

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

На правах рукопису

ЧМИХ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 622.271

**«ВДОСКОНАЛЕННЯ ВІДКРИТОЇ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИ-
ТІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ В КАР'ЄРІ ТЕХНОЛОГІЇ КРУП-
НОКУСОВОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ»**

184 «Гірництво»
(відкриті гірничі роботи)

Випускна робота
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра

Виконав Чмих О.М. / _____ /

Керівник Слободянюк В.К. / _____ /

Завідувач кафедри Жуков С.О. / _____ /

Кривий Ріг
2025 р.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП	4
Розділ 1	
СУТНІСТЬ ТА ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУД.....	6
1.1. Загальні відомості про залізну руду та магнітне розділення її роздробленої маси	6
1.2. Проблеми та перспективи магнітної сепарації.....	8
1.3. Аналіз сенсу, цілей і методів крупнокускової магнітної сепарації руд в аплікації до вимог наступного їх збагачення	10
1.4. Магнітне розділення в первинній переробці руд у кар'єрі.....	19
Висновки за розділом 1.....	25
Розділ 2	
ПЕРСПЕКТИВНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУД.....	27
2.1. Сучасні тенденції в магнітній сепарації рудних потоків.....	27
2.2. Універсальність магнітного розділення корисних копалин та типи сепараторів.....	28
2.3. Спеціальні засоби, розроблені для різних завдань магнітної сепарації.....	31
2.3.1. Спеціальні засоби магнітної сепарації фірми Fushun Ejet Magnetic Equipment Co.	32
2.3.2. Функціонально спеціалізовані засоби магнітної сепарації.....	37
Висновки за розділом 2.....	46
Розділ 3	
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУДНИХ МАС.....	47
3.1. Оглядовий аспект аналітики магнітної сепарації.....	47
3.2. Математичне моделювання процесу магнітної сепарації.....	47
3.3. Особливості розрахунку параметрів високоградієнтної магнітної сепарації слабомагнітних руд.....	50
3.4. Аналіз фізико-хімічної поведінки та можливостей відновлення критичних сировинних матеріалів з гідрометалургійної переробки магнітів.....	55
Висновки за розділом 3.....	68
Розділ 4	
ПРИКЛАДНІ РІШЕННЯ, РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ КРУПНОКУСКОВОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУД У КАР'ЄРАХ.....	69
4.1. Передумови та виробничий потенціал напрямку досліджень.....	69
4.2. Науковий внесок України в рішення означеної проблеми.....	70
4.2.1. Удосконалення технології переробки залізистих кварцитів.....	70
4.2.2. Досвід сухого магнітного збагачення окислених мідних руд.....	70
4.3. Реалізація крупнокускової магнітної сепарації в рудних кар'єрах.....	73
4.3.1. Проект підрядного дроблення в Казахстані як прототип вхідної частини комплексу крупнокускової магнітної сепарації.....	73
4.3.2. Комплекси рудорозбірки Magnetis KMP.....	74
4.3.3. Технології магнітного сортування фракцій Norditek та Idemag.....	77
4.3.4. Приклад упровадження КМР на Куржункульському руднику.....	78
4.3.5. Устаткування і досвід магнітної сепарації фірми Gongyi Forui.....	80
4.4. Пропозиції з удосконалення крупнокускової сепарації залізистих кварцитів.....	82
Висновки за розділом 4.....	84
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської роботи Чмиха Олексія Миколайовича на тему: «Вдосконалення відкритої розробки залізистих кварцитів за рахунок використання в кар'єрі технології крупнокускової магнітної сепарації».

«Випускна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025 р.».

Актуальність теми. Вже все більш очевидним стає те, що технології видобутку та переробки руд (збагачення, бодай первинного) безперервно зближуються і в недалекому майбутньому, на переконання автора, неминуче з'єднаються, особливо при повторній розробці таких техногенних родових, як шламосховища, формування яких вже закладається в теорію і практику з урахуванням цього. Якщо виникає потреба ефективно відокремити метали від великої кількості рудного субстрату, необхідно ретельно проаналізувати сучасний стан, тенденції та перспективи науково-прикладного забезпечення даного процесу, щоб достатньо обгрунтовано дати йому різносторонню оцінку й аргументовано рекомендувати найефективніші з розглянутих методів до можливого впровадження в проектну та виробничу практику на вітчизняних кар'єрах різної сировинної спрямованості.

Ідея роботи полягає в упровадженні магнітної розборки крупнокускової гірничої маси на внутрішньокар'єрних конвеєрах з метою передзбагачення руди.

Мета дослідження – оцінка можливостей і доцільності застосування методів магнітної сепарації гірничої маси в технологіях видобувних, на відкритих розробках покладів, як природних родовищ, так і техногенних.

Методологічна спрямованість аналізу надзвичайно тісно пов'язана зі збагаченням корисних копалин насамперед тому, що дані технології накопичили колосальний досвід стосовно магнітної сепарації різного роду гранулятив. Але така тіснота не є надмірною, як може здатися на перший погляд, оскільки:

Головні завдання дослідження спрямовані на комплексне освоєння надр, де прерогативним є ресурсозбереження за умов широкої диверсифікації мінеральної продукції та зумовленого цим комплексного і тісного суміщення різноцільових технологій в обмеженому просторі спільного кар'єру.

Предмет дослідження – внутрішньокар'єрне розділення руд за сортами.

Об'єкт дослідження – методи магнітної сепарації кускуватої гірничої маси.

Авторська оригінальність даного дослідження полягає в тому, що виконаний аналіз методів магнітної сепарації гірничої маси, здебільшого характерних для процесів збагачення руд, цілеспрямовано орієнтований на оцінку можливостей і доцільності застосування їх в технологіях видобувних, а конкретно – на відкритих розробках покладів, як природних родовищ (у кар'єрах), так і техногенних (на відвалах і хвостосховищах).

Структура й обсяг роботи. Робота представлена рефератом, вступом, чотирма розділами, загальними висновками і списком інформаційних джерел з 62 найменувань та містить 74 рисунків, 4 таблиці. Загальний обсяг – 90 сторінок.

Ключові слова: РУДНИК, КАР'ЄР, ВИДОБУТОК, ВІДВАЛ, ШЛАМОСХОВИЩЕ, МАГНІТНА СЕПАРАЦІЯ, КОНВЕЄР, РУДА, РУДОРІЗБОРКА, СКЛАДУВАННЯ ПОРІД.

ВСТУП

У нашій країні гірничо-металургійний комплекс (ГМК) був, є і буде ще тривалий час залишатися основою її промисловості й економіки [1-3].

Видобуток корисних копалин залишається ключовим компонентом гірничої справи, оскільки саме він витягує цінні мінерали з надр. Після того, як видобуті різновиди сировини підготовлені у вигляді дробленої гірничої маси, вони мають пройти первинне розділення для видалення з них цінних компонентів та шкідливих домішок [4]. Одними з поширених компонентів, що містяться у видобутих рудах, є метали, включаючи залізо, кобальт, нікель та інші. Магнітне розділення рудних мас є найефективнішим способом видалення металевих часток з видобутих мінералів. Цей процес продуктивно вилучає цільові, або видаляє зайві компоненти з мінералів, не змінюючи їхніх властивостей та не вступаючи в будь-яку хімічну реакцію.

Актуальність теми. Якщо мова йде про гірничодобувну промисловість, особливо ту її підгалузь, де чорні метали зазвичай зустрічаються в цільових рудах, чисельна множина машинобудівних фірм постачальників гірничого обладнання (наприклад, GME Magnets [5]) пропонує спеціалізовані магнітні сепаратори для різних застосувань щодо переробки корисних копалин. Для компаній, які прагнуть покращити свій процес видобутку корисних копалин, неможливо не враховувати надзвичайно широкий спектр технологічних можливостей, які надають методи магнітного розділення мінеральних субстратів. Отже, якщо виникає потреба ефективно відокремити метали від великої кількості рудного субстрату, необхідно ретельно проаналізувати сучасний стан, тенденції та перспективи науково-прикладного забезпечення даного процесу, щоб достатньо обґрунтовано дати йому різносторонню оцінку й аргументовано рекомендувати найефективніші з розглянутих методів до можливого впровадження в проектну та виробничу практику на вітчизняних кар'єрах різної сировинної спрямованості.

Авторська оригінальність даного дослідження полягає в тому, що виконаний аналіз методів магнітної сепарації гірничої маси, здебільшого характерних для процесів збагачення руд, цілеспрямовано орієнтований на оцінку можливостей і доцільності застосування їх в технологіях видобувних, а конкретно – на відкритих розробках покладів, як природних родовищ (у кар'єрах), так і техногенних (на відвалах і хвостосховищах).

Методологічна спрямованість аналізу надзвичайно тісно пов'язана зі збагаченням корисних копалин насамперед тому, що дані технології накопичили колосальний досвід стосовно магнітної сепарації різного роду гранулятив. Але така тіснота не є надмірною, як може здатися на перший погляд, оскільки:

Головні завдання дослідження безпосередньо спрямовані на комплексне освоєння надр, де прерогативним є ресурсозбереження за умов широкої диверсифікації мінеральної продукції та зумовленого цим комплексного і тісного суміщення різноцільових технологій в обмеженому просторі спільного кар'єру. Вже все більш очевидним стає те, що технології видобутку та переробки руд (збагачення, бодай первинного) безперервно зближуються і в недалекому майбутньому, на переконання автора, неминуче з'єднаються, особливо при повтор-

ній розробці таких техногенних родових, як шламосховища, формування яких вже закладається в теорію і практику з урахуванням цього [6, 7].

За цих умов варто особливий акцент зробити також на екстремально стрімко зростаючому попиті на рідкоземельні метали, рудами деяких з них не обділена геологія України, оскільки останні мають промислові поклади в ряді її регіонів. Але оцінити потенційні можливості технології спеціалізованого в напрямі теми роботи видобутку яких абсолютно неможливо без використання, хоч подекуди й доволі опосередкованого, методів, більше притаманних для збагачення руд і геофізики. Така постановка задачі є цілком вимушеною, оскільки наразі повністю адекватних її цілям рішень та методів просто не існує.

Переважно ж у гірничодобувній промисловості різні магнітні технології, такі як магнітна сепарація, магнітний транспорт, магнітні фільтри та вихрострумові сепаратори, використовуються для різноманітних застосувань, що сприяють видобутку, обробці та очищенню корисних копалин.

Видобуток чорних металів: Магнітна сепарація використовується для відділення магнітних мінералів від немагнітних, таких як залізо, магнетит та ільменіт, котрі можна відокремити в процесі їх дроблення.

Збагачення мінералів: Магнітна сепарація використовується для концентрування цінних мінералів на стадії збагачення.

Транспортування руди: може включати переміщення руди з рудника на переробні фабрики або розподіл корисних копалин в межах підприємства.

Магнітні фільтри: допомагають запобігти пошкодженню обладнання.

Вихрострумові сепаратори: використовуються для відділення руд кольорових металів від чорних у гірничодобувних операціях. Ці пристрої генерують індуковані електричні струми в матеріалах, що дозволяє відокремлювати чорні метали, такі як залізо, від кольорових, таких як алюміній та мідь. Такі сепаратори використовуються також для відновлення та переробки кольорових металів з руд та відходів переробки.

Ці магнітні технології є найбільш важливими в гірничодобувній промисловості для ефективного видобутку корисних копалин, видалення металевих забруднень та відновлення цінних мінералів. Вони також сприяють сталому розвитку й ефективності гірничодобувної промисловості.

Предмет дослідження – внутрішньокар'єрне розділення руд за сортами.

Об'єкт дослідження – методи магнітної сепарації кускуватої гірничої маси в рудопотоках кар'єрів.

Наукова новизна дослідження полягає в узагальненій авторській оцінці ефективності сучасних наукових методів обґрунтування шляхів удосконалення відкритої розробки залізистих кварцитів за рахунок використання в кар'єрі технології крупнокускової магнітної сепарації.

Практичне значення результатів роботи – узагальнення досвіду провідних розробників надр й аргументація рекомендацій щодо перспектив упровадження відібраних за критерієм придатності до умов України методів відкритої розробки залізистих кварцитів з використанням в кар'єрах гірничозбагачувальних комбінатів крупнокускової магнітної сепарації руд при розбиранні підірваної вибухом або первинним машинним дробленням та грохоченням гірничої маси.

Розділ 1

СУТНІСТЬ ТА ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУД

1.1. Загальні відомості про залізну руду та магнітне розділення її роздробленої маси

Важливість відділення при видобутку руд чорних металів з гірничої маси кусків з підвищеним вмістом заліза на якомога більш ранніх стадіях їх видобутку зумовлюється високою вартістю наступного їх збагачення, що пояснює прагнення гірників усіма доступними шляхами знизити частку пустої породи в загальному потоці спрямованій на збагачення гірничої маси та збільшити обсяг високоякісних її фрагментів шляхом вилучення останніх із загального рудопотоку, що найбільш ефективно й економічно реалізовується шляхом магнітного сортування.

Але перед аналізом процесів і засобів магнітної сепарації руди, варто – принаймні узагальнено – розглянути основні характеристики і властивості останньої [8].

Найбільш широко поширену групу магнетитових руд осадово-метаморфічного походження складають магнетитові кварцити і супутні їм багаті руди Криворізького та Кременчуцького залізорудних басейнів.

Для залізистих кварцитів, що містять 31-35 % заліза, характерна шарувата текстура, підвищений вміст рудних (магнетит, гематит) мінералів, понижений вміст основних оксидів ($\text{СаО} + \text{MgO}$ до 10 %), підвищений вміст кремнезему ($\text{SiO}_2 > 35 \%$), незначний вміст сірки та фосфору.

Головні рудні мінерали залізистих кварцитів – магнетит і в набагато меншій мірі гематит. Нерудні мінерали представлені переважно кварцем, силікатами, карбонатами (сидероплезитами, сидеритами, доломітом, анкеритом).

З мінералів, що містять шкідливі домішки Р і S, переважне значення мають апатит, пірит і піротин. Вміст їх в неокислених кварцитах зазвичай – незначний (0,02-0,11 %).

Залізисті кварцити за властивостями міцності відносяться до міцних і дуже міцних. Їх характерні риси – важка дробимість, подрібнюваність і висока абразивність при дробленні та подрібненні.

Грубошарові, бідні за вмістом магнетиту неокислені кварцити вимагають застосування сухої магнітної сепарації (наприклад, кварцити родовища Велика Глієватка ЦГЗК).

Тонка і дрібна вкрапленість магнетиту визначають необхідність застосування великого числа (II-IV) стадій подрібнення та магнітної сепарації для видалення породи з процесу в міру її розкриття та отримання оптимального вмісту заліза в концентраті.

У кожній стадії руда піддається подрібненню до певної крупності, класифікації в спіральних класифікаторах або гідроциклонах, піски яких повертаються на доподрібнення, а злив прямує на магнітну сепарацію з попереднім знешламлюванням живлення сепараторів або без нього.

У першій стадії збагачення застосовуються зазвичай сепаратори з прямо-точними ваннами типу 209-СЕ і ПБМ - 120/300 і в другій – з протиточними, в третій, четвертій і п'ятій – з напівпроточними. Напруженість магнітного поля у всіх стадіях – однакова і знаходиться в межах 637-876 кА/м на поверхні барабана.

Концентрати, одержувані із залізистих кварцитів, характеризуються низькою основністю (0,07-0,09) та високим кремнієвим модулем.

Коли йдеться про обладнання для магнітного розділення, якість використовуваних компонентів може суттєво вплинути на продуктивність та ефективність системи. Одним з основних компонентів обладнання для магнітного розділення є барабан магнітного розділення, який складається з корпусу магнітного розділювача та компонентів сортувального обладнання. Ці компоненти відіграють життєво важливу роль в ефективному розділенні чорних та кольорових матеріалів у різних галузях промисловості, таких як гірничодобувна, переробка та управління відходами.

Вузли барабанів магнітного розділення зазвичай заповнені феритовими магнітними блоками або магнітами NdFeB, які відомі своїми сильними магнітними властивостями. Ці магніти необхідні для притягування та відділення чорних металів від кольорових, гарантуючи, що кінцевий продукт буде високої якості та без забруднень.

