Вибір та обґрунтування раціонального способу отримання вапна для виробництва окатишів.

РОЗДІЛ 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

2.1. Методика проведення досліджень

В доменному виробництві вапняк використовується як джерело СаО для нейтралізації всіх кислих окислів та отримання рідкого шлаку відповідної основності. Часткова заміна вапняку в доменній плавці може бути досягнута шляхом використання залізорудних офлюсованих окатишів. Наявність СаО в окатишах покращує їх фізико – механічні властивості, що робить їх більш придатними для подальшого використання в доменній печі.

Введення вапна при виробництві окатишів реалізується шляхом його прямого додавання в кількості 1,0 – 2,0% [38,39].

Використання гашеного вапна у виробництві залізорудних окатишів сприяє покращенню їх міцнісних властивостей, як в сирому так і випаленому вигляді [40]. Так, за даними досліджень [41], використання гашеного вапна у виробництві окатишів продемонструє високі показники міцності на стискання сирих окатишів (4,0 кг/окатиш), кількість скидань (10,4 рази) і міцність висушених окатишів.

2.1.1. Мета досліджень

Метою досліджень в даній роботі є порівняння показників міцності офлюсованих окатишів з використанням вапняку та бентоніту з окатишами з використанням вапна при заданій основності для двох типів окатишів 0,25 част. од. осн., а також можливість їх подальшого використання в доменному виробництві.

2.1.2. Обладнання

1. Набор сит лабораторних
2. Гранулятор тарілчастий ГТ-0,6
3. Барабанний змішувач лабораторний 0,6x1,0 м
4. Електропіч муфельна СНОЛ 30/1300
5. Шафа сушильна Labexpert 3015 (15 л, КТ+10...300 С)
6. Вимірювач міцності гранул ВМГ – 1М
7. Малогабаритний прес дослідний ASM – 5
8. Установка по визначенню міцності сирих окатишів (Gupta2010).

2.1.3. Сировинні матеріали

При виконанні даної роботи використовувалися залізорудний матеріал, бентонітова глина та вапняк. Частина вапняку випалювалася в муфельній печі СНОЛ 30/1300 при температурі 950°C впродовж декількох години з метою отримання вапна для використання в дослідній роботі. Результати хімічного аналізу матеріалів представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. – Хімічний склад матеріалів, що використовувалися в дослідній роботі

Найменування матеріалу	Хімічний склад, %						Вміст вологи, %
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	В.п.п.	
Залізорудний матеріал	65,28	1,4	2,5	0,11	0,028	-	-
Вапняк	-	1,7	0,8	50,51	0,7	42,90	-
Вапно	-	0,73	1,12	95,1	0,8	-	-
Бентоніт	-	60,84	17,81	0,94	2,57	-	9,59

2.1.4. Блок схема процесу дослідження

Блок – схеми процесів проведення досліджень представлена на рисунках 2.1. та 2.2.

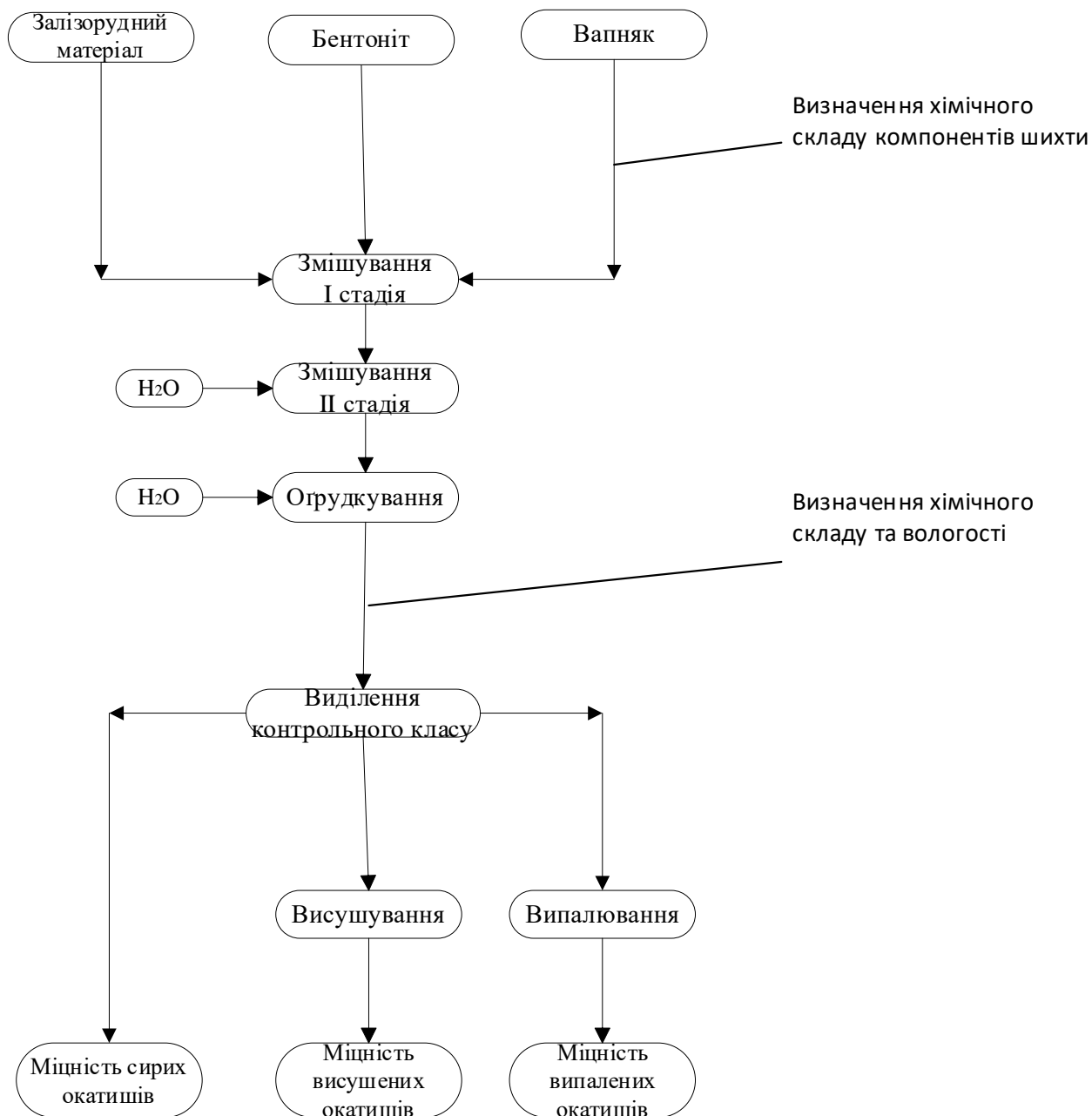


Рисунок 2.1. – Блок – схема проведення досліджень показників міцності окатишів з використанням вапняку з бентонітом при заданій основності 0,25 част. од. основності.