Окрім магнітів, компоненти сортувального обладнання для барабанного магнітного розділення також важливі для його продуктивності. Ці компоненти зазвичай виготовлені зі сталі Q235B і повністю зварені для забезпечення міцності та стабільності. Потім ці деталі фарбуються, щоб запобігти корозії та продовжити термін їх служби, особливо в суворих промислових умовах.

Розмір та конструкція цих компонентів також є важливими факторами, які слід враховувати. Магнітні сепараційні барабани повинні бути ретельно спроектовані, щоб максимізувати магнітне поле та забезпечити ефективне розділення матеріалів.

Компоненти повинні бути спроектовані таким чином, щоб бездоганно вписуватися в обладнання для зручності встановлення й обслуговування.

Вибір високоякісних компонентів сортувального обладнання для магнітного розділення є важливим для досягнення оптимальної продуктивності та довговічності. Низькоякісні компоненти знижують ефективність, збільшують час простою та збільшують витрати на обслуговування. Тому необхідно інвестувати в компоненти, виготовлені з високоякісних матеріалів та виготовлені за точними специфікаціями.

Підсумовуючи, констатуємо: вузол магнітного сепараційного барабана, корпус магнітного сепаратора та вузол сортувального обладнання є компонентами магнітного сепаратора. Завдяки використанню високоякісних матеріалів, таких як феритові магніти або неодимові залізо-борові магніти, а також міцних сталевих компонентів та точної інженерії, обладнання може ефективно й результативно розділяти чорні та кольорові метали. Коли йдеться про магнітне розділення, якість використовуваних компонентів має вирішальне значення для забезпечення надійної та стабільної роботи.

1.2. Проблеми та перспективи магнітної сепарації

У даному підрозділі описано магнітні методи сепарації, що є найважливішими процесами при видобутку та збагаченні руд чорних, кольорових, рідкісних та благородних металів, алмазів, при знесірюванні вугілля й очищенні різних типів сировини від магнітних домішок.

Ці методи тісно переплітаються з гравітаційними й іншими в комбінованих процесах: магнітогідродинамічній (МГД), магнітогідростатичній (МГС) і електродинамічній сепарації (ЕДС), і навіть при збагаченні у важких середовищах з магнітною регенерацією, в нових спеціальних, підготовчих і допоміжних процесах.

Крім того, проведено аналіз перспектив сепарації слабomagнітних тонковкруплених руд, пов'язаних із ВГМС у сепараторах з постійними магнітами або з надпровідними магнітними системами на низькотемпературних безгелієвих кріостатах [9].

Магніти відомі людству понад три тисячі років – їм присвячено праці Аристотеля, Плінія, Фалеса Мілетського, Тита Лукреція Кара і багатьох інших вчених давньої Греції та Риму.

У згаданих й інших роботах розглядаються головні ознаки феномену магнітів, спроби тлумачення їх природи, а також – перші спроби застосування магнетизму та електрики у різних технологіях.

У середньовічному трактаті Георгія Агриколи «Про гірничу справу та металургію» докладно описано магнітну сепарацію каситериту та вольфраміту від магнетиту («Збагачення корисних копалин»).

Однак, тільки після широкого оприлюднення робіт Гілберта, Фарадея, Максвелла, Лоренца, Ампера, Столетова, Аркадьєва та багатьох інших великих фізиків електромагнітне поле було повністю поставлене на службу людству і без цього вже не мислимою стає сучасна цивілізація, її техніка та самі різноманітні технології, включаючи гірничовидобувні, у яких магнітне збагачення руд багатьох металів є чи не самим яскравим прикладом масштабності та продуктивності реалізації проявів даного феномену.

Першим патентом вважають англійський патент від 1792, виданий Вільяму Фулартону на магнітну сепарацію залізної руди, проте промислове впровадження магнітного збагачення, головним чином для залізних руд, почалося наприкінці XIX ст.

Останнім часом магнітні методи бурхливо розвиваються і є найважливішими процесами при збагаченні руд заліза, марганцю, хрому, титану, вольфраму, танталу, ніобію та багатьох інших металів, при знесірюванні вугілля та очищенні різних типів сировини від магнітних домішок.

Вони тісно переплітаються з усіма методами збагачення корисних копалин в різних комбінованих процесах: магнітогідродинамічній (МГД), магнітогідростатичній (МГС) і електродинамічній сепарації (ЕДС), в процесах згущення, магнітної фільтрації, флотації з використанням магнітного поля, а також інших. До цього часу у цій галузі зароджуються й упроваджуються в практику дедалі нові процеси й апарати (рис. 1.1).

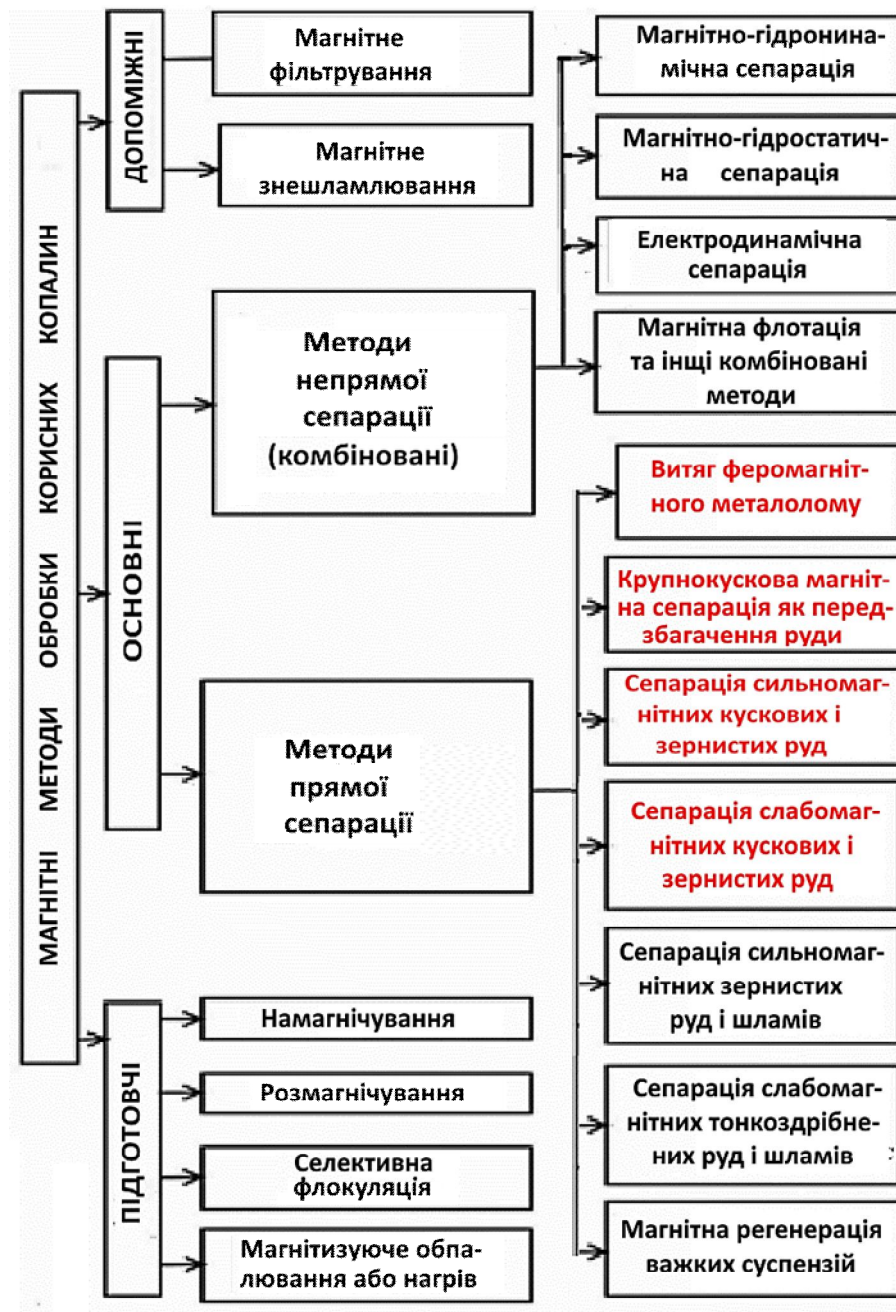


Рис. 1.1. Класифікація магнітних методів сепарації руд та місце в ній крупнокускової

За областями застосування процеси магнітного збагачення поділяються на три групи: підготовчі, основні та допоміжні (див. рис. 1.1).

До підготовчих відносять процеси магнітного уловлювання металобрухту, намагнічування та розмагнічування, процеси управління магнітною агрегацією (селективна флокуляція та ін.). Згущення або зневоднення в магнітному полі тощо належать до допоміжних процесів збагачення. Область застосування цих методів часто виходить за межі гірничої справи. Видалення залізних та інших слабомагнітних домішок магнітними методами проводиться у скляній, абразивній, керамічній, харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості, при переробці твердих побутових відходів, скрапових металів, будівельних матеріалів, теплоносіїв та ін.

Загальна технологічна перевага магнітних методів збагачення полягає в досягненні значних сил, які для сильномагнітних зерен вони можуть перевищувати силу тяжіння більше ніж у 100 разів, високої селективності дії на частинки мінералів (як правило, контрастність по магнітних властивостях мінералів, що розділяються, $\chi_1/\chi_2 \geq 10$), безпечності для персоналу, нешкідливості магнітної технології для навколишнього середовища, щодо низької собівартості магнітного збагачення, зручності управління і автоматизації процесів магнітного збагачення і т. д. Сьогодні в світі на магнітне збагачення надходить близько 3 млрд магнетитових руд на рік і хоча воно багато років знаходиться поза конкуренцією з іншими методами збагачення, завдяки високому витягу ж техніко-економічні показники загальноприйнятої технології мокрого збагачення магнетитових кварцитів на сучасних залізорудних ГЗК всього світу залишає бажати кращого, тому що для отримання товарного концентрату потрібно не менше трьох стадій подрібнення та п'яти стадій сепарації і при цьому не завжди вдається одержувати концентрати для бездоменної металургії.

Перспективність магнітного збагачення пов'язана з безперервним та інтенсивним розвитком технології виробництва магнітних матеріалів та систем – джерел сильних магнітних полів, включаючи надпровідні, параметри яких постійно покращуються, а вартість у перерахунку на 1 т сировини, що збагачується, різко знижується.

1.3. Аналіз сенсу, цілей і методів крупнокускової магнітної сепарації руд в апікації до вимог наступного їх збагачення

Аналіз особливостей та деталей крупнокускової магнітної сепарації руд без чіткого й системного усвідомлення його головного сенсу, цілей і місця в комплексі видобутку й переробки останніх є просто профанацією. А відтак, ми маємо вимушено, але обов'язково розглянути – принаймні вкрай узагальнено – основні методи збагачення залізорудної сировини, в апікації до вимог його здійснення, адже зовсім неспроста і цілком конкретно сама крупнокускова магнітна сепарація по іншому називається *передзбагаченням* руди.

Саме тому, щоб створити більш-менш цілісне уявлення про предмет дослідження даної роботи, ми проаналізували більшість з доступних інформаційних джерел, спираючись на які, насамперед, на книгу Баррі Віллса та Джеймса Фінча [10], узагальнили головні складові проблеми.

У цілому магнітні сепаратори зазвичай класифікуються на машини високої та низької інтенсивності, але сюди ми включаємо також високоградієнтні та надпровідні пристрої.

Високоінтенсивне магнітне розділення (HIMS) – це метод, який використовує високі магнітні поля для розділення феромагнітних та парамагнітних мінералів від немагнітних у безперервному процесі. Цей метод зазвичай застосовується для збагачення різних руд та мінералів.

Магнітні сепаратори низької інтенсивності використовуються для обробки феромагнітних матеріалів та деяких високопарамагнітних мінералів.

Як правило, мінерали з феромагнітними властивостями мають високу сприйнятливості за низьких напруженостях прикладеного поля і тому можуть

бути зосереджені в магнітних сепараторах низької інтенсивності ($<0,3$ Тл). Для барабанних сепараторів (рис. 1.2) низької інтенсивності, що використовуються в залізорудній промисловості, стандартне поле для сепаратора з магнітами на основі фериту становить $0,12$ Тл на відстані 50 мм від поверхні барабана [11]. Робота Murariu та Svoboda [12] також показала, що такі сепаратори мають максимальну напруженість поля на поверхні барабана менше $0,3$ Тесла. Основним феромагнітним мінералом, що концентрується в процесі переробки корисних копалин, є магнетит (Fe_3O_4), хоча гематит (Fe_2O_3) та сидерит (FeCO_3) можна обпалити для отримання магнетиту, що забезпечує хороше розділення в машинах низької інтенсивності.

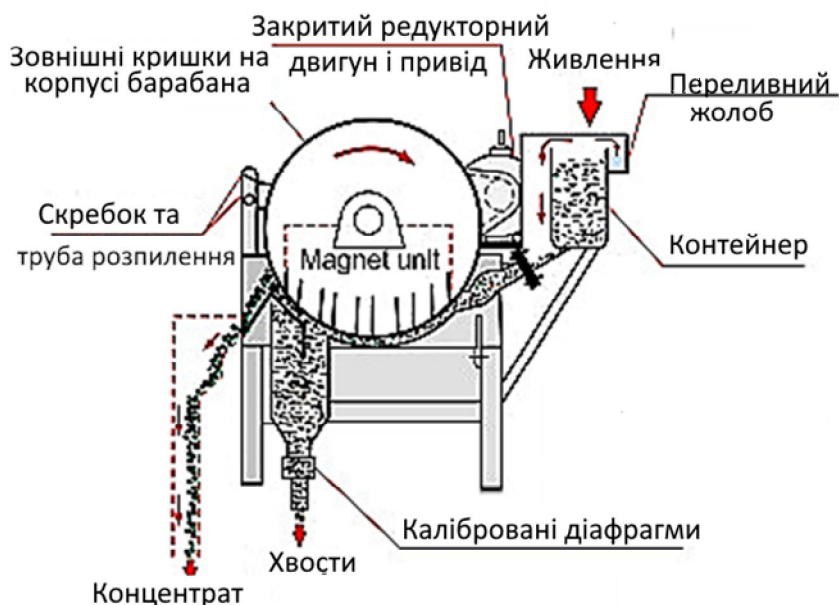


Рис. 1.2. Схема типового барабанного сепаратора [15]

Видалення «забрудненого» заліза з подавальних стрічок також можна розглядати як форму магнітної сепарації низької інтенсивності. Однак видалення заліза зазвичай здійснюється за допомогою магнітного шків на кінці рудного конвеєра (рис. 1.3) або за допомогою захисного магніту, підвішеного над конвеєрною стрічкою.

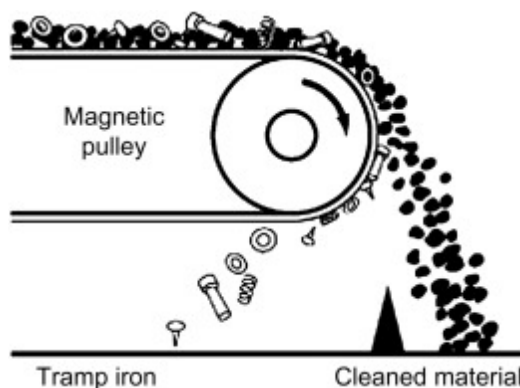


Рис. 1.3. Приклад магнітного блоку, що використовується для видалення заліза з руди перед подальшою обробкою (Джерело: Courtesy Eriez [13])

Видалення заліза є важливим перед подрібненням, а в деяких випадках видалення заліза, що утворюється внаслідок зносу молоткових тіл, може бути важливим для подальшої обробки. Поширеним прикладом останнього є обробка золотих руд, де використання магнітної сепарації (зазвичай барабанного сепаратора) перед відцентровим гравітаційним концентруванням використовується для видалення заліза та запобігання пошкодженню відцентрового сепаратора, а також для уникнення забруднення гравітаційного концентрату щільними частинками заліза.

Сухе магнітне розділення низької інтенсивності обмежується переважно концентрацією грубого піску, який є сильно магнітним, процесом, відомим як «кобінг», і часто проводиться за допомогою барабанних сепараторів. Для частинок розміром менше 5 мм сухе розділення, як правило, замінюється мокрими методами, які призводять до менших втрат пилу та зазвичай дають чистіший продукт. Мокре розділення низької інтенсивності широко використовується для переробки (та очищення) магнітних середовищ у процесах розділення щільного середовища (DMS) та для обробки феромагнітних пісків.

Загальна конструкція барабанних сепараторів являє собою обертовий, порожнистий, немагнітний барабан, що містить кілька стаціонарних магнітів змінної полярності. Сепаратор середньої інтенсивності Permos використовує багато невеликих магнітних блоків, напрямок намагніченості яких змінюється невеликими кроками. Вважається, що це створює дуже рівномірне магнітне поле, що вимагає менше магнітного матеріалу [14]. Просторове розташування магнітів у барабанному сепараторі може змінюватися залежно від конкретних вимог застосування. Це ілюструють два варіанти конфігурації магнітів, запропоновані для барабанного сепаратора низької інтенсивності Metso [15] для застосувань DMS. Дві конфігурації (рис. 1.4) демонструють компроміс між збільшенням магнітної ємності (рис. 1.4a) для захоплення більшої кількості частинок та збільшенням градієнта поля (рис. 1.4b) для захоплення дрібніших або менш сприйнятливих частинок. Конфігурація з високою ємністю має менше більших полюсів, що призводить до нижчого градієнта поля, але вищого магнітного потоку 0,12 Тл на відстані 50 мм від поверхні валка. Варіант з високим градієнтом має більше менших полюсів, що призводить до вищого градієнта поля для кращого захоплення дрібних магнітних частинок, але зі зниженою ємністю (магнітний потік лише 0,06 Тл на відстані 50 мм від поверхні валка) [15].

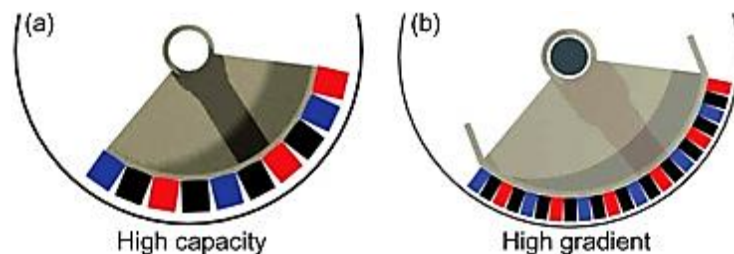


Рис. 1.4. Альтернативні конфігурації магнітів для мокрого барабанного сепаратора: високопродуктивна конструкція (a) та високоградієнтна конструкція (b) (Джерело: Metso [15])

Хоча барабанні сепаратори спочатку використовували електромагніти, у сучасних пристроях використовуються постійні магніти з використанням керамічних або рідкоземельних магнітних сплавів, які зберігають свою інтенсивність протягом невизначеного періоду [16]. Розділення в барабанному сепараторі відбувається за принципом «підбирання», коли магнітні частинки піднімаються магнітами та притискаються до барабана, а потім виводяться з поля, залишаючи немагнітні частинки (зазвичай пусту породу) у відділенні хвостів. Для забезпечення потоку вводиться вода, яка утримує пульпу у суспензії. У цьому типі сепаратора можна отримати інтенсивність поля до 0,7 Тл на поверхнях полюсів.

Барабанні сепаратори, показані на рисунках 1.2 та 1.5, є устроями паралельного типу (як показано на схемі потоку в резервуарі сепаратора на рисунку 1.5), при цьому концентрат переноситься барабаном вперед і проходить через зазор, де він стискається та зневоднюється перед тим, як вийти з сепаратора. Така конструкція є найбільш ефективною для отримання чистого магнітного концентрату з відносно грубих матеріалів (до 6–8 мм) і широко використовується в системах відновлення щільних середовищ. Окрім паралельної конструкції (рис. 1.5), барабанні сепаратори також можуть бути налаштовані з протитечійною та протиобертовою конструкціями (рисунки 1.6 та 1.7).

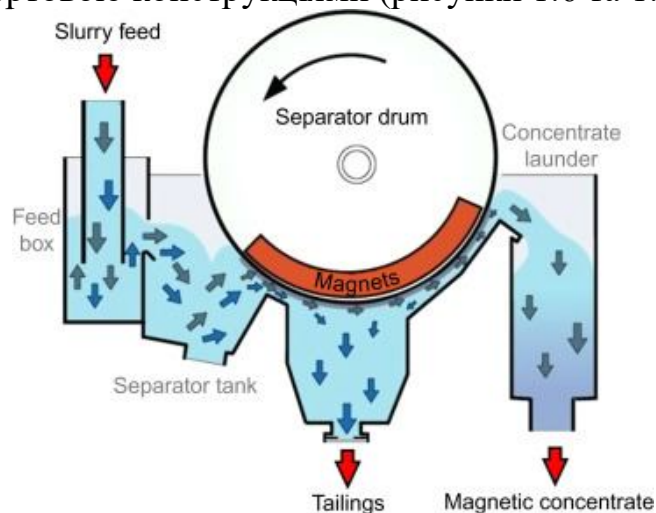


Рис. 1.5. Паралельна конфігурація барабанного сепаратора мокрого типу
(Джерело: Metso [15])

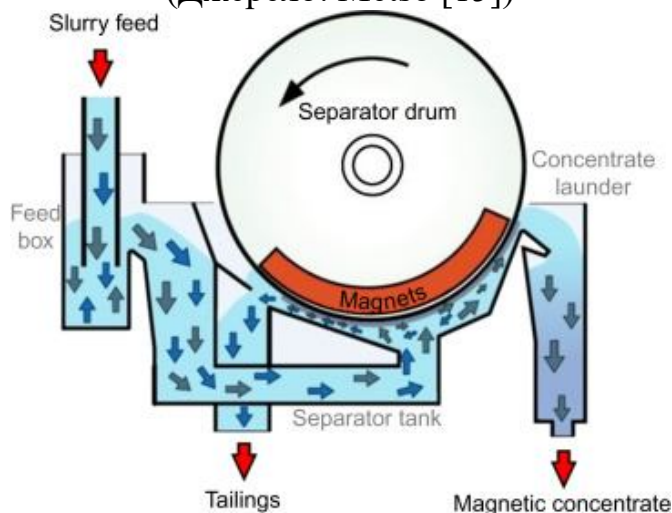


Рис. 1.6. Конфігурація протитечії барабанного сепаратора мокрого типу
(Джерело: Metso [15])

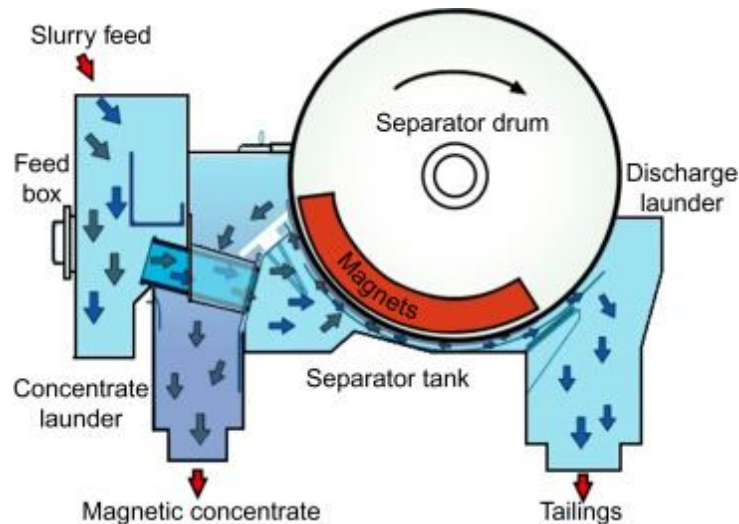


Рис. 1.7. Конфігурація мокрого барабанного сепаратора з протилежним обертанням (Джерело: Metso [15])

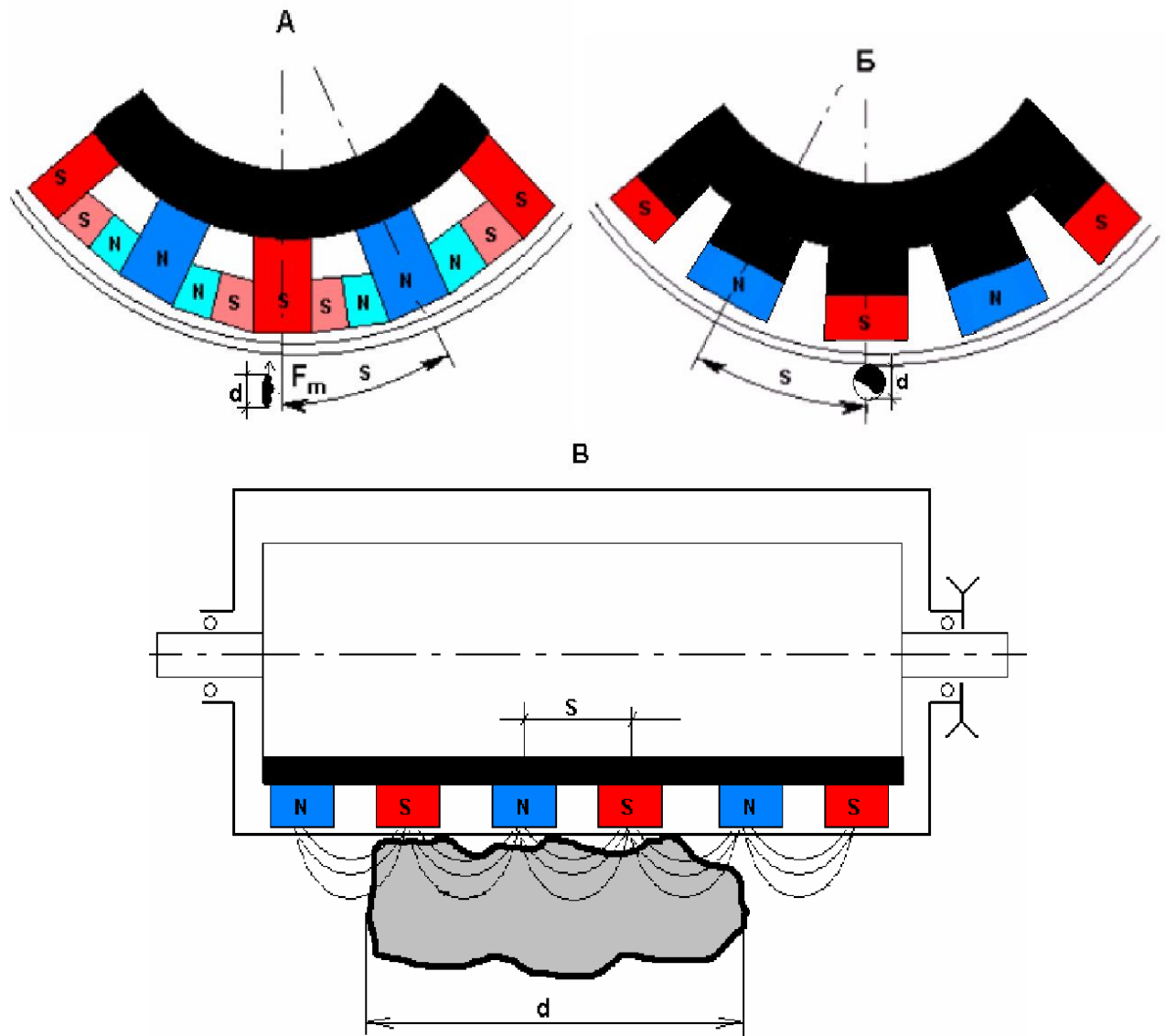
У протитечійному сепараторі хвости змушені рухатися в напрямку, протилежному обертанню барабана, і скидаються в хвостосховище. Цей тип сепаратора призначений для фінішних операцій з відносно дрібним матеріалом, розмір частинок якого менше приблизно 800 мкм. Щільність пульпи в цьому типі сепаратора зазвичай нижча, ніж у конфігурації з паралельним обертанням.

Третя можлива конфігурація – це тип з протилежним обертанням, де подача тече в напрямку, протилежному обертанню. Цей тип використовується в чорнових операціях, де необхідно впоратися з епізодичними стрибками подачі, і де втрати магнітного матеріалу повинні бути мінімальними при високому завантаженні твердих речовин, при цьому не потрібен надзвичайно чистий концентрат.

Серед найважливіших технологічних завдань, які стоять перед магнітними методами збагачення, можна назвати такі:

- збільшення ефективності магнітного збагачення сильномагнітних руд з отриманням високоякісних концентратів ($> 70\% \text{ Fe}$) - сировини для процесів бездомної металургії. Це найважливіша умова прогресу у чорній, кольоровій металургії та суміжних галузях. Як показали наші дослідження, це можливо за допомогою ВСММС чи високоградієнтної сепарації (дані НДАУ, ВАТ «Магніс») навіть без застосування флотації;
- підвищення вилучення металів із слабомагнітних руд на основі високоградієнтної та надпровідної сепарації шлаків, промпродуктів та хвостів. Це найважливіше завдання при збагаченні руд рідкісних металів, вольфраму, марганцю, хрому тощо;
- комплексне використання родовищ корисних копалин на основі застосування комбінованих з магнітними методами збагачення;
- рудопідготовка та попереднє збагачення руд у процесах відкритих гірничих робіт на основі пересувних установок з магнітними сепараторами, що дозволяють не тільки різко підвищити «бортовий вміст» та інші технологічні показники збагачення, а й уможливить експлуатацію численних родовищ руд рідкісних металів з малими запасами, які руді;

Ці завдання проаналізовано у такій самій послідовності. При проектуванні магнітних систем з полярністю, що чергується, для барабаних сепараторів нами враховувався також критерій співвідношення розмірів частинок і кроку полюсів K_r , що визначає область їх застосування (ММС, СМС і магнітна рудорозбірка в кар'єрі).



Аналізуючи речовий склад подрібненої руди, можна побачити крім великої кількості відкритих зерен порожньої породи, а також значну частину відкритих зерен магнетиту вже після першої стадії самоподрібнення (30-50%). Це готовий концентрат, який за законами збагачення має бути виведений із циклів подрібнення, зменшуючи витрату енергії на процеси подрібнення, що викликає ошлямування магнетиту, а також втрати його у відвальних хвостах. Для стадіального виділення магнетитового концентрату розроблено та випробувано різні конструкції сепараторів та на їх основі створено експериментальний зразок такого сепаратора ВСПБМ-32,5/20. На основі цих випробувань було виконано проект нового дослідно-промислового високоселективного сепаратора ВСПБМ-90/100, який був виготовлений у 2010 р. заводом «Рудгірмаш». У конструкції цього сепаратора вже закладено значні діапазони регулювання його оптимальних конструктивно-технологічних параметрів (модуляція амплітуди та частоти магнітного поля й ін), а велика довжина робочої зони (кут охоплення – 3600) підвищує його продуктивність (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Зовнішній вигляд дослідно-промислового сепаратора ВСПБМ-90/100

Його промислові випробування показали можливість виділення з магнітного продукту першої стадії збагачення концентрату з 68,8% до 20% при виході (підвищення якості вихідного продукту на 17%), а після другої стадії збагачення (магнітний продукт після першої стадії містить багато скрапу) концентрації якості вихідного продукту на 11%). Після успішних промислових випробувань

сепаратор має стати основою серійного сепаратора ВСПБМ 120/300. На використання такого сепаратора розрахована нова технологія, що базується на даних численних промислових та стендових випробувань усіх сепараторів цього типу.

У роликівих, валкових і високоградієнтних сепараторах з сильним полем верхня межа магнітної індукції полів у сепараторах з електромагнітними системами теоретично становить 2 Тл, але практично досягають індукцій не вище 1,5-1,8 Тл, що пов'язано з наближенням до магнітних систем сепараторів.