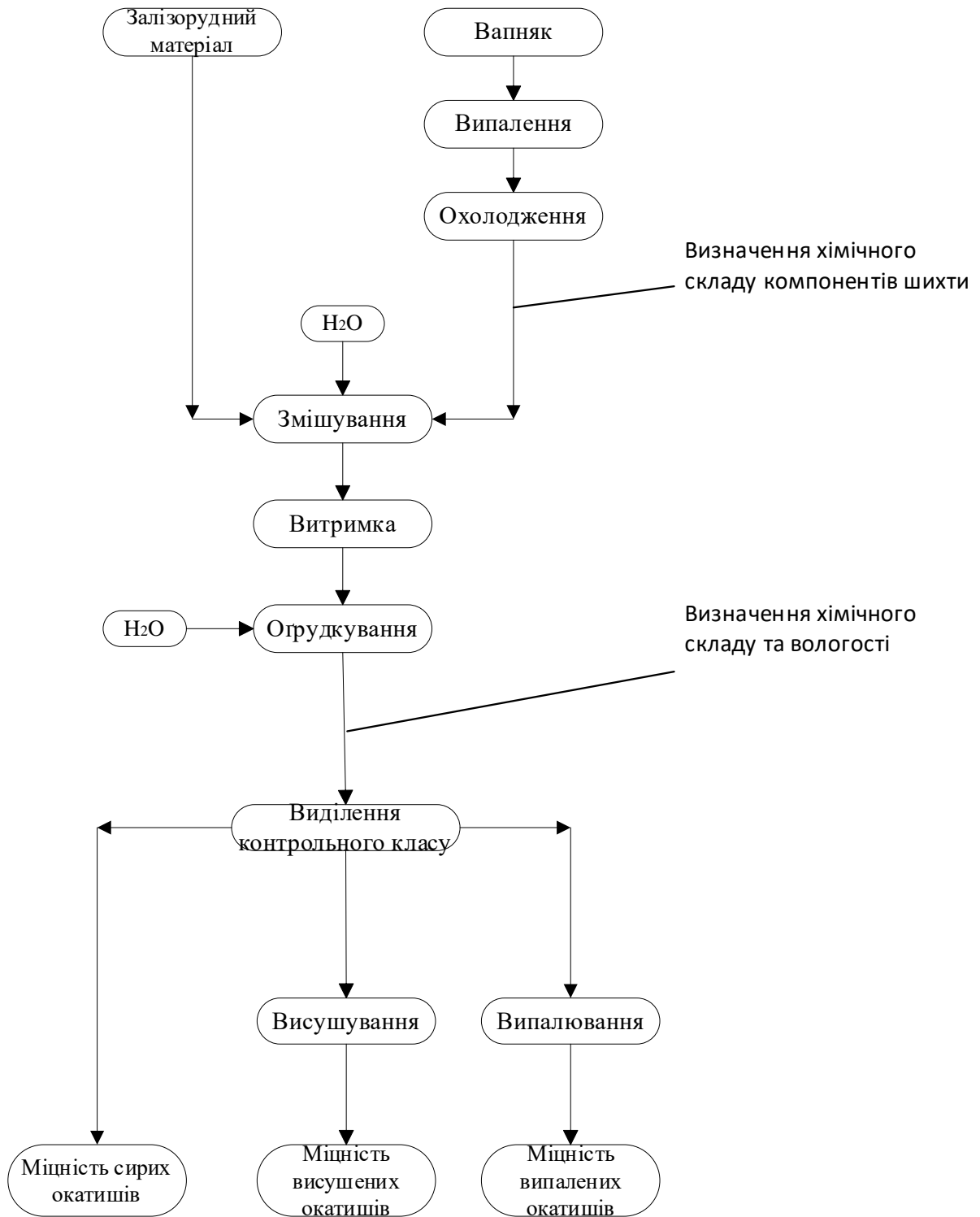


Рисунок 2.2. – Блок – схема проведення досліджень показників міцності окатишів з використанням вапна при заданій основності 0,25 част. од. основності.

2.1.5. Хід виконання досліджень

2.1.5.1 Підготовка шихти для огрудкування

Дослідні шихти представляють з себе суміш залізородного матеріалу з вапняком та бентонітом – окатиші групи А (Окатиші А), а також суміш залізородного матеріалу з вапном – окатиші групи Б (Окатиші Б).

Підготовлені шихтові матеріали змішувалися у пропорціях з урахуванням розрахункової основності в 0,25 част. од. основності. Витрати компонентів (у відсотках) на одиницю залізородної частини шихти представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. – Витрати компонентів (у відсотках) на одиницю залізородної частини шихти окатишів групи А та Б

	Бентоніт,(%)	Вапняк,(%)	Вапно,(%)
Окатиші А	0,30	0,95	0,00
Окатиші Б	0,00	0,00	0,45

З метою отримання максимально гомогенної суміші перемішування компонентів шихти окатишів А виконувалося в два етапи. На першому етапі матеріали змішувалися в лабораторному барабані в сухому вигляді впродовж 5 хв. На другому етапі матеріали змішувалися в лабораторному барабані з додаванням води, впродовж 5 хв. Змішування шихти окатишів Б відбувалося в лабораторному барабані в один етап з додаванням води для гідратації вапна з подальшою витримкою. Час змішування складав 10 хв, час витримки складав 10 хв.

Для формування контрольних проб окатишів двох типів брали по 2,0 кг підготовленої сухої шихти з метою отримання достатньої кількості зразків для подальших досліджень.

2.1.5.2 Огрудкування шихти

Хімічний склад шихт окатишів групи А та окатишів групи Б, що огрудковувалися наведені в таблиці 2.3. Розрахунок основності виконувався по спрощеній формулі: $(CaO)/(SiO_2)$

Таблиця 2.3. – Хімічний склад шихт окатишів групи А та групи Б

	Хімічний склад, %				Основність, част. од. осн.
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	
Окатиші А	0,59	2,36	2,49	0,99	0,25
Окатиші Б	0,54	2,18	2,46	1,00	0,25

Сирі окатиші отримували в лабораторному тарілчастому огрудкувачі ГТ-0,6 з діаметром тарелі 600 мм, висотою борту 200 мм, швидкістю обертання 120б/хв та кутом нахилу 45 град.

Завантажена в огрудкувач шихта в процесі огрудкування зволожувалась для отримання оптимальної вологи огрудкування 8,5%.

Масову долю вологи (W) у відсотках вираховували за наступною формулою:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \cdot 100\%$$

де m_1 – маса ємності з матеріалом до висушування, г;

m_2 – маса ємності з матеріалом після висушування, г;

m – маса пустої ємності, г.

Розрахунку проводилися з точністю до першого десяткового знаку.

Маса матеріалу для визначення вологості складала 25 – 30 г.

2.1.5.3 Сушка та випалення окатишів

Висушування сирих окатишів відбувалося в сушильній шафі Labexpert 3015 при температурі 105 °С впродовж 4 годин.

Термічна обробка окатишів виконувалася у відповідності з розробленими температурно – часовими режимами, котрі для кожної партії дослідних окатишів були однаковими. Партія сирих окатишів відправлялася в муфельну електричну піч СНОЛ 30/1300, де відбувався процес їх випалення при температурах 1280°С та 1300 °С з часовими проміжками у 5 хв і тривалістю від 10 до 25 хвилин з подальшим випробуванням партії на показники міцності та визначення хімічного складу. Результати представлені в таблицях 2.4. та 2.5.

Висушені та випалені окатиші піддавалися просіюванню з метою виділення контрольного класу, шляхом відсіювання класу мінус 5 мм для подальшого визначення їх міцнісних властивостей.

2.1.5.4 Оцінка фізико – механічних властивостей окатишів

Міцність сирих окатишів (МСО).

Міцність сирих окатишів визначалася за допомогою установки Gupta_2010, зображена на рисунку 2.3.

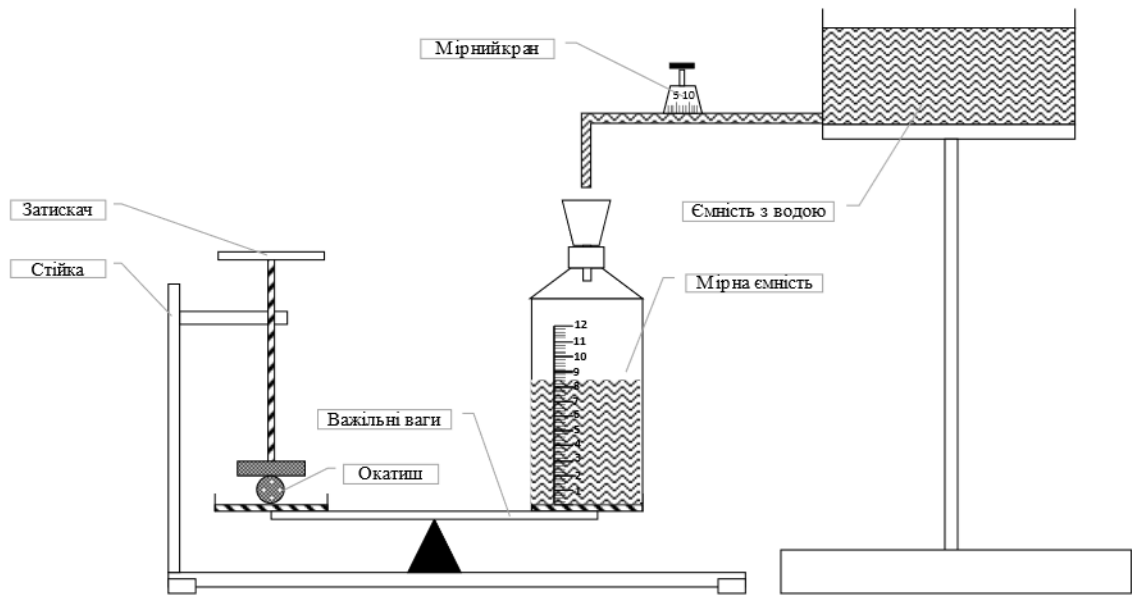


Рисунок 2.3. –Установка по визначенню міцності сирих окатишів (Gupta_2010).

Випробування піддавалися 10 окатишів контрольного класу.

В ході випробувань сирі окатиші поштучно розмішувалися на чаші ваг і фіксувалися за допомогою затискача, після чого мірну ємність наповнювали водою. За допомогою регулюючого крану контролювали ступінь та швидкість наповнення ємності. В ході дослідження, визначалася сила (об'єм рідини), необхідна для стискання окремих окатишів, при якій відбувається руйнація.