Дослідно-промисловий зразок сепаратора 4ЕОМ-38/275, виготовленого Поварівським дослідним заводом у виконанні для збагачення слабомагнітних руд крупністю 10,1 мм, пройшов приймальні випробування на збагачувальній фабриці та прийнятий у серійне виробництво. Його продуктивність – 35 т/год на матеріалі крупністю -3 мм, відповідає його вазі – 38 т. Цей сепаратор також ефективний при збагаченні дрібних класів марганцевих руд.

Магнітні властивості гематиту в 1000 разів нижче, ніж у магнетиту, тому збагачувати магнітними методами окислені кварцити також легко як магнетитові не вдавалося до середини минулого століття, але для цієї мети в 70-і роки в СРСР і за кордоном вже був розроблений і випробуваний ряд високоградієнтних магнітних сепараторів. (ВГМС): електромагнітний сепаратор 6ЕРМ-35/315 («Магніс ЛТД», Україна); такого ж типу високоградієнтний магнітний сепаратор для мокрого збагачення «Лопез» ЕР-317 (фірма КНЕ, ФРН) та його зменшена копія сепаратор SnP-2000 (ЧДМНДІ, Китай); високоінтенсивний сепаратор із вертикальним ротором SLon (Китай); високоінтенсивний сепаратор з вертикальним ротором (Чехія); сепаратор типу «Карусель» фірми «Сала», сепаратор «Соло» фірми Крупп та багато інших.

Загальним недоліком усіх сепараторів ВДМС, що обмежує їх широке впровадження, є їхня висока енергоємність, велика маса (до 200 т, що потребує спеціальних фундаментів та перекриттів) і, як наслідок, – висока вартість.

Вперше зроблено успішну спробу створення ВГМС на високоенергетичних постійних магнітах типу Nd-Fe-B або Sm-Co (Євразпатент № 014396 від 29.10.2010р.). У цьому сепараторі використано кулькове високоградієнтне середовище, здатне ефективно працювати при напруженості поля збудження, доступного постійним магнітам. Їхня працездатність була доведена експериментально. По суті основою цього процесу є матриці – високоградієнтні магнітні осаджувальні поверхні (рифлені пластини, шари куль, стрижнів, сіток, дротів, сталевих вовни й ін.). Високоградієнтне середовище, незалежно від його типу та форми, виготовляється з матеріалів з високою магнітною проникністю, низькою залишковою індукцією, високою корозійною зносостійкістю.

Як показали численні дослідження, з точки зору рівня магнітної індукції в камері (або напруженості поля збудження) при заданій вільній м.д.с. на полюсах, найбільш зручною формою є кулі відносна магнітна проникність шару яких досягає 2-2,5. Це дозволяє знизити пороговий рівень напруженості збудження зовнішнього поля сил в об'ємі робочої камери до значень, досяжних у системах з постійними магнітами типу Nd-Fe-B або Sm-Co.

При збагаченні окислених залізних руд за магнітною та комбінованими технологіями можна отримати сумарний магнетит-гематитовий залізорудний

концентрат із загальним виходом до 49 %, при вмісті 65 % $\text{Fe}_{\text{заг.}}$ та витягу до нього до 81 % Fe. У принципі, це межа технологічних можливостей магнітних методів, зокрема процесу ВДМС. Подальше «форсування» силового режиму поділу мінералів можливе лише на полях надпровідних магнітних систем. Такі роботи вперше розпочато МГІ та ІМЕТ у 1969-73 рр. на основі Nb-Ti – надпровідного кабелю НТБ-1, розробленого ІМЕТ [17]. Це багатожильний композиційний надпровідник, в мідному чохлі якого діаметром 0,5 мм знаходиться 19 жил сплаву «Ніобій-титан» діаметром 50 мкм. Його критичне поле $H_c > 4$ МА/м, а густина струму $I_c = 50$ А/мм². Для проведення лабораторних досліджень з використанням надпровідності МДІ спільно з ІМет ім. Байкова ще в 1972 році був розроблений та виготовлений надпровідний (НП) соленоїд, розрахований на напруженість магнітного поля в центрі його робочого об'єму $H = 3,2$ МА/м при щільності струму в композиційному надпровіднику (Nb-Ti, кабель НТБ-1), $j = 2 \cdot 10^4$ А/см². Практична перевірка роботи надпровідного соленоїда підтвердила повну відповідність фактичних параметрів розрахунковим.

Кріостат розроблений у ФІАН ім. Лебедева, мав азотний екран, вакуумні сорочки і канал для теплового поля внутрішнім діаметром 20 мм, зовнішнім 40 мм (він же – внутрішній діаметр соленоїда).

Загальна довжина каналу 250 мм, довжина соленоїда 100 мм. Мінімальний об'єм гелію в кріостаті становив 4 л, витрата при нормальній роботі установки – 1,5 л/год (не враховуючи витрати на початкове охолодження). Результати проведених на ньому експериментів показали можливість прямої, високоградієнтної та магнітогідродинамічної сепарації тонкоподрібнених слабomagнітних матеріалів (окислених залізистих кварцитів ЦГЗК, марганцевих шлаків МГЗК, високосірчистого вугілля Донбасу та інших) в сильних неоднорідних магнітних полях, створених розробленими надпровідними соленоїдами (рис. 1.10).

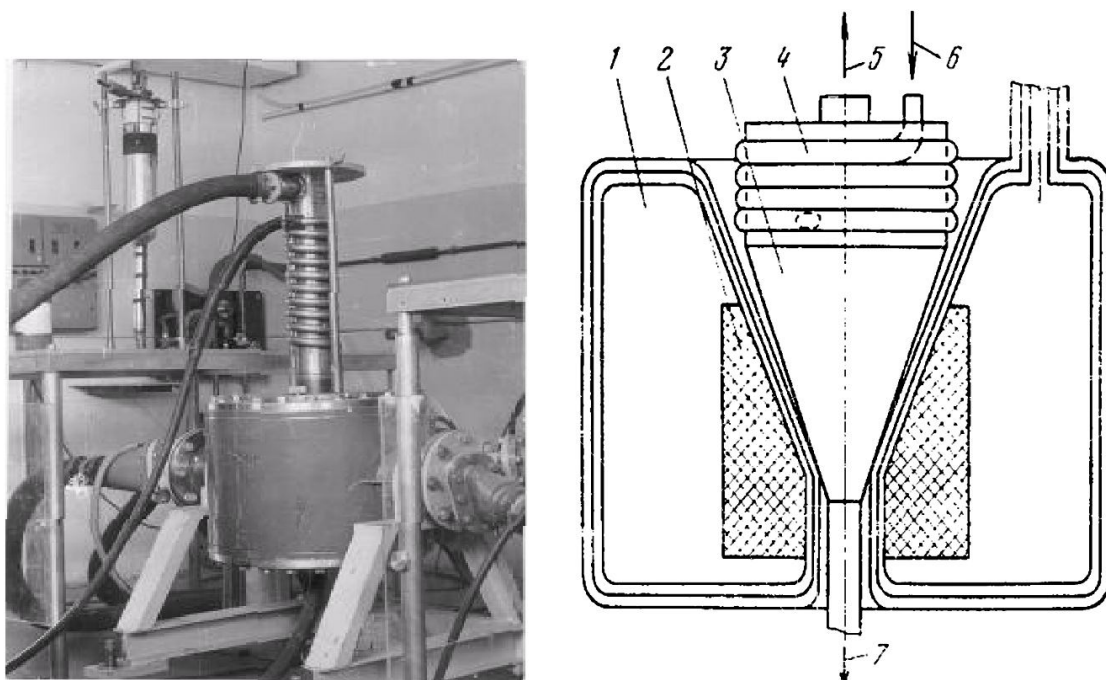


Рис. 1.10. Схема магнітного гідроциклону (а): 1 - кріостат з теплим полем; 2 - надпровідний соленоїд; 3 - циліндр

Як апарат безперервної дії, прийнятної для створення промислового СП-сепаратора, був розроблений і запатентований магнітний гідроциклон (А.с. №

522857, Бюл. изобр. №28, 1976 р.). Змінюючи профіль соленоїда (наприклад, трапецієподібний), можна регулювати градієнт магнітного поля по осі соленоїда.

1.4. Магнітне розділення в первинній переробці руд у кар'єрі

Як зазначалося вище, грубе магнітне розділення – це процес, який використовується для відділення крупних магнітних частинок (зазвичай від 10 до 120 мм) від інших немагнітних або слабomagнітних матеріалів. Цей метод часто застосовується після грубого дроблення, перед тонким подрібненням, для вилучення залізної руди, захисту обладнання шляхом видалення великих залізних уламків (таких як болти, скоби шматки тросів, скрап тощо) та зменшення кількості матеріалу, що підлягає обробці. Магнітні блокові сепаратори є поширеним прикладом такого обладнання, здатного обробляти великі обсяги сипучих матеріалів [18].

1. Призначення та застосування

Попереднє збагачення руди: Відділення феромагнітних руд, таких як магнетит або гематит, від навколишньої породи перед наступними етапами обробки.

Захист обладнання: Видалення небажаних залізних частинок (гвинтів, болтів, гайок, уламків деталей машин, уривків тросів і т.п.) з потоків сипучих матеріалів, таких як вугілля, руди й інші корисні копалини, щоб запобігти пошкодженню млинів, дробарок та іншого обладнання.

Вилучення заліза: Вилучення крупного металобрухту для переробки металу.

Методи й обладнання

Надстрічкові сепаратори: Це магнітні сепаратори, які працюють над конвеєрними стрічками для захоплення великих залізних предметів, що проходять через потік матеріалу.

Магнітні шків: Встановлені в кінці конвеєрної стрічки, вони створюють магнітне поле, яке притягує залізні частинки та відокремлює їх від решти матеріалу.

Встановлення після грубого дроблення: Встановлення зазвичай виконується одразу після першого етапу дроблення, до того, як матеріали будуть подрібнені до дрібних частинок.

Переваги

Ефективність: Дозволяє швидко розділяти великі обсяги матеріалу.

Зниження витрат: Зменшує кількість матеріалу, що підлягає обробці на етапах тонкої обробки (подрібнення та мокре подрібнення), тим самим знижуючи експлуатаційні витрати.

Надійність: Захищає обладнання від пошкоджень, спричинених металевими уламками [18].

2. Основні засоби крупнокускової магнітної сепарації

Як впливає з назви, магнітне розділення передбачає використання магнітної сили для відділення магнітних матеріалів від немагнітних мінералів. Цей метод зазвичай використовується в переробній промисловості, і принцип його

дії досить простий. Ця техніка найбільш популярна в гірничодобувній промисловості, де компаніям потрібно відокремлювати металовмісні від неметалевих мінералів. Перевага магнітного розділення полягає в тому, що воно не передбачає складних багатоопераційних технологій або тривалих хімічних реакцій для розчинення металів, присутніх у мінеральних рудах. Порівняно з альтернативними методами розділення металів, такими, як екстракція вуглецем, біовилуговування та пінна флотація, магнітне розділення є достатньо простим, економічно ефективним, швидшим й ефективнішим [19], а головне – в ракурсі теми даної роботи – *цілком придатним для первинного відбору крупнокускової руди*.

У виробничих умовах зазвичай для магнітного розділення руди використовується спеціалізовані магнітні сепаратори-конвеєри різної конструкції та комплектації для пропускання руди через магнітне поле за допомогою потужних магнітів, встановлених вздовж шляху конвеєра (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Експериментально-промислова лінія магнітного розділення руди (Джерело: <https://fr.gme-magnet.com/info/magnetic-separation-in-mineral-processing-17105077363631104.html>)

Однак, інші типи сепараторів, використовуючи подібну концепцію до сепараторних конвеєрів, замість цього можуть використовувати магнітні барабани або шківів. Коли мінерали проходять через магнітне поле, будь-які металеві домішки притягуються до магніту та осідають на магнітній поверхні, тоді як немагнітні мінерали продовжують рух вздовж конвеєра та потрапляють у спеціальний контейнер. Зараз, окрім магнітних сепараторів на конвеєрній основі, існують також магнітні сепаратори, які можна використовувати для видалення металів з руди шляхом пропускання її через потужний магніт за допомогою струменя води.

Деякі магнітні сепаратори призначені для вилучення дрібних, порошкоподібних металевих частинок в процесах збагачення, тоді як інші можуть видаляти більші частинки та навіть крупні куски руди. Таким чином, незважаючи на

популярність магнітних сепараторів-конвеєрів, існують різні опції для задоволення конкретних потреб у переробці корисних копалин.

3. Типи магнітних сепараторів

Як згадувалося вище, наразі є широкі можливості придбати спеціалізовані магнітні сепаратори для широкого спектру застосувань у видобутку та переробці корисних копалин. Нижче наведено основні типи магнітних сепараторів, які можна придбати, наприклад у GME MAGNET.

Найпростішим і поширеним є потужний електромагнітний підйомник, що можна встановлювати на кран або екскаватор, який може живитися від генератора або заводської електроенергії.

Електромагнітний кран – це вид підйомної машини, яка використовує електромагнітні принципи для перенесення магнітних матеріалів. Основною частиною електромагнітного крана є магніт. За увімкненого струму електромагніт захоплює залізовмісні куски та транспортує їх до призначеного місця. При відключенні струму магнетизм зникає, і куски відпускаються.

Серцевина електромагніту намотана котушками, які проводять струм. Розмір осердя та кількість витків дроту, через який проходить струм, визначають вантажопідйомність. Збільшення обох компонентів безпосередньо збільшує вантажопідйомність магніту крана. Потужна вантажопідйомність часто використовується при магнітній сепарації (розбиранні) цінних, але незначних за обсягом та площею робочої зони рудних складів, оскільки обмежується циклічністю дії. А легке керування та регулювання шляхом вмикання і вимикання електроживлення забезпечує безпроблемний робочий процес.

3.1. *Конвеєр-магнітний сепаратор*

Як згадувалося раніше, магнітні сепаратори-конвеєри є найпоширенішим типом магнітних сепараторів, що поєднують конвеєрні стрічки з потужними магнітами для вилучення металевих частинок з руди. Основною перевагою магнітних сепараторів-конвеєрів є те, що їх можна використовувати для транспортування руди, одночасно вилучаючи металеві забруднювачі. Поєднання двох операцій в одній машині робить переробку корисних копалин більш оптимізованою й ефективною.

Конвеєри з магнітними сепараторами можна адаптувати до широкого спектру застосувань у гірничодобувній промисловості, наприклад, для сортування мінеральної сировини та продукції (рис. 1.12).

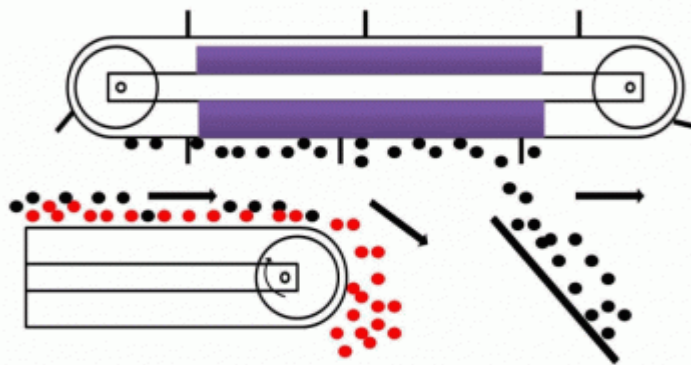


Рис. 1.12. Принцип дії надстрічкового магнітного сепаратора

3.2. *Надстрічкові (підвісні) магнітні сепаратори*

Надстрічкові або підвісні магнітні сепаратори – це ще один поширений тип магнітного розділення, подібний до методу конвеєрної стрічки. Однак, замість переміщення руди вздовж конвеєрної стрічки, ці типи магнітних сепараторів встановлюються вздовж шляху транспортування руди.

Надстрічкові магнітні сепаратори постійно обертаються та видаляють металеві домішки з руд, коли вони проходять під підвісним магнітним сепаратором. Головною перевагою підвісних сепараторів є те, що вони автоматично видаляють металеві домішки після їх відділення від руди. Як результат, ви можете довше виконувати операції з переробки корисних копалин без необхідності ручного видалення металевих домішок.

Магнітні барабанні сепаратори ідеально підходять для переробки дрібних руд завдяки своїй закритій конструкції. Обертовий магнітний барабан, розміщений у центрі барабанного сепаратора, використовується для відділення металів від мінерального вмісту (рис. 1.13).

Рис. 1.13. Барабанні сепаратори та ілюстрація їхньої дії: 1 – бункер; 2 – грохот; 3 – стрічка; 4 – магнітний барабан; 5 – немагнітний матеріал; 6 – магнітний матеріал; 7 – привідний барабан

Барабанні сепаратори складаються з потужного магніту, укладеного в обертову сталеву зовнішню частину, яка відповідає за збір металевих домішок. Мінеральна руда зазвичай подається зверху та рівномірно падає на обертовий барабан всередині барабанного сепаратора. Хоча металевий вміст залишається на зовнішній стороні барабанного сепаратора, немагнітний мінерал проходить через цей сепаратор, утворюючи очищену руду. Завдяки своїй закритій конструкції, ці типи сепараторів ідеально підходять для відділення дрібних металевих частинок під час переробки корисних копалин.

Магнітне блокове розділення

Це – одні з найефективніших типів металевих сепараторів для конвеєрних стрічок, що використовуються для транспортування мінеральних руд. Ці типи сепараторів встановлюються замість звичайних блоків і, завдяки своїй магнітній природі, відокремлюють магнітні домішки від мінерального вмісту. Основною перевагою використання магнітних блокових сепараторів для переробки корисних копалин є автоматизоване відділення металевих залишків від постійного потоку сирової руди.

На додаток до цих основних типів магнітних сепараторів, існують вологі магнітні сепаратори, які використовують принципи, подібні до барабанних сепараторів. Однак замість видалення забруднень із сухої руди, ці альтернативи видаляють металевий вміст з вологої руди за допомогою постійного потоку води.

4. Важливість магнітного розділення в переробці корисних копалин

Магнітне розділення є важливим досягненням у переробці корисних копалин, що дозволяє компаніям видобувати цінні мінерали з необробленої руди. Оскільки більшість корисних копалин видобуваються зі складних джерел, зазвичай існує висока концентрація металів, які важко розділити без використання магнетизму. Ось деякі основні переваги використання магнітних розділювальних машин у переробці корисних копалин:

4.1. Підвищена чистота мінералів

Магнітне розділення пропонує значну перевагу в переробці корисних копалин, видаляючи метали з високою швидкістю. Використовуючи дуже мало електроенергії та потребуючи дуже малого обслуговування, магнітні сепаратори можуть пришвидшити переробку корисних копалин.

Швидко очищаючи мінерали та видаляючи металеві домішки, магнітне розділення дає перевагу з точки зору швидкості та якості.

4.2. Магнітне розділення не тільки швидше, але й економічно ефективніше порівняно з іншими методами розділення металів, доступними сьогодні. Немає додаткових хімікатів або складних вимог до обслуговування, пов'язаних з магнітним розділенням.

Після встановлення та налаштування магнітного розділення для підприємства з переробки корисних копалин можна використовувати ці високоякісні пристрої за невелику плату або безкоштовно.

4.3. Висока точність

Ще однією причиною, чому слід використовувати магнітні сепаратори для операцій з переробки корисних копалин, є висока точність цих машин. Якщо

своєчасно чистити магнітні сепаратори та регулярно проводите їх технічне обслуговування, вони видаляють майже 100% чорних металів з руди.

5. Поширені застосування магнітної сепарації

Переробка корисних копалин – це величезна галузь, що охоплює різні види їх фізичних, хімічних й інших перетворень. В основі технологій з переробки корисних копалин лежить концепція видобутку й очищення руди, щоб вона була готова до використання як сировина для подальшої переробки. *Як результат, магнітна сепарація може бути використана для технології крупнокускової магнітної сепарації залізистих кварцитів при видобутку їх в кар'єрах ГЗК.*

6. Типові конструкції магнітних сепараторів

Магнітні сепаратори доступні в широкому асортименті моделей, і кожен варіант конструкції відповідає потребам конкретних операцій з переробки корисних копалин. Вибравши правильну конструкцію для операції з переробки корисних копалин, можна підвищити ефективність, зменшити споживання енергії та знизити експлуатаційні витрати. Ось деякі з моделей магнітних сепараторів, з яких можна вибрати:

6.1. *Барабанні магнітні сепаратори*

Ця конструкція ідеально підходить для відділення грубих і дрібних магнітних частинок від мінеральної руди. Як випливає з назви, барабанні магнітні сепаратори працюють шляхом обертання магнітного барабана для збору залізних частинок, таких як залізо, з руди. Найкраща частина цієї конструкції магнітного сепаратора полягає в тому, що вона досить проста та легка в обслуговуванні.

На сьогоднішній день не є проблемою знайти барабанні магнітні сепаратори з різною магнітною силою, швидкістю обертання та розмірами. Кожна руда по-різному потрапляє на магнітний барабан, тому правильні характеристики барабанного сепаратора важливі для досягнення найкращої можливої ефективності.

6.2. *Мокрі магнітні сепаратори*

Як випливає з назви, конструкція мокрого магнітного сепаратора призначена для роботи з мінералами у суспензійній формі. Ці сепаратори використовують комбінацію потоку води для переміщення руди через магнітне поле та магнітного осердя, яке збирає всі залізні частинки.

Ця конструкція ідеально підходить для очищення гематиту, магнетиту та ільменіту, серед інших типів вологих мінералів.

6.3. *Високоградієнтні магнітні сепаратори*

Ця конструкція магнітного сепаратора менш поширена, ніж інші варіанти, згадані вище. Високоградієнтні магнітні сепаратори ідеально підходять для видалення слабкомагнітних частинок з руди. Ключова концепція високоградієнтних магнітних сепараторів полягає в пропусканні руди через матрицю з тонких дротів із сильним магнітним полем.

Коли руда проходить через цю матрицю із сильним магнітним полем, вона відділяє слабкомагнітні частинки. Якщо працюють з мінералами, де точність та правильність магнітного розділення є критично важливими, високоградієнтні магнітні сепаратори – найкращий варіант. Деякі мінерали, які отримують вигоду від сильних та точних розділювальних можливостей цієї конструкції, включають кварц та каолін.

6.4. *Вихрострумові сепаратори* – це унікальна конструкція магнітних сепараторів, оскільки вони можуть видаляти навіть кольорові метали, такі як алюміній, мідь та литі під тиском метали. Ці сепаратори ідеально підходять, коли руда містить кольорові забруднювачі, які необхідно видалити. Однак ці спеціалізовані типи сепараторів використовуються лише в дуже специфічних випадках.

Таким чином, магнітна сепарація швидко впроваджується в промисловості з переробки корисних копалин. Зокрема GME Magnet пропонує високоякісні магнітні рішення для широкого кола галузей промисловості зі 100% успіхом [19].

Висновки за розділом 1

Надпровідні системи вже в даний час дозволяють досягати індукцій 10 Тл, але, враховуючи при цьому магнітне насичення слабomagнітних мінералів, що сепаруються, навряд чи потрібна індукція понад 5 Тл. На думку провідного спеціаліста у цій галузі – проф. Яна Свободи навіть при очищенні каоліну в матрицях зі сталеної вовни (вати) індукція в робочому просторі не повинна перевищувати 5 Тл. Виняток становлять процеси МГД- і МГС-сепарації, у яких зі зростанням індукції зменшується щільність струму або вартість магнітних рідин, тому доцільним є значне збільшення індукції, в допустимих техніко-економічних межах:

- основними процесами магнітної сепарації із застосуванням надпровідних магнітних систем можуть бути: магнітна сепарація в криволінійних каналах, що створюють надійні утримуючі сили; магнітогідродинамічна та магнітогідростатична сепарація; магнітоадгезійна сепарація; магнітоцентробіжна сепарація; флотація в магнітному полі та ін;

- перспективи розвитку магнітної сепарації слабomagнітних руд у найближчому майбутньому пов'язані із застосуванням надпровідних та потужних соленоїдних магнітних систем;

- використання надпровідних систем стимулює народження нових процесів магнітного й електричного збагачення, але вибір типу системи (надпровідної чи потужної електромагнітної) для вже існуючих конструкцій магнітних сепараторів визначається лише економікою.

Висока вартість експлуатації гелієвих кріостатів стримує широке використання надпровідних магнітних систем. Поява азотних кріостатів цієї проблеми не вирішує через низьку щільність критичних струмів у високотемпературній металокераміці. Однак у багатьох країнах ведуться дослідження з розробки композитних азотних кріостатів, де додаткове зниження температури здійснюється за допомогою магнітокалоричного ефекту або ефекту Пельтьє. Перший викликає зниження температури магнетика за його адіабатичного намагнічування (розмагнічування), а другий поглинає тепло при проходженні електричного струму через контакт двох різнорідних провідників. Величина тепла і його знак залежать від виду контактуючих речовин, сили струму і часу проходження струму, тобто кількості тепла, що поглинається, є пропорційною кількості заряду, що пройшов через контакт. Якщо охолоджувати бік елемента Пельтьє (тер-

мопари), то температура холодної сторони стає ще нижчою. В одноступінчастих елементах, залежно від типу елемента і величини струму, різниця температур може досягати приблизно 70° , що дозволить досягти температури, необхідної для успішної роботи освоєних Nb-TiNb₃-Sn та інших надпровідних кабелів сильноточних в кріостатах навіть без використання гелію.

У магнітній сепарації, як правило, використовують відмінності в питомій магнітній сприйнятливості, так як вона безпосередньо пов'язана з магнітною силою, але навіть мінерали з близькими значеннями сприйнятливості можна розділяти за відмінностями в температурі Кюрі (терромагнітна сепарація), за різницею в швидкості їх намагнічування (динамічна гістерезисна сепарація), коерцитивної сили (магнітогравітаційна сепарація та дешламація) й ін.

У комбінованих процесах магнітно-гідростатичної (МГС-) і магнітно-гідродинамічної (МГД-) сепарації силовий вплив магнітного або схрещених електричного і магнітного полів (сила Лоренца) викликає поділ мінералів навіть без безпосередньої дії електричної або магнітної сили на частинки, що розділяються. Останні поділяються за щільністю, електропровідністю тощо. Це свого роду зворотна сепарація – магнітне виштовхування, яка набула широкого поширення при збагаченні руд рідкісних, благородних металів, алмазів тощо [6].

В електродинамічній сепарації магнітне вилучення здійснюється за рахунок взаємодії магнітного моменту, наведеного в провідній частинці зовнішнім змінним електромагнітним полем індукційними струмами, з постійним, неоднорідним магнітним полем сепаратора. Частота і амплітуда змінного електромагнітного поля визначаються провідністю і розмірами частинок, що видобуваються, і дозволяють відокремлювати метали від непровідних частинок. При сепарації, коли розміри видобутих частинок відносно великі, обмежуються неоднорідним магнітним полем, що біжить, 3-фазного лінійного статора, яке й наводить магнітний момент в металевих частинках і взаємодіє з ними, викликаючи їх високе вилучення.

Особливе місце в магнітному передзбагаченні займають методи сепарації з попередньою магнітною підготовкою матеріалів, спрямованої на посилення магнітних властивостей мінералів або на підвищення їх контрастності. Методи такої підготовки можуть бути різними: фізичні, хімічні, термохімічні і т.д.

Деякі з них є технологічно самостійними: наприклад обпал-магнітне збагачення, що застосовується для збагачення окислених залізних руд і піритовмісних промпродуктів. Цей процес досить добре освоєний у промисловому масштабі.

Аналіз збагачувальної світової техніки та технологій показує, що, починаючи з п'ятдесятих років минулого століття донині, жоден метод сепарації не розвивався такими швидкими темпами, як магнітний та комбіновані з ним. У цьому напрямі отримано тисячі патентів, а впровадження у промисловість нових магнітних методів є надзвичайно ефективним, як з економічної точки зору, так і з екологічної, підвищуючи вилучення металів та підвищуючи обсяги їх виробництва, комплексне використання сировинної бази, відкриваючи дорогу новим процесам металургії.

Розділ 2

ПЕРСПЕКТИВНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУД

2.1. Сучасні тенденції в магнітній сепарації рудних потоків

Магнітні методи зараз усе ширше застосовуються в галузі видобутку та переробки корисних копалин для концентрування магнітних компонентів або для видалення магнітних домішок. Однак, гірничодобувна промисловість стикається з такими труднощами, як зниження вмісту та розміру вивільнення цінних компонентів і збільшення кількості шкідливих компонентів у магнітних рудах, а також зі зростаючою потребою скорочувати витрати й уникати забруднення навколишнього середовища під час гірничого процесу. Такі проблеми необхідно враховувати при розробці нових магнітних методів, відповідних вимогам щодо екологічних та сталих показників.

За останнє десятиліття зростаюча переробка низькосортних та тонко вивільнених магнітних руд, які раніше викидалися як хвости, стала перспективною пропозицією [20] через зростання попиту на сировину. Наприклад, магнетитові та гематитові руди з вмістом заліза нижче 15% та 25% заліза відповідно прибутково експлуатуються в результаті різкого зростання цін на сировину в чорній та сталеливарній промисловості. При розробці таких магнітних руд у більшості випадків неминуче потрібне попереднє збагачення для підвищення якості сировини й економічної ефективності технологічних схем; однак це призводить до значних втрат магнітних властивостей у хвостах через недостатню кількість магнітних методів, доступних для попереднього збагачення таких руд. З цієї точки зору, розробка нових магнітних методів, придатних для попереднього збагачення низькосортних та дрібносортних магнітних руд, до яких належать залізисті кварцити Кривбасу, є нагальною проблемою, яка потребує оперативного вирішення.

На відміну від методів флотації, магнітна сепарація є потужним методом маніпулювання магнітними частинками та не вимагає хімічних речовин, які є причиною високих експлуатаційних витрат та екологічних проблем. Однак при переробці низькосортних магнітних руд флотація практично необхідна для покращення первинних концентратів для отримання з них вже високоякісних концентратів.

Цей результат зумовлений сильним захоплюючим ефектом магнітної сили на низькосортні зрощення, що погіршує якість магнітного продукту. В останні роки з'явилася увага до розробки нових магнітних методів, таких як відцентрова високоградієнтна магнітна сепарація [21] або інші фізичні методи, для виробництва кваліфікованих високоякісних концентратів, і це вимагає кращого розуміння теоретичних та операційних принципів магнітної сепарації, а також потребує інноваційного проектування магнітного обладнання з вищою селективністю до магнітних частинок.

Теоретично, технологічне значення надпровідної високоградієнтної магнітної сепарації є значним завдяки її перевагам низького енергоспоживання та малої маси обладнання. Але до сьогодні технічна потреба в такій магнітній техніці є незначною при обробці магнітно-металевих руд, оскільки немає очевид-

ної потреби в магнітній індукції вище 1,3 Тл у галузі переробки корисних копалин. Надпровідна високоградієнтна магнітна сепарація все ще переважно обмежена видаленням дуже дрібних магнітних оксидів заліза та титану з каоліну та очищенням стічних вод.

Тим не менш, цей поточний стан надпровідної високоградієнтної магнітної сепарації не зменшує її перспективної переваги над традиційними магнітними методами. З постійним виснаженням світових мінеральних ресурсів, видобуток дуже дрібних магнітних речовин з відкинутих хвостів та тонкорозподілених руд вимагає розробки магнітних методів, доступних з вищою магнітною індукцією.

2.2. Універсальність магнітного розділення корисних копалин та типи сепараторів

Магнітне розділення – універсальний метод, що використовується переважно в обробці корисних копалин, значно розвинулося за останні десятиліття. Як відмічалось вище, цей процес використовує відмінності в магнітних властивостях мінералів для досягнення розділення. Оскільки мінерали складаються з різних компонентів, деякі з них можуть бути більш або менш магнітними, ніж інші, що дозволяє їх розділяти під впливом магнітного поля. У [22] заглиблюються в прикладні тонкощі магнітного розділення в обробці корисних копалин. Але, перш ніж заглиблюватися в сам процес, важливо конкретизувати основи магнетизму.