Міцність окатиша на стискання $P_{МСО_СЕР}$ розраховувалася по формулі:

$$P_{МСО_СЕР} = \frac{\sum P_i}{n}$$

де P_i – міцність на стискання одного окатиша, кг;

n – кількість окатишів, що були протестовані, шт.

Результати округлялися до одного десяткового знаку, кг/ок.

Отримані в ході випробувань результати представлено у таблиці 2.5.

Міцність сирих окатишів на скидання (МСС).

Міцність на скидання визначалася шляхом скидання сирих окатишів на металеву плиту з висоти 450 мм з виявленням та фіксацією на них тріщин. Скидання повторювалося декілька разів – до повного руйнування окатиша.

Міцність на скидання – n (рази), вираховувалася по формулі:

$$n = \frac{\sum n_i}{10}$$

де n_i – кількість скидань одного окатиша до моменту порушення його цілісності, рази

Отримані в ході випробувань результати представлено у таблиці 2.5.

Міцність висушених окатишів (МВСО).

Міцність окатишів на стиснення визначалася згідно з ДСТУ 3206-95 «Окатки залізородні. Метод визначення міцності на стиснення».

Дослідження проводилися за допомогою лабораторного вимірювача міцності гранул ВМГ – 1М, який фіксував максимальне навантаження на окатиш.

Міцність окатиша на стискання $P_{\text{МВСО_СЕР}}$ розраховувалася по формулі:

$$P_{\text{МВСО_СЕР}} = \frac{\sum P_i}{n}$$

де P_i – міцність на стискання одного окатиша, кг;

n – кількість окатишів, що були протестовані, шт.

Результати округлялися до одного десяткового знаку, кг/ок.

Отримані в ході випробувань результат представлено у таблиці 2.5.

Міцність випалених окатишів (МВПО).

Міцність випалених окатишів на стиснення визначалася згідно з ДСТУ 3206-95 «Окати залізородні. Метод визначення міцності на стиснення».

Дослідження проводилися за допомогою лабораторного гідравлічного пресу ASM-5, що фіксував максимальне навантаження на окатиш.

Міцність окатиша на стиснення $P_{\text{МВПО_СЕР}}$ розраховувалася по формулі:

$$P_{\text{МВПО_СЕР}} = \frac{\sum P_i}{n}$$

де P_i – міцність на стиснення одного окатиша, кг;

n – кількість окатишів, що були протестовані, шт.

Результати округлялися до одного десяткового знаку, кг/ок.

Отримані в ході випробувань результати представлено у таблиці 2.5.

2.1.6. Результати та їх аналіз

Хімічний склад окатишів А та окатишів Б, що були випалені при температурі 1280°C представлені в таблиці 2.4. Розрахунок основності виконувався по спрощеній формулі: $(CaO)/(SiO_2)$

Таблиця 2.4. – Хімічний склад випалених окатишів серії А та серії Б.

	Хімічний склад, %					Основність, част.од.осн.
	Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	
Окатиші А	65,1	0,64	2,59	2,57	1,04	0,247
Окатиші Б	65,5	0,61	2,41	2,51	1,02	0,253

За даними таблиці 11 видно, що вміст заліза загального в окатишах серії Б на $65,5 - 65,1 = 0,4\%$ вище ніж в окатишах серії А, при цьому вміст кислих оксидів в окатишах А вищий ніж в окатишах серії Б, це пояснюється наявністю бентонітової глини в шихті окатишів А.

Усереднені результати показників міцності сирих та висушених окатишів, що були отримані в ході проведених досліджень представлені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. – Міцнісні властивості сирих та висушених окатишів групи А та групи Б

	Волога, %	Основність, част.од.осн.	МСО, кг/ок	МСС, рази	МВСО, кг/ок
Окатиші А	8,5	0,25	1,3	9,0	5,5
Окатиші Б	8,8	0,25	1,5	12,0	3,5

За даними таблиці 2.5. видно, що сирі окатиші з використанням гашеного вапна демонструють більш високу міцність на стискання та скидання, ніж окатиші з використанням вапняку та бентоніту. Це пояснюється тим, що в момент гідратації випаленого вапна утворюється $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який має здатність диспергувати на дуже дрібні частки у вологому середовищі, що покращує ступінь розподілу CaO і підвищує міцність окатишів. В свою чергу, окатиші з додаванням вапняку і бентоніту демонструють краще значення МВСО, ніж окатиші з додаванням вапна. Це пояснюється тим, що відбувається руйнування окатишів в ході нагріву, за рахунок виділення парів води, що утворюються в результаті розкладання гідроксиду кальцію.

Отримані в ході досліджень значення МВСО для окатишів з додаванням вапна (3,5 кг/ок) в повній мірі задовольняє вимоги доменного виробництва (2,2 кг/ок).

Результати досліджень міцності випалених окатишів групи А та групи Б в залежності від температурно – часових параметрів їх випалення представлені на рисунку 2.4.

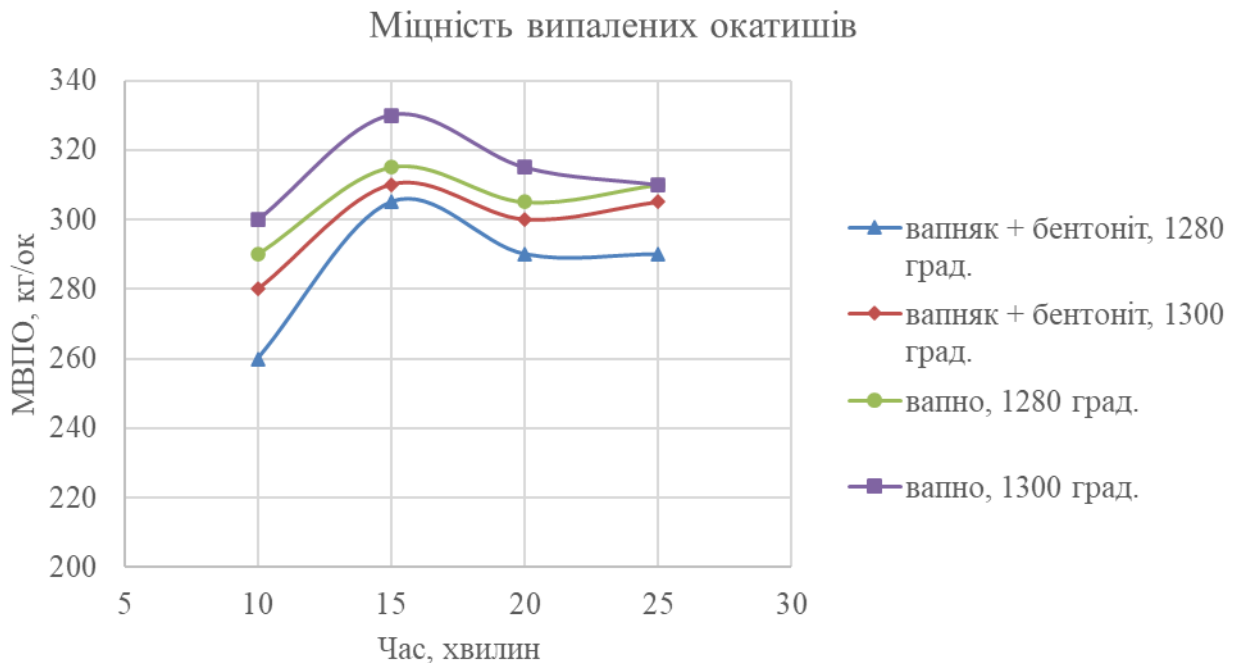


Рисунок 2.4. – Залежність міцності випалених окатишів групи А і групи Б від часу та температури випалювання.

З рисунка 2.4. видно, що найбільше значення МВПО було отримано при випаленні окатишів протягом 15 хв. при температурах 1280 °С та 1300°С. Крім того, при температурі 1300 °С вона вища, ніж при 1280 °С для обох груп окатишів. Показники міцності випалених окатишів Б, вище за показники окатишів А, як при температурі 1280 °С, так і 1300°С.

Значення міцності окатишів при 10 хвилинному випалі з температурою 1280 °С складають для групи А 260 кг/ок і 290 кг/ок для групи Б, що являє собою міцність достатньою для їх подальшого використання в доменній плавці.

Більш високий показник міцності випалених окатишів групи Б, з одного боку, може бути пов'язаний з кращим розподілом СаО, що покращує ступінь утворення зміцнюючих сполук в середині окатиша і на його поверхні, з іншого

– наявністю в окатишах групи Б ендотермічного розкладу CaCO_3 при температурі 900°C .