Кожен мінерал має свою специфічну магнітну властивість, яка класифікується на три категорії:

Феромагнітні мінерали: Це природні потужні магніти. Прикладами є магнетит і піротит.

Парамагнітні мінерали: Слабомагнітні, ці мінерали потребують зовнішнього магнітного поля для розділення. Прикладами є ільменіт і гранат.

Діамагнітні мінерали: Вони відштовхують магнітні поля. Прикладами є кварц і польовий шпат.

Здатність мінералу намагнічуватися називається магнітною сприйнятливістю. Висока сприйнятливість означає сильніше притягання магнітних полів.

Процес магнітного розділення:

- *Етап підготовки.* Перед процесом розділення руду подрібнюють, щоб вивільнити мінерали. Цей етап гарантує, що сепаратори можуть впливати на окремі частинки, тим самим підвищуючи ефективність процесу розділення.

- *Подача сировини до сепаратора.* Подрібнена руда потім подається на конвеєрну стрічку, яка доставляє її до магнітного сепаратора. Консистенція та швидкість потоку сировини відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективності процесу магнітного розділення.

- *Етап розділення.* Коли мінеральні частинки проходять через магнітне поле, ті, що мають вищу магнітну сприйнятливість, притягуються до поверхні магніту. Немагнітні або менш магнітні частинки продовжують свій шлях і збираються окремо. Залежно від типу сепаратора, магнітні частинки можуть утримуватися на магніті або відхилятися в іншому напрямку.

- *Етап збору.* Після розділення магнітні та немагнітні мінерали збираються в різні бункери або жолоби. Потім їх можна обробити або підготувати до відправлення.

Класифікація сучасних магнітних сепараторів.

У переробці корисних копалин магнітна сепарація виділяється як окремий метод розділення мінералів. Якщо ми глибше заглибимося в типи магнітних сепараторів, стане зрозуміло, що вони не є універсальними пристроями. Конструкція та характеристики адаптовані до конкретних типів мінералів та їх магнітних властивостей.

Низькоінтенсивні магнітні сепаратори (LIMS)

Низькоінтенсивні магнітні сепаратори в основному використовуються для вилучення високомагнітних мінералів, головним чином магнетиту (рис. 2.1). Ці мінерали мають сильне магнітне тяжіння і тому не потребують високоінтенсивних магнітних полів для розділення.



Рис. 2.1. Магнітний сепаратор LIMS-типу

Сухі сепаратори: Вони працюють, коли сировина суха та вільно сипуча. Вони в основному використовуються для грубого розділення та в умовах низького вмісту вологи.

Мокрі сепаратори: І навпаки, мокрі сепаратори – ефективні, коли сировина має вищий вміст вологи або повинна перероблятися у вигляді суспензії. Мокрі системи LIMS, як правило, забезпечують чистіший концентрат завдяки видаленню захоплених немагнітних частинок.

Високоінтенсивні магнітні сепаратори (HIMS)

Ці сепаратори використовуються, коли мінерали, що підлягають розділенню, мають слабкі магнітні властивості. Генеруючи сильніше магнітне поле, ніж LIMS, вони можуть притягувати та розділяти мінерали, які в іншому випадку залишилися б непоміченими.

Основні характеристики:

Напруженість магнітного поля. Системи HIMS створюють значно сильніші магнітні поля, ніж системи LIMS, що робить їх придатними для вилучення мінералів зі слабкими магнітними властивостями.

Застосування: Загальні види застосування включають відділення гематиту від його немагнітних домішок кремнезему або вилучення рідкоземельних елементів.

- **Високоградієнтні магнітні сепаратори (HGMS)**

HGMS – це більш просунута версія HIMS, спеціально розроблена для захоплення дуже дрібних, слабомагнітних мінералів.

Функціональність. Унікальною рисою HGMS є використання магнітної матриці, часто у вигляді сталевих ват або сітки з розширеного металу. Ця матриця намагнічується під час роботи, створюючи області інтенсивних магнітних градієнтів, які здатні захоплювати дрібні магнітні частинки.

Посилений градієнт поля, створений матрицею, гарантує, що навіть мінерали з надзвичайно слабкими магнітними властивостями можуть бути ефективно розділені.

- **Фактори, що впливають на магнітне розділення**

Магнітне розділення, хоча й здається простим, залежить від різних факторів, які можуть вплинути на його ефективність. Розуміння цих факторів може оптимізувати роботу та забезпечити кращі результати.

- *Розмір частинок.* Розмір частинок відіграє вирішальну роль. Крихітні частинки схильні до хаотичного – броунівського – руху, який може зменшити їхню взаємодію з магнітними полями. Крім того, менші частинки мають зменшену площу поверхні, що піддається впливу магнітного поля, що робить розділення менш ефективним.

- *Магнітна сприйнятливість.* Ця властивість вказує на чутливість мінералу до магнітного поля. Мінерали з високою магнітною сприйнятливістю легше розділити, ніж ті, що мають низьку сприйнятливість.

- *Сила магніту.* Сила магніту в сепараторі визначає його здатність витягувати частинки. Хоча сильніші магніти можуть притягувати мінерали зі слабкими магнітними властивостями, вони також споживають більше енергії, що призводить до вищих експлуатаційних витрат.

- *Швидкість подачі.* Занадто швидка подача матеріалу в сепаратор може призвести до неефективності. Перевантаження може призвести до неповного розділення, оскільки частинки не мають достатньо часу для взаємодії з магнітним полем.

- *Вивільнення мінералів.* Для ефективного розділення мінерали, що цікавлять технолога, повинні бути достатньо вивільнені з навколишньої мінералізованої матриці. Якщо мінерали залишаються вбудованими у більшій немагнітній частинці, ефективність магнітного розділення знижується.

- **Застосування в переробці корисних копалин**

- *Збагачення залізної руди* є одним з найпоширеніших застосувань магнітного розділення. Магнетит, будучи за своєю суттю магнітним, може бути легко відокремлений від навколишніх домішок за допомогою LIMS.

- *Концентрування рідкоземельних елементів.* Рідкоземельні елементи, хоча й слабомагнітні, але є важливими для різноманітних технологій. Для вилучення та концентрування цих елементів часто використовуються *високоінтенсивні, високоградієнтні* магнітні сепаратори.

- *Обробка важких мінеральних пісків.* Цікавими є мінеральні піски, такі як чорні піщані пляжі, та мінерали, такі як ільменіт та гранат. Магнітна сепарація допомагає витягувати ці мінерали з їхніх менш магнітних або немагнітних аналогів.

Інструменти, що лежать в основі магнітної сепарації

В галузі магнітної сепарації основу процесу складають спеціальні інструменти, ретельно розроблені для різних завдань. Ці інструменти, створені завдяки передовій інженерії та глибокому розумінню принципів магнетизму, забезпечують ефективну та результативну роботу операцій з переробки корисних копалин. Тому приділимо більше уваги ознайомленню з цими важливими інструментами.

2.3. Спеціальні засоби, розроблені для різних завдань магнітної сепарації

В галузі магнітної сепарації руд основу процесу складають спеціальні засоби, ретельно розроблені для різних завдань.

Підвісні пластинчасті магніти конструктивно і функціонально є найпростішими засобами (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Підвісні пластинчасті магніти

Розміщені над конвеєрними стрічками, ці плоскі магніти ефективно витягують частинки заліза з потоку матеріалу. Їхнє статичне, підвішене положення забезпечує постійне магнітне покриття транспортованого матеріалу.

Поперечні стрічкові сепаратори

Також звані надстрічковими магнітами, вони розташовані перпендикулярно до конвеєрної стрічки. Вони витягують чорні рудоматеріали та видаляють їх з основного потоку конвеєра. Їхнє розташування дозволяє безперервне очищення, що робить їх особливо корисними в операціях з великою кількістю чорних забруднень.

Магнітні головки шківів

Це – шків, встановлений на голові конвеєра, намагнічений для вилучення чорних домішок з транспортованого матеріалу. Інтегрований в конвеєр, вони еко-

номлять місце, а також сприяють приводу конвеєрної стрічки, роблячи їх подвійно ефективними.

Магнітні пластинчасті сепаратори

Ці тонкі, плоскі магніти розміщуються в жолобах або під конвеєрними стрічками для вилучення чорних компонентів. Їхній тонкий профіль робить їх ідеальними для тісних просторів або коли потрібен низькопрофільний магнітний інструмент.

Магнітні конвеєри

Окрім звичайних конвеєрів, ці – оснащені магнітами для транспортування чорних матеріалів, навіть вертикально або догори дном. Вони забезпечують гнучкість у транспортуванні магнітних матеріалів, навіть складними маршрутами та напрямками (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Магнітний конвеєр

Барабанні сепаратори

Обертові барабаноподібні магніти витягують залізні частинки з потоку матеріалу та утримують їх до очищення. Їх обертання забезпечує безперервну самоочисну роботу, що ідеально підходить для процесів з великими обсягами.

Підйомні магніти

Призначені для підйому та переміщення великих залізних матеріалів, вони зазвичай використовуються на складах металобрухту та сталеливарних заводах. Вони забезпечують швидкий та ефективний спосіб обробки громіздких залізних матеріалів без необхідності фізичного переміщення.

Магнітні прибиральні машини

Як і мітла, але для залізних матеріалів, ці інструменти збирають залізне сміття з підлоги. Вони забезпечують чисте та безпечне середовище, особливо в таких місцях, як, збагачувальні фабрики, майстерні, де металеве сміття може становити небезпеку.

Інтегруючи сепарацію в процес транспортування, вони гарантують, що шлях від видобутку руди до переробленої руди буде коротшим, плавнішим та ефективнішим. Вони є лише окремими шестернями у величезній машині переробки корисних копалин, яка перетворює мінеральну сировину на корисні ресурси.

2.3.1. Спеціальні засоби магнітної сепарації фірми Fushun Ejet Magnetic Equipment Co.

Останнім часом для цілей, близьких до сепарації крупнокускових залізистих кварцитів, застосовуються засоби, розроблені та пропоновані на світових ринках гірничого обладнання широко відомою фірмою Fushun Ejet Magnetic Equipment Co [23].



Рис. 2.4. Постійний надстрічковий магніт (Джерело: [23])

Постійні надстрічкові магніти розроблені з безперервно рухомим стрічковим механізмом для уловлювання й автоматичного видалення чорних металів з транспортованого матеріалу.



Рис. 2.5. Блоковий магніт – надстрічковий магніт ручного очищення (Джерело: [23])

Магніт ручного очищення використовується на установках з низьким вмістом феромагнітних частинок, які необхідно видаляти вручну протягом певних періодів часу або просто, коли поверхня магніту заповнена.



Рис. 2.6. Магнітний сепаратор ручного очищення з охолодженням олії (Джерело: [23])

Електромагніт з охолодженням олії має потужну магнітну силу та розроблений як пило- та водонепроникним. Він більше підходить для гірничодобувного застосування, чим для збагачення руд.



Рис. 2.7. Електромагніт з повітряним охолодженням (Джерело: [23])

Електромагнітні надстрічкові сепаратори використовуються для відділення чорних домішок від будь-якого виду сипучих матеріалів, для вилучення магнітних частинок зі шлаку, промислових відходів, ливарного піску тощо.



Рис, 2.8. CTS Мокрий барабанний магнітний сепаратор (Джерело: [23])

Мокрий барабанний магнітний сепаратор – це широко використовуваний магнітний пристрій для збагачення залізної руди. Багато залізрудних заводів встановлюють партію WLIMS для концентрування низькосортної залізної руди.



Рис. 2.9. Постійний барабанний магніт (Джерело: [23])

Магнітні частинки притягуються барабанним магнітом, тоді як немагнітні – слідує за своєю траєкторією польоту, визначеною інерцією та гравітацією. Притягнутий матеріал транспортується барабанною оболонкою до кінця магнітного поля та скидається на інший бік регульованого роздільника.



Рис. 2.10. Електробарабанний магніт (Джерело: [23])

Електробарабанний магніт має стаціонарні електромагнітні котушки, розташовані всередині немагнітної, зазвичай марганцевої сталеві оболонки. Оболонка обертається навколо стаціонарної електромагнітної котушки зі швидкістю, що визначається об'ємом оброблюваного матеріалу.



Рис. 2.11. Високоградієнтні магнітні сепаратори з нержавіючої сталі (Джерело: [23])

Характеристики високої напруженості магнітного поля, низького енергоспоживання та широкої практичності. Використовується для відбору слабомагнітних мінералів, видалення заліза з неметалевих матеріалів, покращення чистоти сировини.



Рис. 2.12. Обертовий решітчастий магніт (Джерело: [23])

Обертовий решітчастий магніт широко використовується в хімічній, вогнетривкій галузі й інших, призначений для видалення заліза з порошкоподібних або зернистих матеріалів, особливо для матеріалів з високою в'язкістю або поганою плинністю, які схильні до злежування або утворення містків.



Рис. 2.13. Магнітний рідинний пристрій (Джерело: [23])

Він використовується в рідких матеріалах з різною в'язкістю, як рідких, так і напіврідких, для видалення домішок заліза та інших феромагнітних частинок, щоб підтримувати чистоту матеріалів.



Рис. 2.14. Решітчастий магніт (Джерело: [23])

Універсальний, потужний магніт, розроблений спеціально для бункерів нестандартної форми, круглих, овальних або заокруглених кутів. Забезпечує захист від забруднення металом.



Рис. 2.15. Висувний магніт (Джерело: [23])

Забезпечує захист обладнання та продукту від середніх та дрібних залізних забруднень у сухих, вільно плинних продуктах під дією сили тяжіння. Кілька розташованих у шаховому порядку рядів забезпечують максимальну площу контакту для потоку продукту.



Рис. 2.16. Магнітна планка (Джерело: [23])

Магнітні планки видаляють з потоків продукції дуже дрібні металеві частинки та навіть слабомагнітні частинки, такі як оброблена нержавіюча сталь та оксиди заліза.

2.3.2. Функціонально спеціалізовані засоби магнітної сепарації

Для додаткових технічних завдань пропонуються також більш спеціалізовані пристрої та обладнання [24], серед якого варто виділити наступне.

Eddy current separator – вихрострумний сепаратор

Ексцентричний полюсний вихрострумний сепаратор

Концентричний полюсний вихрострумний сепаратор

Мобільний вихрострумний сепаратор

Вихрострумний сепаратор типу SG

Вихрострумний сепаратор для лабораторії

Магнітний шків

Барабанний магніт

Постійний підвісний магніт

Електромагнітний надсмуговий сепаратор

Мокрий барабанний сепаратор

Бункерний магніт

Сенсорний сортувальник

Електромагнітний сепаратор високої інтенсивності

Індукційна система сортування



Рис. 2.17. Постійний надстрічковий магніт (Джерело: [24])

Успішний приклад використання підвісного постійного магнітного сепаратора EJET MAGNET® спостерігається у промисловості з переробки металобрухту на місці замовника, але є й вдалі проби на крупнокусковій сепарації руд..

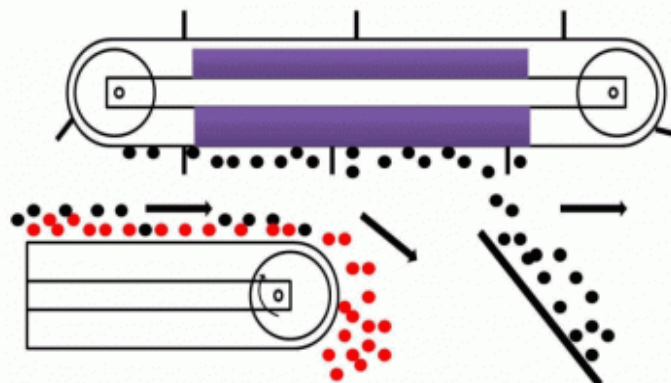


Рис. 2.18. Підвісний постійний магнітний сепаратор (Джерело: [24])

Потужний магнітний блок, що міститься в цій системі, встановлений у міцній сталевій рамі. Магніт переміщується за допомогою міцного вулканізованого ремня з зубцями, що обертається на двох шківах і приводиться в рух електричним або гідравлічним двигуном. Вся система розроблена для довговічності та здатна працювати в найсуворіших умовах.