2.1.7. Висновки

В ході проведення досліджень було визначено показники міцності офлюсованих окатишів з використанням вапняку та бентоніту і окатишів з використанням вапна при заданій основності для двох типів окатишів 0,25 част. од. осн.

В підсумку проведеної роботи отримано наступні результати:

1. Вміст заліза загального в окатишах з використанням вапна на 0,4% вищий, ніж в окатишах з використанням вапняку і бентоніту, при однаковій основності.

2. Міцність сирих окатишів з використанням вапна має вищі показники ніж окатиші з використанням вапняку та бентоніту. Так показник міцності сирих безбентонітових окатишів на стискання на 15,4% вища за аналогічний показник окатишів, що містять бентонітову глину і на $3 = 12 - 9$ (рази) міцніші за показником міцності сирих окатишів на скидання.

3. Міцність висушених окатишів з вапном, мають показник на 40,0% нижчий за показники міцності окатишів з використанням вапняку і бентоніту.

4. Показники міцності випалених окатишів з використанням вапна вищі за ці ж показники бентонітових окатишів при всіх значеннях температурно – часового режиму випалу.

Покращення міцності випалених окатишів з використанням вапна відбувається за рахунок кращого засвоєння нерудних компонентів шихти та більш однорідного складу силікатної зв'язки.

Також встановлено, що оптимальним режимом термообробки окатишів є температура 1280°C і час випалювання 10 хв, що забезпечує достатню міцність окатишів для їх подальшого використання у доменній плавці.

Показники міцності випалених окатишів Б, вище за показники окатишів А, як при температурі 1280 °С, так і 1300°С.

Отже, гашене вапно може бути рекомендовано як флюс для заміни вапняку, що може забезпечити кращі показники міцності сирих окатишів, а також необхідну міцність при високих температурах без використання бентоніту. Таким чином, гашене вапно може замінити як вапняк, так і бентоніт при виробництві окатишів.

Отримані в ході досліджень значення випалених окатишів з додаванням вапна (3,5 кг/ок) в повній мірі задовольняє вимоги доменного виробництва (2,2 кг/ок).

2.2. Вплив якості вапна на процес огрудкування та випалу окатишів

Ефективність використання вапна в процесі окускування залізорудної шихти залежить від багатьох факторів та основними вважаються склад шихти і якість вапна – вміст активного СаО, що на пряму залежить від ступеню його випалу. При збільшенні ступеню випалу вапна, спостерігається збільшення еквівалентного діаметру гранул окатишів.

Аналіз проведеного дослідження свідчить, що збільшення міцності окатишів з використанням вапна позитивно впливає на процес їх випалу на випальній машині конвеєрного типу через зменшення газодинамічного опору шару окатишів та зменшення витрат тепла на розкладання з'єднань кальцію.

Дані роботи [42] свідчать, що з точки зору ефективності використання вапна у виробництві окатишів, ступінь випалення вапна може бути скоректовано зміною кількості вапна в шихті і навпаки. Іншими словами, для досягнення найкращих показників міцності окатишів зі збільшенням вмісту вапна в шихті, ступінь випалу вапна може бути зменшена, а при зменшенні вмісту вапна – збільшена.

Підсумовуючи можна зробити висновок, що ефективність заміни вапняку вапном визначається кількістю активного СаО, що вноситься вапном в шихту і практично не залежить від ступеню випалу вапна чи вмісту його в шихті. Тому у виробництві вапна для потреб огрудкування залізорудної сировини, слід керуватися техніко – економічними показниками випалу вапна і низькою собівартістю отримання активного СаО [43].

2.3. Вибір та обґрунтування раціонального способу отримання вапна для використання в шихті огрудкування

Орієнтуючись на дані роботи [43], що ставлять в основу доцільності використання вапна у виробництві залізорудних окатишів собівартість отримання активного СаО, розглянемо роботу випалювальних агрегатів вапняку, через призму їх техніко – економічних показників.

Аналіз собівартості виробництва вапна свідчить, що основними витратними статтями є сировина та енергетичні ресурси (70%), далі йдуть амортизаційні відрахування, витрати на ремонт устаткування (15 – 20%) та інші витрати (10 – 15%) [28].

Кількість вапняку, що витрачається на виробництва 1 тони вапна, залежить від:

- якості вапняку (фізико – хімічні властивості);
- якості отриманого вапна (ступеню випалу);
- кількості втрат при виробництві вапна (втрати при завантажені/розвантажені, пило винос та інше).

Питомі витрати вапняку при його випалені наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6. – Питомі витрати вапняку при його випалені з урахуванням втрат на пиловинос

	Одиниці вимірювання	Питомі витрати вапняку на тону вапна
Шахтні печі	т/т	1,6
Обертові печі	т/т	1,8
Довгі обертові печі по сухому способу	т/т	2,0

За даними таблиці 2.6. видно, що найменш матеріалоемними є шахтні печі з питомими витратами сировини у 1,6 т/т вапна.

Величина пиловиносу залежить від типу печі, міцності карбонатної сировини, а також її підготовки до процесу випалу. Так попередній відсів мілкої фракції вапняку перед завантаження в піч покращує процес випалу, зменшує пиловинос і повзанні з ним теплові втрати. Втрати за рахунок пиловиносу коливаються в межах від 1,0% для шахтних печей до 5,0% для обертових печей.

З огляду на те, що декарбонізація вапняку є ендотермічним процесом, тобто проходить з використанням значної кількості енергії. Витрати енергії складають більшу половину собівартості виробництва вапна.

Усю енергію, що використовується при випалу вапняку, можна поділити на дві складові. Перша – це поливо, яке використовується на процес дисоціації вапняку, і другу – електрична енергія, що витрачається на роботу печі і допоміжне устаткування.

На виробництво тони вапна використовується приблизно 3,2 ГДж тепла.

Витрати тепла на процес випалення вапняку залежать від наступних параметрів:

- типу та конструкції печі;
- типу та конструкції пальника;
- якості отриманого вапна (ступеню випалу);
- крупності вапняку та його вологості;
- кількості втрат при виробництві вапна (втрати при завантаженні/розвантаженні, пиловинос та інше).

Питомі витрати умовного палива (кг/кг) для виробництва вапна з вмістом (CaO+MgO) більшим або меншим за 80% можуть бути вираховані за наступною формулою:

$$q_{\Phi} = \frac{q_0 \cdot A_{\Phi}}{80}$$

де q_0 - питомі витрати умовного палива для отримання вапна із вмістом $(CaO+MgO)_{акт}$ рівним 80%, кг

A_{Φ} - фактичний вміст $(CaO+MgO)_{акт}$, %

Питомі витрати умовного палива для отримання вапна 2-го сорту із вмістом $(CaO+MgO)_{акт}$ рівним 80% наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. – Питомі витрати умовного палива на виробництва вапна

Тип печі	Питомі витрати умовного палива на тону вапна, т/т	
	мін.	макс.
Шахтні печі на вугіллі	0,125	0,155
Шахтні печі на природному газі	0,158	0,204
Обертові печі	0,200	0,260
Довгі обертові печі	0,210	0,245

Дані таблиці 2.7. свідчать, що найбільш енергоефективними є шахтні печі, що працюють на вугіллі, найменш енергоефективними є довгі обертові печі.

Витрати електричної енергії при виробництві вапна включають в себе споживання електроенергії на роботу завантажувально – розвантажувальне устаткування, скіпові підйомники, приводів печей, димососів та очисного обладнання.

Споживання електричної енергії при виробництві вапна коливаються в межах від низького 5 – 15 кВт·год/т в шахтних печах до 20 – 40 кВт·год/т в обертових печах.

В таблиці 2.8. наведені дані витрат електричної та теплової енергії при виробництві вапна в печах різних конструкцій, що експлуатуються в країнах ЄС.

Таблиця 2.8. – витрати тепла та електричної енергії при виробництві вапна в країнах Європейського союзу [26].

Тип печі	Вид енергетичного ресурсу	
	Витрати тепла, ГДж/т	Витрати електричної енергії, кВт·год/т
Кільцеві шахтні печі	3,3 – 4,9	18 – 35(50)
Шахтні пересипні печі	3,4 – 4,7	5 – 15
Обертові печі	5,1 – 7,8	17 – 45
Довгі обертові печі	6,0 – 9,2	18 – 25
Регенеративні печі з паралельним потоком	3,2 – 4,2	20 – 40
Печі інших конструкцій	3,5 – 7,0	20 – 40

На величину витрат енергоспоживання, що представлені в таблиці 2.8. впливають наступні параметри:

- гранулометричний склад (крупність вапняку) – до 5,0%;
- вологість вапняку – до 10,0%;
- вид палива – до 5,0%;
- якість отриманого вапна (сильно випалене вапно) – до 10,0%;
- залишковий вміст CO₂ – до 5,0%.

Додаткові витрати електричної енергії пов'язані з процесом гашення вапна. За даними різних підприємств ці витрати складають від 5 до 30 кВт·год на тону негашеного вапна.

З метою виявлення найкращого типу конструкції печі для випалення вапняку з огляду на статі собівартості, що наведені в таблицях 13 – 15,

скористуємося матрицею прийняття рішень, інструментом, що дозволяє об'єктивно оцінити сильні і слабкі сторони кожного варіанта. Результати аналізу матриці прийняття рішень наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9. – Матриця зважених рішень по вибору типу печі для випалу вапняку

Критерії	Вага критерію	Шахтні печі		Обертові печі		Інші печі	
		Оцінка	Загальна сума	Оцінка	Загальна сума	Оцінка	Загальна сума
Питомі витрати сировини	1	3	$1 \times 3 = 3$	1	$1 \times 1 = 1$	2	$1 \times 2 = 2$
Витрати теплової енергії	3	3	$3 \times 3 = 9$	1	$3 \times 1 = 3$	3	$3 \times 3 = 9$
Витрати електричної енергії	2	2	$2 \times 2 = 4$	2	$2 \times 2 = 4$	1	$2 \times 1 = 2$
ЗАГАЛОМ			16		8		13

За даними таблиці 2.9., можна зробити висновок, що найменші витрати енергії досягаються в шахтних печах. Потім, за потенціалом можливостей, слідують обертові печі.

З огляду на вищесказане, найбільш раціональним при виробництві окатишів є використання вапна, яке було отримано в шахтних печах.

Перевагами шахтних печей є:

- низькі витрати енергетичних ресурсів;

- компактне розміщення печі на невеликій площі, що дозволить вписати їх в існуючі гірничо – металургійні комбінати;
- високий ступінь випалу вапняку;
- тривалий термін експлуатації футеровки (до 8 років).

Недоліками шахтних печей є:

- використання вузької фракції вапняку;
- підвищені вимоги до хімічного складу вапняку.

Ряд провідних закордонних виробників печей для випалу вапна, таких як SiC, Maerz, Cimprogetti та інші досягли високих показників в ефективності (економічності) роботи печей власного виробництва. Печі цих виробників характеризуються низькими витратами палива і високими показниками готової продукції.

Для виробництва вапна в умовах гірничо – збагачувальних комбінатів з подальшим його використанням у виробництві окатишів можуть бути рекомендовані печі шахтного типу. Саме в цих печах можна отримувати вапно, яке характеризується дуже малим часом гашення і високим ступенем випалу, що максимально задовольняє потреби виробництва окатишів.

В якості готового рішення може бути запропонована модель ABC італійської компанії Cimprogetti, яка є одним з лідерів в області промислового виробництва вапна.

ABC (Advance Burning Concept або Передова Концепція Випалу) є досягненням еволюції компактних одношахтних печей з протитечією [<https://www.cimprogetti.com/>].

Дані печі дозволяють виробляти вапно із середньо-високою або середньо-низькою реакційною здатністю при оптимальному використанні вапняку різного розміру та з використанням палива різного типу.

Піч ABC складається з радіальної сталеві шахи, всередині облицьованої вогнетривкою цеглою. Вапняк подається в пристрій завантаження

та розподілу, який розташований у верхній частині печі. Випалення відбувається в середній частині печі за допомогою пальників, які розподілені у кількох точках шахти, що забезпечує однорідний та рівномірний розподіл тепла по всьому профілю печі. Нижня частина печі оснащена системою вивантаження вапна та секцією охолодження, що надходить з нижньої частини розвантажувальної таріли.

Загальний вигляд печі моделі ABC представлений на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5. – Піч одношахтна – модель ABC компанії Cimprogetti®

Завдяки особливій системі пальників дана піч може використовувати газоподібне, рідке і пиловидне паливо а також випалювати вапняк різних розмірів. Інноваційні технології, що використані в конструкції печі ABC дозволяють суттєво знизити викиди забруднюючих речовин.

2.4. Висновки за Розділом 2

Основною частиною розділу 2 є дослідна робота, результати якої підтверджують дані ряду літературних джерел, які були проаналізовані в розділі 1 цієї роботи.

В ході проведення досліджень було визначено показники міцності офлюсованих окатишів з використанням вапняку та бентоніту і окатишів з використанням вапна при заданій основності для двох типів окатишів 0,25 част. од. осн.

В підсумку проведеної роботи отримано наступні результати:

1. Вміст заліза загального в окатишах з використанням вапна на 0,4% вищій, ніж в окатишах з використанням вапняку і бентоніту, при однаковій основності.
2. Міцність сирих окатишів з використанням вапна має вищі показники ніж окатиші з використанням вапняку та бентоніту.
3. Міцність висушених окатишів з вапном, мають показник на 40,0% нижчий за показники міцності окатишів з використанням вапняку і бентоніту.
4. Показники міцності випалених окатишів з використанням вапна вищі за ці ж показники бентонітових окатишів при всіх значеннях температурно – часового режиму випалу.

Гашене вапно може бути рекомендовано, як флюс для заміни вапняку, що може забезпечити кращі показники міцності сирих окатишів, а також необхідну міцність при високих температурах без використання бентоніту.

Таким чином, гашене вапно може замінити як вапняк, так і бентоніт при виробництві окатишів.

Ефективність заміни вапняку вапном визначається кількістю активного СаО, що вноситься вапном в шихту і практично не залежить від ступеню випалу вапна чи вмісту його в шихті. Тому у виробництві вапна для потреб огрудкування залізорудної сировини, слід керуватися техніко – економічними показниками випалу вапна і низькою собівартістю отримання активного СаО.

Для виробництва вапна в умовах гірничо – збагачувальних комбінатів з подальшим його використанням у виробництві окатишів можуть бути рекомендовані печі шахтного типу, що мають найкращий показник енергоефективності. Саме в цих печах можна отримувати вапно, яке характеризується дуже малим часом гашення і високим ступенем випалу, що максимально задовольняє потреби виробництва окатишів.

В якості готового рішення може бути запропонована модель ABC італійської компанії Cimprogetti, яка є одним з лідерів в області промислового виробництва вапна.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ ВАПНА У ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ

В ринкових умовах основною метою господарської діяльності гірничо – збагачувального підприємства є отримання прибутку. Максимізація прибутку може бути досягнута через збільшення об'єму реалізації продукції, що задовольняє потреби ринку та платіжоспроможність споживачів.

Прибутком є різниця між виручкою від реалізації продукції і витратними на її виробництво. Виручка в свою чергу залежить від ціни, яку диктує ринок згідно з економічною моделлю пропонування (попит і пропозиція). Отже, в даній ситуації, підприємство може керувати лише виробничими витратами, а значить варто встановлювати розподіл витрат по процесах і визначити фактори, що впливають на витрати найбільшим чином.

Калькуляція собівартості, що включає в себе облік виробничих витрат є однією з основних задач промислового підприємстві. Собівартість продукції дає можливість оцінити рівень скорочення витрат, як інструмент у зміцненні конкурентоспроможних позицій всього підприємства.

Собівартість продукції залежить від впливу багатьох різноманітних факторів, що впливають на певний показник або ряд показників. Всі фактори, можна класифікувати на дві категорії: зовнішнього походження, тобто ті, що перебувають за межами підприємства, і внутрішнього походження.

До зовнішніх факторів включають:

- зміну ціни на паливо, енергію, матеріали та інші матеріальні цінності, необхідні підприємству для виробничих потреб;
- зміну мінімального сталого розміру заробітної плати, а також різноманітних обов'язкових внесків, нарахувань і відрахувань.

Головними факторами внутрішнього походження є:

- зниження витрат на оплату праці, пов'язаних з виготовленням продукції;
- підвищення та покращення продуктивності праці персоналу;
- зниження витрат матеріалів на виготовлення продукції;
- усунення браку та втрат від нього та інші.

Одним з головних чинників зменшення собівартості є підвищення технічного рівня виробництва. Це досягається за рахунок впровадження оновленої технології, автоматизації й механізації процесів виробництва; покращення використання нових видів матеріалів і сировини; зміни технічних характеристик продукції; а також інших факторів, що підвищують загальний технічний виробничий рівень.

Розробка технології виробництві залізородних окатишів з використанням вапна в шихті огрудкування має на меті збільшення купівельної привабливості продукції – покращення якості окатишів, а також оптимізацію витрат сировини, що позитивно вплине на собівартість продукції.

Вартість виробництва залізородних окатишів складається з вартості переділів видобутку руди, її подрібнення, збагачення і огрудкування. Ця вартість разом із вартістю сировини (руди) являє собою основну частину (88%) собівартості залізородних окатишів [44].