Системи, крім розборки руд, використовуються для вилучення магнітних частинок зі шлаку, промислових відходів тощо, а також для захисту дробарок, стрічкових конвеєрів, які згодом обробляють матеріал. Залишки чорних металів, витягнуті з конвеєра, видаляються міцним гумовим ремнем у контейнер або збірний контейнер збоку конвеєра. Стандартна версія магнітного сепаратора Overband оснащена потужними постійними феритовими магнітами. Однак, якщо потрібна сильніша магнітна сила, рекомендується обладнати магнітний сепаратор Overband магнітами NdFeB. Пропонується два типи магнітних сепараторів Overband (постійні та електронні) для роботи з різними типами застосувань.

Переваги:

- Міцна конструкція для найскладніших умов
- Можливість індивідуального проектування для будь-якого застосування
- Захист працівників та обладнання. Безпека виробництва
- Компактна конструкція мінімізує експлуатаційні витрати
- Автоматичне очищення підвищує ефективність роботи

Рекомендоване обладнання:



Рис. 2.19. Експериментальний магнітний конвеєр (Джерело: [24])



Рис. 2.20. Пластинчастий затворний магніт (Джерело: [24])



Рис. 2.21. Електромагнітний сепаратор з масляним охолодженням (Джерело: [24])



Рис. 2.22. Легкий магнітний сепаратор з поперечною стрічкою (Джерело: [24])



Рис. 2.23. Закритий барабанний магнітний сепаратор (Джерело: [24])



Рис. 2.24. Високоміцний дисковий електромагнітний сепаратор (Джерело: [24])



Рис. 2.25. Потужний магнітний сепаратор з поперечною стрічкою (Джерело: [24])



Рис. 2.26. Магніт для фраг-барабана (Джерело: [24])



Рис. 2.27. Вентиляторний електромагнітний сепаратор (Джерело: [24])



Рис. 2.28. Електромагнітний кран (Джерело: [24])



Рис. 2.29. Електромагнітний підйомник (Джерело: [24])



Рис. 2.30. Сепаратор вихрових струмів (Джерело: [24])



Рис. 2.31. Вихрострумовий порційний сепаратор (Джерело: [24])



Рис. 2.32. Двопрохідний сепаратор вихрових струмів (Джерело: [24])



Рис. 2.33. Сухий барабанный магнітний сепаратор (Джерело: [24])



Рис. 2.34. Лотковий магнітний барабанный сепаратор (Джерело: [24])



Рис. 2.35. Магнітні решітки (Джерело: [24])



Рис. 2.36. Лінійний вібраційний екран для зневоднення (Джерело: [24])



Рис. 2.37. Електромагнітний сепаратор повітряного охолодження (Джерело: [24])

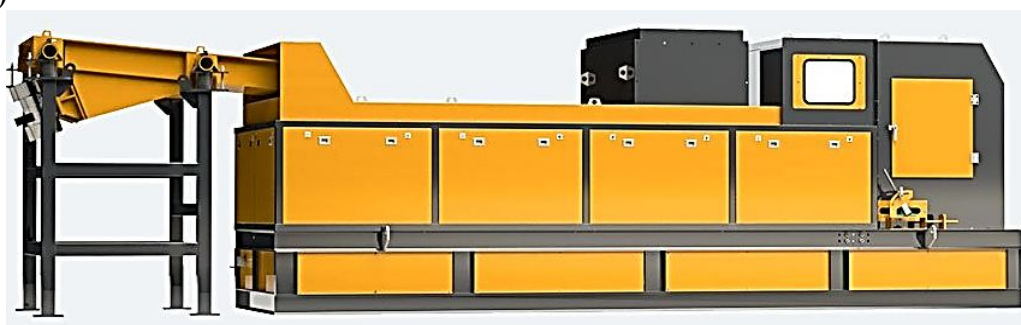


Рис. 2.38. Рентгенівський сортувальник (Джерело: [24])



Рис. 2.39. Грохот Троммеля (Джерело: [24])



Рис. 2.40. Магнітний шків (Джерело: [24])

Запобігає потраплянню шкідливих та небезпечних залізних частинок у потік матеріалу. Важливо, що його можна інтегрувати в існуючу конвеєрну стрічку як компонент машини.



Рис. 2.41. Магнітна сепараторна стрічка (Джерело: [24])

Використовуючи магнітний шків разом із конвеєрною стрічкою, допомагають транспортувати чорні відходи назад з кінця конвеєра.



Рис. 2.42. Високоінтенсивний розділювальний конвеєр HISC (Джерело: [24])

Надзвичайно широкий спектр обладнання та послуг з його монтажу й обслуговування пропонує також MAGNIS-LTD (Україна) [25].

Все ширше зараз використовують супермагніти для покращення чистоти матеріалів. Ефективним воно є також для розділення слабомагнітних шматків руд чорних металів, включаючи залістисті кварцити родовищ Кривбасу.

Висновки за розділом 2

Як видно з матеріалу даного розділу, до послуг гірничодобувних компаній наразі існують практично необмежені пропозиції та перелік різнотипного обладнання, цілком придатного для високоякісного розділення дробленої вибухом та дробарками руди шляхом магнітної сепарації, для чого пропонуються:

- електромагнітні сепаратори з високоінтенсивним магнітним полем для: мокрого та сухого збагачення слабомагнітних залізних, марганцевих, хромітових, ільменітових, гранатових, рідкісноземельних та інших подібних руд і матеріалів; мокрого та сухого очищення кварцових, польовошпатних та цирконових гірничих мас;

- електромагнітні сепаратори з високоградієнтним магнітним полем для: очищення потенційної побіжної сировини залізорудних кар'єрів: порцелянової маси, каоліну й інших подібних матеріалів від слабомагнітних домішок, оксидів заліза та титану;

- високоінтенсивні барабанні сепаратори на постійних магнітах для сухого розділення магнетитових руд;

- комплекси для механізованого магнітного рудорозбирання та збагачення великокускової магнетитової руди;

- аналізатори магнітні для дослідження магнетитових руд;

- апарати, що розмагнічують сировину й інші.

ТОВ "Науково-технічний центр магнітної сепарації МАГНІС ЛТД", зокрема, розробило та пропонує споживачам єдиний типорозмірний ряд сепараторів для сухого магнітного передзбагачення крупнодроблених мартит-гематитових та інших слабомагнітних руд.

"НТЦ МАГНІС ЛТД" розробив комплекси обладнання, які є виробами одиничного виробництва, що виготовляються на індивідуальні замовлення підприємств з урахуванням завдань, що вирішуються для даного підприємства, й особливостей перероблюваної залізорудної сировини.

Принцип роботи "НТЦ МАГНІС ЛТД" як науково-технічного підприємства полягає у відмові від поставок сепараторів як стандартних виробів для слабомагнітних руд. Як правило, перед постачанням сепараторів проводяться тестування проб руди потенційних споживачів сепараторів. Тестування виконуються на стендах "НТЦ МАГНІС ЛТД", і за їх результатами здійснюється оптимізація окремих параметрів сепараторів, а також відпрацьовуються спеціальні технології для найефективнішої переробки руди у потенційного споживача.

Наразі продаються: барабани сепараторні й інші, устаткування для гірничодобувних підприємств, вироби для гірничорудної промисловості, устаткування для гірничо-збагачувальних комбінатів, устаткування для збагачувальних фабрик, аналізатори магнітні, у тому числі для слабомагнітних руд тощо.

Виконуються послуги: дослідження та розробки, оренда енергетичного обладнання, розробка технологій збагачення руд, розробка технологій окускування руд та відходів, проектування збагачувальних підприємств, розробка обладнання для переробки брукху та відходів, проектування збагачувальних фабрик, ремонт гірничо-збагачувального обладнання, інженерно-технічні розробки в геології, технологіях й ін.

Розділ 3

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУДНИХ МАС

3.1. Оглядовий аспект аналітики магнітної сепарації

Ефективність магнітного поділу залежить від силового режиму сепарації (векторна діаграма розділяючих сил), а за оптимальних умов масопереносу – від рівня тягових пондеромоторних магнітних сил (формула Максвелла), відповідальних за притягування, вилучення або утримування магнітних мінералів. Теоретично й експериментально встановлено, що в процесах сепарації використовуються в основному дві з відомих магнітних сил: потокозчеплення (близька дія або адгезійна) та градієнтна (пондеромоторна сила далекої дії). Перша викликає флокуляцію магнітних частинок (утворення агрегатів – флокул за рахунок енергії вільних полюсів), а друга – їхню сепарацію від немагнітних [26].

3.2. Математичне моделювання процесу магнітної сепарації

Перша з розглянутих вище сил – $F_{n.c} = B^2 S / 2\mu_0$ – не є селективною, існує навіть у слабких полях, але тільки при контакті між магнітними частинками, причому міцно утримує механічно захоплені немагнітні частинки.

Друга сила – $F_{gr.} = G\chi HgradH$ – селективна, діє на досить великій відстані від осадової поверхні (~ до 100 мм), але вимагає більш високих значень напруженості магнітного поля H та її градієнта, а також питомої магнітної сприйнятливості χ . Тут: B – магнітна індукція, S – площа контакту частинок, G – маса частинки, μ_0 – магнітна постійна.

У серійних сепараторах типу ПБМ сила потокозчеплення та міцність грудок – дуже великі, а пондеромоторна сила притягує до барабана тільки готові грудки на відстані не більше 80 мм. Вільні кварцові зерна залишаються в пульпі.

Пондеромоторна сила поля другого типу використовується у всіх процесах сепарації та залежить від величини $HgradH$, який зростає від одного – $[H = f(x)]$ – 300 е²/см, двох – $[H = f(x,y)]$ – 5·10⁶ е²/см до тривимірної неоднорідності $H = f(x,y,r)$, де $HgradH$ досягає 2·10¹¹ е²/см. Остання є характерною для високоградієнтних полів, які застосовуються в електромагнітних високоградієнтних сепараторах із сильним полем.

Механічна робота з масопереносу частинок в усіх процесах магнітної сепарації завжди супроводжується деяким зниженням загальної магнітної енергії складної системи «полюса-частки». Загалом вона дорівнює:

$$E_M = 0,5 \int_V BH dV \approx const \quad (3.1)$$

але при сепарації і магнітній флокуляції частинок її зміна відбувається за рахунок однієї її складової – енергії магнітних полюсів або магнітостатичної енергії ΔE_m в аналізованому обсязі робочого простору V :

$$E_m = 0,5J^2N \cdot V, \quad (3.2)$$

де H , V - відповідно напруженість поля й індукція в елементах системи «полюси-частинки», що заповнюють робочий простір; J , N - відповідно намагніченість та коефіцієнт розмагнічування зазначених елементів робочого простору.

Оцінити роботу, що здійснюється під час магнітної сепарації за рахунок зниження енергії вільних полюсів внаслідок флокуляції частинок та тяжіння їх до полюсів, можна наступним чином:

$$\sum_{i=1}^n E_{M_i}^p + \sum_{j=1}^m E_{M_j}^q - E_M = \Delta E_M \quad (3.3)$$

де

$$\sum_{i=1}^n E_{M_i}^p, \quad \sum_{j=1}^m E_{M_j}^q$$

є сумарною магнітостатичною енергією, відповідно, магнітних полюсів сепаратора і частинок магнітної фракції; ΔE_M - наведена магнітостатична енергія полюсів із шаром магнітних частинок.

Практично у всіх процесах робота магнітної сепарації (або флокуляції) A визначається величиною зменшення магнітостатичної енергії ΔE_M . Так як процес магнітної сепарації носить безперервно-циклічний характер, то робота сепарації здійснюється магнітною системою сепаратора в процесі тяжіння частинок магнітних мінералів до полюсів, а потім повертається магнітній системі при відриві цих частинок у зоні розвантаження магнітної фракції за рахунок роботи приводу робочого органу сепаратора (барабана або ролика та ін.), що здійснює відрив. Цим можна пояснити такий тривалий термін служби магнітної системи барабанних сепараторів з постійними магнітами (до 2-3 років) без додаткового підмагнічування.

Якщо $\Delta E_M = A$, то середня магнітна сила, що діє в робочому просторі до полюса (по осі $N - S$),

$$F_M = -\partial E_M / \partial x \approx -\Delta E_M / \partial x; \quad F_M \approx 0,5J^2NS, \quad (3.4)$$

де S - площа полюсної поверхні, ортогональні силовим лініям.

Враховуючи, що остання залежить від «мікрорадіусу» елементів полюсної поверхні, можна з деякими додатковими застереженнями (для випадку $N \approx \text{const}$; $J/V = \text{const}$) знайти залежність рівня цієї сили від радіусу кривизни полюсів. У найпростішому випадку, коли полюси представлені феромагнітними кулями (наприклад, поліградієнтна сепарація), які упаковані з координаційним числом, що дорівнює шести,

$$S = V4\pi r^2 / (2r)^3 = \pi V / 2r; \quad F_M = J^2NV / 16r \approx C_c / r, \quad (3.5)$$

де r - радіус кулі; $V / (2r)^3$ - число куль в об'ємі V ; C_c - постійна магнітної сили, яка залежить від розмірів та магнітних властивостей матеріалів полюсів та частинок.

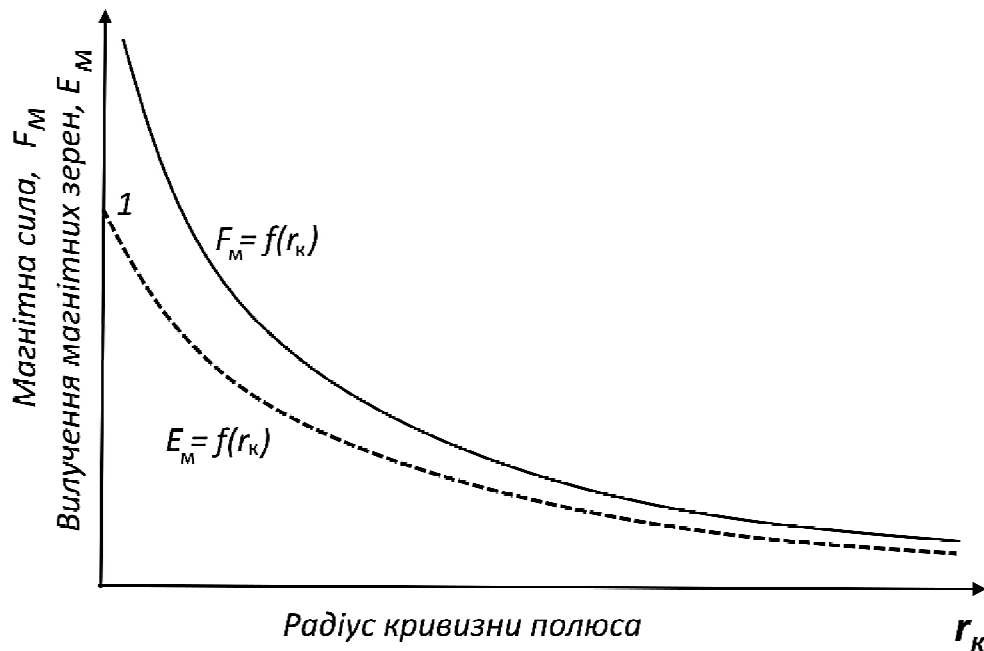


Рис. 3.1. Залежність магнітної сили та вилучення від радіусу куль

Математична модель процесу сепарації в магнітному гідроциклоні, що враховує, крім сил тяжіння, Архімеда, магнітних, відцентрових і гідромеханічних, також сили реакції меж – виштовхування частинок із суспензії, обтяженої магнітними та гравітаційними полями, для одновимірного випадку (по вертикальній осі гідроциклону)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial C}{\partial z^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial C}{\partial z} \left\{ \left[g(\rho - \rho_{cp}) + k_m(\chi - \chi_{cp}) - \right. \right. \\ \left. \left. - k_c v_{cp}(z) - T \left[g(\rho - \rho_{cp}) + k_m(\chi - \chi_{cp}) \right] \right] \right\}, \quad (3.6)$$

де C - концентрація магнітної фракції; D - коефіцієнт дифузії; k_m - коефіцієнт магнітної сили, що залежить від картини магнітного поля надпровідної магнітної системи; α , k_c - коефіцієнти сили опору середовища (з урахуванням частинок і без них); T - коефіцієнт, що враховує вміст твердого магнітної фракції; ρ_{cp} , χ_{cp} - відповідно щільність і магнітна сприйнятливості суспензії.