За базу розрахунку собівартості виробництва окатишів розрахуємо витрати матеріалів однієї тони окатишів на основі отриманих даних (см. табл. 9) в ході виконання досліджень окатишів серії А та серії Б, інші показники виробничого процесу залишаються незмінними.

Витрати сировина на тону офлюсованих окатишів серії А та серії Б представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. – Витрати сировини на виробництво окатишів

Назва матеріалу	Витрати, кг/т	
	Окатиша А	Окатиші Б
Концентрат	1000,0	1000,0
Вапняк	9,5	0,0
Бентоніт	3,0	0,0
Вапно	0,0	4,5

Вартість сировинних матеріалів, що використовуються в процесі виробництва офлюсованих окатишів представлена в таблиці 3.2. Дані вартості сировинних матеріалів отримані з відкритих джерел в мережі інтернет, одним з яких є інтернет – портал <https://gmk.center/ua/>.

Таблиця 3.2. – Орієнтовна вартість¹ сироварних матеріалів, грн/т.

Назва матеріалу	Вартість, грн./т.
Концентрат залізорудний	4135,79
Вапняк технологічний	240,00
Глина бентонітова	11760,00
Вапно металургійне	2800,00

Результати розрахунку собівартості окатишів з огляду на витрати сировини наведено в таблиці 3.3.

¹Конвертація цін відбувалась за даними урядового порталу Мінфін (<https://minfin.com.ua/ua/currency/usd/>)

Таблиця 3.3. – Собівартість окатишів серії А та серії Б з урахуванням витрат сировини на їх виробництво.

Назва матеріалу	Вартість сировини, грн./т.	Окатиші А		Окатиші Б	
		Витрати сировини, кг/т	Вартість, грн./т	Витрати сировини, кг/т	Вартість, грн./т
Концентрат	4135,79	1000,0	4135,79	1000,0	4135,79
Вапняк	240,00	9,5	2,28	0,0	0,00
Бентоніт	11760,00	3,0	35,28	0,0	0,00
Вапно	2800,00	0,0	0,00	4,5	12,60
РАЗОМ:			4173,35		4148,39

Зменшення собівартості виробництва окатишів з використанням вапна в шихті огрудкування складає:

$$C_{\Delta} = 4173,35 - 4148,39 = 24,96 \text{ грн./т}$$

В умовах впровадження виробництва окатишів з використанням вапна на ПрАТ «ЦГЗК», річний економічний ефект складе:

$$E_{\text{рік}} = 24,96 \times 2 \cdot 10^6 = 49,92 \text{ млн. грн./рік}$$

Паралельно зі зниженням собівартості виробництва окатишів серії А, ми також спостерігаємо підвищення якості хімічного складу: збільшення вмісту заліза загально (%) на $0,4 = 65,5 - 65,1$, та основності (част. од.осн.) на $0,006 = 0,253 - 0,247$ (див. табл. 11), що окрім купівельної привабливості окатишів, також впливає на кінцеву вартість продукту.

За даними сайту https://gmk.center/ua/вартість_однієї_тони_окатишів складає 140дол. США або 5790,11 грн/т.

Додаткова вартість продукції з урахуванням фактичних якісних показників, може бути порахована за допомогою наступних формул [45]:

$$C_{\phi} = C_{\delta} \pm \Delta C_{\text{мет.}} \pm \Delta C_{\text{осн.}} \pm \Delta C_{\text{дріб.}}$$

де C_{ϕ} – оптова (фактична) ціна продукту, що має показники якості, які відрізняються від базисних, грн./т;

C_{δ} – оптова ціна продукту базисної якості, грн./т;

$\Delta C_{\text{мет.}}$ – приплати (+) або знижки (–) до оптової ціни продукту базисної якості за відхилення вмісту рудних компонентів, грн./т;

$\Delta C_{\text{осн.}}$ – приплати (+) або знижки (–) до оптової ціни продукту базисної якості за відхилення основності, грн./т;

$\Delta C_{\text{дріб.}}$ – приплати (+) або знижки (–) до оптової ціни продукту базисної якості за відхилення вмісту масової частки дріб'язку (клас 5÷0 мм), грн./т.

Приплати (знижки) за відхилення вмісту рудних компонентів визначаються за формулою:

$$\Delta C_{\text{мет.}} = k_{Fe} (Fe_{\phi} - Fe_{\delta}),$$

де k_{Fe} – 14,0 – установлена договором величина приплат (знижок) за зміну на 1 % упорівнянні з базисним вмісту заліза, грн./т;

Fe_{ϕ} – фактичний вміст заліза в продукті, %;

Fe_{δ} – базовий вміст заліза в продукті, %;

Приплати (знижки) за відхилення основності визначаються за формулою:

$$\Delta\Pi_{\text{осн.}} = (\Delta\Pi_{\text{мет}} + \Pi_{\text{б}}) \cdot 0,1 \cdot k_{\text{осн.}} (\text{осн.}_{\text{ф}} - \text{осн.}_{\text{б}}),$$

де $k_{\text{осн.}}$ – 8,8 – установлена договором величина приплат (знижок) за зміну основності (CaO/SiO₂) на 0,1 модуля, % від оптової ціни;

0,1 – коефіцієнт, що зв'язує розмірність основності і $k_{\text{осн.}}$;

$\text{осн.}_{\text{ф}}$ – фактична основність продукту, част. од.;

$\text{осн.}_{\text{б}}$ – базова основність продукту, част. од.

Приплати (знижки) за відхилення масової частки дріб'язку не розраховуються, з огляду на відсутність фактичного значення показників.

Використовуючи наведені вище формули, розрахуємо величину доплат за якість готової продукції.

1. Приплати за відхилення вмісту рудних компонентів згідно з таблицею 11:

$$\Delta\Pi_{\text{мет.}} = 14,0 \cdot (65,5 - 65,1) = 14,0 \cdot 0,4 = 5,60 \text{ грн/т}$$

2. Приплати за відхилення основності згідно таблиці 11:

$$\Delta\Pi_{\text{осн.}} = (5,6 + 5790,11) \cdot 0,1 \cdot 8,8(0,253 - 0,247) = 30,60 \text{ грн/т}$$

Вартість готової продукції з урахуванням доплат за якісні показники складає:

$$\Pi_{\text{ф}} = 5790,11 + 5,60 + 30,60 = 5826,31 \text{ грн./т}$$

Різниця вартості продукції у порівнянні з базовою ціною складає:

$$Ц_{\Delta} = Ц_{\phi} - Ц_{\sigma} = 5826,31 - 5790,11 = 36,20 \text{ грн/т}$$

Річний економічний ефект впровадження технології виробництва залізородних офлюсованих окатишів з використанням вапна з урахуванням витрат сировинних матеріалів і доплат за якість готової продукції складає:

$$E_{\text{рік.загал}} = 2 \cdot 10^6 \times (24,96 + 36,20) = 122,32 \text{ млн. грн./рік}$$

Отримані розрахункові дані річного економічного ефекту від впровадження технологію виробництва окатишів з використанням вапна, дають змогу розглядати впровадження дільниці з випалу та підготовки вапна в умовах існуючого гірничо – збагачувального комбінату з придбанням власної шахтної печі випалу вапна.

Строк окупності даної інвестиції складатиме (роки):

$$P_{\text{роки}} = \frac{B}{\Pi}$$

де, $P_{\text{роки}}$ – строк окупності проекту, роки;

B – сума коштів (вартість), що вкладені в проект, грн;

Π – прибуток, отриманий від реалізації проекту, грн.

За даними сайту <https://agicocement.com/> орієнтовна вартість шахтної печі з випалу вапна складає 205,53 млн. грн.²

В нашому випадку термін окупності проекту з придбання та впровадження печі з випалу вапна на промисловій площадці умовного ГЗК складе:

$$P_{\text{роки}} = \frac{205,53 \cdot 10^6}{122,32 \cdot 10^6} = 1,68 \text{ роки}$$

Отримане значення строку окупності інвестицій, свідчить про доцільність придбання шахтної печі для випалу вапна

²Пропозиція наведена лише для довідки, цей список включає лише основну частину обладнання, не включає допоміжні системи, такі як пожежна система, стиснене повітря, очищення води тощо, а також не включає плату за упаковку, фрахт або плату за встановлення .

РОЗДІЛ 4. САНІТАРНО-ЕКОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАПНА В ШИХТІ ОГРУДКУВАННЯ

4.1. Санітарне забезпечення використання вапна при виробництві окатишів

Використання вапна при виробництві залізорудних офлюсованих окатишів передбачає включення в технологічну схему дільниці з підготовки вапна, що в свою чергу викликає специфічні шкідливі фактори: запиленість повітря при завантаженні/вивантаженні вапна з печі, транспортуванні, складуванні, загазованість повітря та підвищеною температурою.

Більшість шкідливих факторів, що супроводжують підготовку вапна мають однакову природу зі шкідливими факторами, що супроводжують виробництво окатишів. Однак існують відмінності, так вапняний пил, при взаємодії зі слизистою оболонкою організму людини, роз'їдає тканини та викликає опіки. Потрапляння вапняного пилу в очі, викликає склоподібний набряк та помутніння рогівки.

При порушенні режиму випалу вапна в пічних агрегатах можливе отруєння обслуговуючого персоналу продуктами неповного горіння – оксидом вуглецю (CO).

Індивідуальними засобами захисту від впливу вапнякового пилу є захисні окуляри, респіратори, від впливу оксиду вуглецю – шланговий протигаз.

Заміна у використанні шахтних печей твердого палива на природний газ значно знижує запилення робочих місць, дільниць та оточуючої місцевості, а також ліквідує ряд ручних операцій при обслуговуванні теплових агрегатів. Впровадження у виробництво вапна потужних шахтних печей з ефективною

системою знесилення всієї технологічної лінії, обладнаних сучасною системою автоматичного регулювання процесу випалу та системою керування усіма механізмами з диспетчерського пульта, дозволить повністю усунути шкідливий вплив на обслуговуючий персонал.

Вдосконалювання технологічних схем виробництва вапна, крім глобальної автоматизації процесу, має супроводжуватися максимально можливим виключенням перевантажувальних вузлів, скорочення шляхів транспортування матеріалу, висоти його підйому та скидання та вдосконаленням навантажувально – розвантажувальними механізмів.

4.2. Екологічні аспекти використання вапна при виробництві окатишів

Чорна металургія займає друге місце за загальною кількістю викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря після теплоенергетики. Основними джерелами викидів в атмосферу у чорній металургії є: агломераційне виробництво, виробництво чавуну та сталі.

Випал вапна та використання його в якості компонента шихти при виробництві окатишів також супроводжується викидами речовин в атмосферу, утворенням стічних вод та твердих відходів.

Викиди, що утворюються в технологічному процесі випалу та використання вапна, поділяються на такі види.

Основні організовані викиди: пил, оксид вуглецю (CO), діоксин вуглецю (CO₂), оксид азоту (NO_x), оксид сірки (SO_x).

Неорганізовані викиди: пил при навантажувально – розвантажувальних операціях, негерметичність стиків обладнання, водяна пара при гашенні вапна.

Склад та концентрація забруднюючих викидів залежить від:

- хімічного складу вапняку;
- виду палива;

- типу печі та параметрів її роботи;
- ефективності роботи очисного обладнання.

Вибір схеми очищення пічного газу залежить від типу печі. Виніс пилу з різних типів печей коливається в дуже широких межах. В пічному газі шахтної печі міститься приблизно 1 г/куб.м. пилу, в печі киплячого шару – 120 г/куб.м, а в обертових печах – до 100 г/куб.м. [46].

Окрім пилу в склад пічного газу також входять смолисті речовини, які містяться в твердому паливі та самому вапняку. Вміст смолистих речовин у вапняках різних родовищ неоднаковий, в деяких вапняках великих родовищ він досягає 0,1%. Навіть таке невелике значення вмісту смоли при потужності печі в 200 т/доба утворює 400 кг/доба смоли.

Найбільш важковіддільними домішками в газі, окрім смольних речовин, є солі лужних металів (K, Na). Якщо для відділення смол необхідна промивка газу холодною водою, то солі натрію і калію видаляються промивкою теплою водою.

Зрошення газів після печей водою призводить до їх охолодження і відокремлення від них смол, які виводяться разом зі шламом, тому рекомендується застосовувати зрошення газоходів, що поліпшує відокремлення смольних речовин.

В практиці виробництва вапна використовують двох та трьохступеневі системи очистки забруднюючих речовин. В якості першої ступені очистки використовують пилоосаджувальні камери, в якості другої – циклони, в якості третьої – рукавні та електричні фільтри. Компонування систем очищення газів здійснюється по розімкнутій схемі, коли забруднений газ проходить всі ступені очистки після чого викидається в атмосферу через димову трубу.

Витрати, що супроводжують використання фільтрів, залежать від розмірів та продуктивності печі. В країнах ЄС вартість встановлення тканинного фільтра складає більше 50 тис. євро, що складає виключно вартість

фільтра без додаткового устаткування. Вартість електричного фільтру на 15% більше, ніж тканинного.

ВИСНОВКИ

1. Покращенням металургійної привабливості окатишів може стати перехід на безбентонітові окатиші з використанням в якості сполучної добавки випаленого вапна.

2. Показана принципова можливість отримання залізорудних офлюсованих окатишів з використанням вапна в шихті огрудкування в якості сполучної речовини і флюсоуючої добавки. Оптимальні втрати вапна складають $1,5 \div 2,0$ % від маси шихти.

3. Вапно, яке в процесі огрудкування виступає флюсоуючою та сполучною добавкою, рівномірно розподіляється в масі концентрату. Волога концентрату активно поглинається, що скорочує час формування гранул і покращує гранулометричний склад окатишів.

4. Результати дослідної частини роботи демонструють підвищення вмісту заліза загального в окатишах з використанням вапна на 0,4% вищій, ніж в окатишах з використанням вапняку і бентоніту, при однаковій основності.

5. Міцність сирих окатишів з використанням вапна має вищі показники ніж окатиші з використанням вапняку та бентоніту. Так показник міцності сирих безбентонітових окатишів на стискання на 15,4% вища за аналогічний показник окатишів, що містять бентонітову глину і на $3 = 12 - 9$ (рази) міцніші за показником міцності сирих окатишів на скидання.

5. Міцність висушених окатишів з вапном, мають показник на 40,0% нижчий за показники міцності окатишів з використанням вапняку і бентоніту.

6. Показники міцності випалених окатишів з використанням вапна вищі за аналогічні показники бентонітових окатишів при всіх значеннях температурно – часового режима випалу. Оптимальним режимом термообробки окатишів є температура 1280°C і час випалювання 10 хв, що

забезпечує достатню міцність окатишів для їх подальшого використання у доменній плавці.

7. Отримані в ході досліджень значення випалених окатишів з додаванням вапна (3,5 кг/ок) в повній мірі задовольняє вимоги доменного виробництва (2,2 кг/ок).

8. Гашене вапно може бути рекомендовано як флюс для заміни вапняку, що може забезпечити кращі показники міцності сирих окатишів, а також необхідну міцність при високих температурах без використання бентоніту. Таким чином, гашене вапно може замінити як вапняк, так і бентоніт при виробництві окатишів.

9. Проведено аналіз сучасного стану мінерально – сировиної бази карбонатних родовищ України. Показано, що з моменту повномасштабного вторгнення росії сформувався дефіцит вапна на внутрішньому ринку України, який частково покривається за рахунок імпорту.

10. Проведено аналіз та виявлено оптимальний агрегат – шахтна піч для випалу вапна, що в повному обсязі задовольняє вимоги до якості вапна з точки зору використання його в шихті огрудкування, так і з точки зору найкращих техніко-економічних показників роботи агрегату.

11. В якості готового рішення запропонована компактна модель ABC італійської компанії Cimprogetti, яка є одним з лідерів в області промислового виробництва вапна.

12. Виконано розрахунок економічного ефекту від використання вапна при виробництві окатишів, що склав 122,32 млн. грн. на рік.

13. Виконано розрахунок строку окупності шахтної печі для випалу вапна в умовах діючої фабрики огрудкування. Строк окупності складає 1,68 роки і характеризується як доцільний.

14. Проведений аналіз шкідливих і небезпечних факторів при виробництві вапна та рекомендовані заходи зі зменшення негативного впливу.

15. Виробництво окатишів з використанням вапна можливе на всіх фабриках огрудкування України. Використання вапна є резервом підвищення ефективності роботи, як доменних печей, так і фабрик огрудкування та випалу окатишів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Юсфин Ю.С., Каменов А.Д., Бутканев А.П. Управление окискованием железорудных материалов. – М.: Металлургия, 1990. с.12.
2. Мінеральні ресурси України. Щорічник (2020). К.: ДВНП «Геоінформ України». 270 с. [Електронний ресурс].Пряме посилання на URL: http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf
3. Залізорудна гірничодобувна промисловість України у світовому контексті. Михайлов В.А., ННІ «Інститут геології» Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Матеріали конференції «Залізорудні родовища України: сучасні проблеми та перспективи розробки», 21-22 березня 2024 року, Київ, Україна.
4. Лідія Горошкова. Прогнозування розвитку залізорудної галузі України в умовах війни та повоєнного відновлення країни. Геологія. №2, 2024р., с. 83 – 93.
5. Agglomeration of iron ores //Ram Pravesh Bhagat, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2019.
6. Aitber Bizhanov, Valentina Chizhikova. Agglomeration in Metallurgy. Springer Nature, Switzerland AG, 2020, 465 p.
7. В. М. Чижикова. Зеленые технологии в современном окисковании: учебник. Москва, Волгоград: Инфа – Инженерия, 2023. – 464 с.
8. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), “The iron ore Market 2009 - 2011”, Geneva, Switzerland, 2010
9. Большаков В.И., Гладков Н.А., Орел Г.И., Оторвин П.И. Исследование металлургических свойств окатышей и особенностей их использования // Сталь. – 2004. – № 10. – с. 6–12.

10. De Souza R.P., de Mendonca C.F., Karter T., 1984, "Production of acid iron ore pellet for direct reduction using an organic binder". *Mining Eng. Magn.*, 36, pp. 1437 – 1441.

11. Chizhikov V.M., Vainshtein R.M., Zorin S.N., Zainetdinov T.I., Zinyagin G.A., Shevchenko A.A. "Production of iron ore pellets with an organic binder", *Metallurgist*, 47, 2003, pp. 3-4.

12. Schmitt J. "A method for improving the process and quality of iron ore pellets made with organic binders", in: 66th Annual University of Minnesota Mining Symposium, Duluth, MN, USA, 2005, pp. 19 – 20.

13. В.Н. Захарченко, М.В. Ягольник, К.В. Шмат, Ж.В. Свириденко «Пути повышения эффективности работы доменных печей», *Металл и литье Украины*, №5, 2014, с. 33 – 34.

14. A.K. Mandal, O.P. Sinha "Characterization of fluxed iron ore pellets as compared to feed material for blast furnace", *Journal of Progressive Research in Chemistry [JPRC]*, vol. 2, 2015.

15. Alok Sarkar, A.K. Mandal, O.P. Sinha "Palletization behavior of fluxed iron ore pellets of varying basicities made with waste fine", *International Journal of science and engineering [IJSE]*, vol. 5, 2013.

16. Савельев С.Г. Применение извести при производстве окатышей /С.Г. Савельев, Р.Д. Каменев // Проблемы производства и использования извести в черной металлургии: тез. докл. Республ. научно-техн. конф. – Днепропетровск, 1979. – с. 60.

17. Firth A.R., Garden J.R., Douglas J.D. Phase equilibria and slag formation in magnetite ore of fluxed iron ore pellets *ISIJ international*, 48, 2008, pp 1485 – 1492.

18. Patil J.B., Kakkar N. K., Srinivasan T. M., Dharanipalan S., Patel B. B., Nayak N.M. Production of cold bonded pellets. *Transaction of the IIM*, 33, 1980, pp 382-390.

19. Васильев П.Г., Алпаев Н.Е., Васюченко А.И. Некоторые особенности использования в доменной плавке окатышей. КЦГОК основностью 1,0 офлюсованных карбонатной известью // Теория и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке. Тез. докл. Всесоюзной научно – техн. конференции – Днепропетровск – 1985. с.27.

20. Испытание технологии получения окатышей с применением извести / С.Г. Савельев, О.Г. Федоров, А.П. Денисенко, В. Н. Соломаха // Бюл. Черная металлургия. – 1983. - № 9 - с. 44, 45.

21. Jagannath PAL, Chelladurai ARUNKUMAR, Yamazala RAJSHEKHAR, Gautam DAS, Manik Chandra GOSWAMI, Thirumalachari VENUGOPALAN “Development on iron ore pelletization using calcined lime and MgO combined flux replacing limestone and bentonite” ISIJ international, vol. 54, 2014, pp. 2169-2178.

22. Савельев С.Г. О возможности замены бентонита известью при производстве окатышей / С.Г. Савельев, О.Г. Федоров, В.Н. Соломаха // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1983. - № 12. - С. 11-13.

23. Табунщиков Н. П., Производство извести. М., «Химия», 1974, 240 с.

24. Применение извести различного качества при производстве железорудных окатышей / С.Г. Савельев, О.Г. Федоров, В.Н. Соломаха, О. П. Литвинов // Черная металлургия. Бюлл. НТИ. – 1985. – № 3. – С. 35-36.

25. Институт по исследованию перспективных технологий, Отдел конкурентоспособности и устойчивого развития, Европейского бюро по комплексному предотвращению и контролю загрязнений окружающей среды. Комплексное предотвращение и контроль загрязнения окружающей среды. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям. Производство цемента, извести и оксида магния, 2009, 486 с.

26. European lime Association (Eula), Draft lime sector Chapter 2.1 and 2.2, 2006 [Электронный ресурс <https://eula.eu/>].

27. Берштейн Р.С. Повышение эффективности агломерации /- М.: Metallurgy, 1979. – 144 с.
28. Монастырев А.В. Производство извести /- М.: Высшая школа, 1978. – 216 с.
29. Табунщиков Н.П. Снижение расхода топлива – важнейшая задача работников известковой промышленности / Н.П. Табунщиков // Проблемы производства и использования извести в черной металлургии: тезисы докл. Республик. научно-технич. конф. – Днепропетровск. – 1979. - С. 6,7.
30. В.Б Семакова, О.А. Томаш, В.П. Руських, С.В. Кривенко, Р.В. Ковальчик. Задачник з теорії процесів підготовки сировини до доменної плавки. – Маріуполь: ПДТУ, 2010 – 105 с.
31. Української Асоціації вапнякової промисловості (УАВП). [Електронний ресурс]. Пряме посилання на URL: <https://limeindustry.in.ua/statystyka/>
32. Гладенко Р.В. Ринок вапняку України: досвід долання кризового періоду. Заходи Української Асоціація вапняної промисловості, 2020 р.
33. GMK CENTER. Вапнякова справа: скільки вапняку виробляють та імпортують в Україну. [Електронний ресурс]. Пряме посилання на URL: <https://gmk.center/ua/posts/vapnyakova-sprava-skilki-vapnyaku-viroblyajut-ta-importujut-v-ukrainu/>
34. Савельев С.Г. Производство сырых окатышей с известью / С.Г. Савельев, В.Н. Соломаха, Г.В. Губин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. - № 8. - с. 9-12.
35. Бережной Н.Н., Першуков А.А., Шевченко В.П. Обобщение опыта производства железорудных окатышей в СССР – М.: Экспресс информация института «Черметинформация» - 1975 – с.69.
36. Влияние качества флюса на процессы окускования и качество железорудных окатышей / Г.Г. Ефименко, Ж.В. Свириденко, А.И. Каракаш, К.В. Шмат // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии:

Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2008. — Вип. 16. — С. 293-301. — Бібліогр.: 8 назв. — рос.

37. Освоение технологии производства окатышей / Н.И. Буланкин, П.Я. Тыква // Горный жур. — 1983. — №11. — С. 24, 25

38. A. Sharma, N. Rai: Proc. Of 11th Int. Seminar on Mineral Processing Technology, MPT, Jamshedpur, 2010, p.764

39. M. Niesler, J. Stecko, L. Blacha, B. Oleksiak: Metalurgija, vol. 53, 2014, p.37

40. R.P. de Souza Proc. Of 35th Annual Iron making Conf. Metallurgical Society of AIME Iron and Steel Division, Iron and steel society of AIME (ISS-AIME), New York, 1976, p.182

41. T.C. Eisele and S.K. Kawatra: Miner. Proce. Extract. Metall. Rev., vol. 24, 2003

42. Применение извести на аглофабриках СССР / А.В. Смородинников, Ф.Ф. Колесанов, Н.С. Климова [и др.] // Обзорная информ. - М., ин-т «Черметинформация». — 1978. — Сер. 3. - Вып. 2. - 34 с.

43. Савельев С.Г. Технично-економические показатели системы: печь по производству извести — процесс окускования железорудных материалов / С.Г. Савельев, А.В. Петровский, Л.Ш. Сакварелидзе // Вопросы совершенствования тепловой работы и конструкций металлургических печей: тез. Докладов Республик. конф. — Днепропетровск, 1981. - С. 27.

44. Прокопенко В.І., Лілова Д. П. Щодо питання встановлення факторів, що визначають собівартість продукції гірничо-збагачувальних підприємств. Економічний Вісник, НГУ 2004 № 1, с. 30-35

45. Савельев С.Г. Совершенствование ценообразования окускованного железорудного сырья / С.Г. Савельев // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1988. - № 4. - С. 145-148.

46. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, Информационно – технический справочник по наилучшим доступным технологиям производства извести (ИТС 7 – 2015), 2016, стр. 125