Експерименти з оптимізації процесу планувалися за методом Бокса-Вілсона показали наступне.

Рівняння регресії, отримане на першому етапі експериментів, допомогло оцінити ступінь впливу основних параметрів цього процесу:

$$\varepsilon = 35,6 - 2,9(D_{п} - 10)/3 + 7,9(T - 10)/5 + 6,8(I - 1,5), \quad (3.7)$$

де $D_{п}$ - діаметр пісового отвору, мм; T - вміст твердого в живленні, %; I - струм магнітної системи, А.

Ця модель дозволила розробити вихідні дані для проектування дослідно-промислового надпровідного магнітного гідроциклону безперервної дії (табл. 3.1).

Технічна характеристика гідроциклона

Продуктивність, т/год.	до 5
Діаметр, мм: гідроциклона	100
вхідного патрубка	25
шламового патрубка	50
піскової насадки	16
Кут конусності, градус	45
Тиск на вході, кПа	350
Максимальна напруженість поля. мА/м	12

Випробування проводилися на стенді із замкнутим циклом (злив пісків поєднувалися в зумпфі насоса). **Сепарація окислених залізистих кварцитів вимагала повного видалення магнетиту вихідного продукту.** Марганцеві шлами Богданівської та Грушівської ОФ, що містять близько 20 % Mn, сепарувалися спокійно, без забивань і при цьому в один прийом зливи вийшли досить бідними (менше 10 % Mn), а піски містили 27-30 % Mn, тобто, були концентратами 3-го сорту.

3.3. Особливості розрахунку параметрів високоградієнтної магнітної сепарації слабомагнітних руд

В сухих умовах для концентрування магнітних частинок з грубих матеріалів може бути використаний високоінтенсивний барабанний магнітний сепаратор. Тому розглянемо окремо особливості розрахунку параметрів пульсуючого високоградієнтного магнітного сепаратора,

Високоградієнтне магнітне розділення досягло значного прогресу та широкого застосування з тих пір, як Джонс у 1955 році досяг високоградієнтного магнітного поля в намагніченій матриці [17]. Використовуючи магнітну матрицю, магнітна сила на магнітні частинки значно збільшується, що призводить до значного покращення вилучення дрібних слабомагнітних частинок.

Однак, він пройшов довгий період у розвитку високоградієнтних магнітних сепараторів, від циклічної до безперервної роботи, та від горизонтальної філософії проектування розділового кільця до вертикальної. Водночас магнітна матриця, як носій для захоплення магнітних частинок у високоградієнтному магнітному сепараторі, еволюціонувала від ранніх волокон та кульок до сіток та сучасних стрижневих полюсів. Зараз стрижнева матриця, виготовлена зі стрижневих полюсів, виявилася найбільш застосовним середовищем для магнітного захоплення слабомагнітних частинок у високоградієнтному магнітному сепараторі завдяки високій експлуатаційній надійності, спрощеній комбінаторній оптимізації та стійкості до засмічення [21].

У традиційних високоградієнтних магнітних сепараціях слабомагнітних руд найбільшими проблемами є механічне захоплення немагнітних частинок та засмічення магнітної матриці. Захоплення немагнітних частинок погіршує селективність розділення, а засмічення ускладнює обслуговування сепараторів. З

1986 року для вирішення вищезазначених проблем було запропоновано та розроблено пульсуючу високоградієнтну магнітну сепарацію, яка зараз широко застосовується для концентрування дрібних слабомагнітних мінералів, таких як гематит, лімоніт, сидерит тощо [27], та для очищення неметалевих руд, таких як кварц, польовий шпат та каолін.

Принцип пульсуючої високоградієнтної магнітної сепарації можна пояснити за допомогою циклічного пілотного пульсуючого високоградієнтного магнітного сепаратора, схематично показаного на рис. 3.2 [21]. Цей пілотний сепаратор періодично подається, а стрижні з магнітної нержавіючої сталі використовуються як розділювальна матриця.

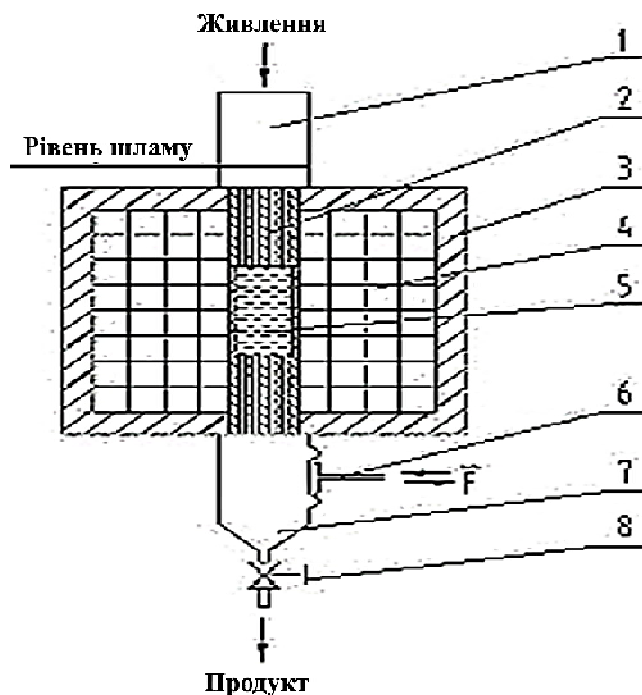


Рис. 3.2. Циклічний пульсуючий високоградієнтний магнітний сепаратор пілотного масштабу: 1 - подавальний отвір, 2 - магнітний полюс, 3 - магнітне ярмо, 4 - котушки живлення, 5 - магнітна матриця, 6 - пульсуючий механізм, 7 - контейнер для продукту, 8 - клапан

Під час роботи сепаратора пілотного масштабу через котушки живлення протікає постійний струм, і в зоні розділення створюється магнітне поле. Спочатку зона розділення заповнюється проточною водою, щоб пульсуюча енергія могла передаватися в зону розділення, в якій рівень води та її швидкість потоку регулюються за допомогою клапана під пульсуючим механізмом. Потім пульпа подається в матрицю в зоні розділення через контейнер для подачі. Магнітні частинки притягуються з пульпи на поверхню матриці, тоді як немагнітні частинки проходять через матрицю та виходять через контейнер для продукту у вигляді хвостів під спільною дією пульсації пульпи, сили тяжіння та гідродинамічного опору. Пульсуючий механізм переміщує суспензію в зоні розділення вгору та вниз, утримуючи частинки в матриці в пухкому стані, завдяки чому магнітні частинки можуть бути легше захоплені матрицею, а немагнітні можуть бути легше витягнуті з матриці. Цей магнітний сепаратор досягає кращої про-

дуктивності порівняно з традиційними сепараторами завдяки інноваційному впровадженню пульсації суспензії в процес розділення та використанню стрижневої матриці.

Найважливішою особливістю пульсуючого високоградієнтного магнітного сепаратора, що відрізняється від інших високоградієнтних магнітних сепараторів, є суспензія в матриці, яка піддається пульсації для утворення пухких частинок, що досягається пульсуючим механізмом під нижнім магнітним ярмом, як показано на рис. 3.2.

Пульсація суспензії визначає поведінку суспензії та частинок у зоні розділення. Поки зона розділення заповнена суспензією і пульсуючий механізм працює, пульсуюча енергія передається в зону розділення та переміщує суспензію вгору та вниз.

Пульсуюча швидкість $\tilde{v}$, максимальна пульсуюча швидкість $\tilde{v}_{\max}$ та середня пульсуюча швидкість $\bar{v}$ суспензії відповідно записуються як [27]:

$$\tilde{v} = 0,5S\omega\sin(\omega t);$$

$$\tilde{v}_{\max} = 0,5S\omega;$$

$$\bar{v} = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} 0,5S\omega\sin(\omega t) d(\omega t) = S\omega/\pi,$$

де S – пульсуючий хід, ω – кутова швидкість пульсації, а t – часова змінна відповідно.

Як показано на рис. 3.3, фактична швидкість пульпи в зоні розділення дорівнює сумі швидкості подачі та пульсуючої швидкості:

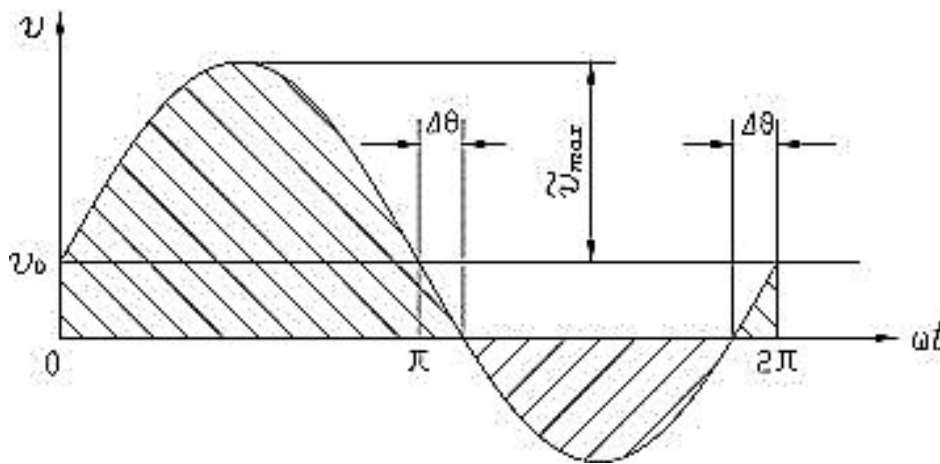


Рис. 3.3. Крива швидкості пульпи в циклі пульсуючої високоградієнтної магнітної сепарації

$$v = v_0 + \tilde{v} = v_0 + 0,5S\omega\sin(\omega t) = v_0 + \tilde{v}_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

З останнього рівняння, коли $\tilde{v}_{\max} > v_0$, швидкість суспензії періодично змінюється на протилежну, і суспензія рухається вгору та вниз. Як показано на рис. 3.3, затінена область під горизонтальною віссю вказує на те, що суспензія

рухається вгору, тоді як область над віссю вказує на те, що суспензія рухається вниз; у такому випадку пульсуюча суспензія створює релаксуючий ефект на частинки в матриці, а механічні захоплення через ефект містка зменшуються або руйнуються. Але, якщо $\tilde{v}_{\max} \leq v_0$, суспензія тече вниз, і немагнітні частинки можуть бути захоплені в матриці, а матриця може бути механічно засмічена, що призводить до погіршення ефективності розділення. Зрозуміло, що надзвичайно важливо, щоб $\tilde{v}_{\max} > v_0$ було дотримано при пульсуючому високоградієнтному магнітному розділенні.

Пульсація суспензії збільшує шари або відстань матриці, через які проходять частинки, тим самим покращуючи ефективність зіткнень між матрицею та частинками і, отже, відновлення магнітних частинок. З рис. 3.4 видно, що коли $\tilde{v}_{\max} \leq v_0$, або пульсуюча швидкість дуже мала, суспензія тече вниз без зворотного руху вгору, а частинки проходять n шарів матриці на відстані, що дорівнює глибині матриці L_0 , тобто:

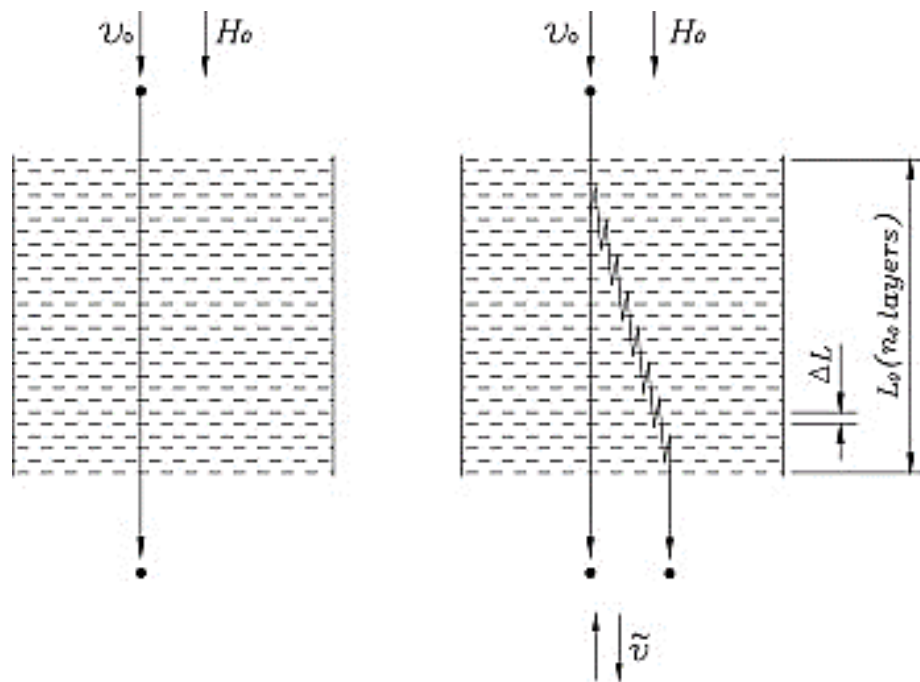


Рис. 3.4. Траєкторії частинки, що проходить через глибину матриці в непульсуючих (ліворуч) та пульсуючих (праворуч) умовах.

$$n = n_0 = L_0 \Delta L, \quad (3.9)$$

де n – кількість шарів частинок, що проходять через матрицю, n_0 – кількість шарів матриці, а ΔL – відстань між двома сусідніми шарами в матриці.

Зі збільшенням пульсуючої швидкості та досягненням $\tilde{v}_{\max} > v_0$ напрям швидкості суспензії періодично змінюється на протилежний, і суспензія рухається вгору та вниз. У такому випадку фактичні шари та відстань частинок, що проходять через матрицю, збільшуються, як показано на рис. 3.5, де для наочності частинка штучно відхиляється від шляху проходження через матрицю.

Фактична відстань частинок через матрицю в пульсуючому циклі в зоні розділення, як показано на рис. 3.5, розраховується як:

$$L_T = \int_0^T |v_0 + \tilde{v}_{\max}(\omega t)| dt, \quad (3.10)$$

де L_T – фактична відстань частинок, що проходять через матрицю в пульсуючому циклі T . Коли $\tilde{v}_{\max} \leq v_0$, частинки проходять через глибину матриці без повернення вгору, а фактична відстань дорівнює L_0 . Однак, за умови $\tilde{v}_{\max} > v_0$, суспензія рухається вгору та вниз, і фактична відстань інтегрується з рівняння (3.10):

$$L_T = (2/\pi) \int_0^{2\pi} \left| \arcsin v_0/\tilde{v}_{\max} + \sqrt{\left(\frac{\tilde{v}_{\max}}{\tilde{v}_0}\right)^2 - 1} \right| dt. \quad (3.11)$$

З рівняння (3.11), фактична відстань частинок, що проходять через матрицю, може бути значно збільшена до високого рівня, якщо досягається лише $\tilde{v}_{\max} > v_0$.

А коли $\tilde{v}_{\max} \leq v_0$, частинки проходять через n_0 шарів матриці. Однак, коли досягається $\tilde{v}_{\max} > v_0$, фактична кількість шарів частинок через матрицю розраховується шляхом ділення L_T на ΔL :

$$n = (2/\pi) n_0 \left| \arcsin v_0/\tilde{v}_{\max} + \sqrt{\left(\frac{\tilde{v}_{\max}}{\tilde{v}_0}\right)^2 - 1} \right|. \quad (3.12)$$

Можна побачити, що фактична кількість шарів збільшується зі збільшенням максимальної пульсуючої швидкості. Наприклад, коли максимальна пульсуюча швидкість $\tilde{v}_{\max}$ – в 10 разів більша за v_0 , фактична кількість шарів збільшується в 7 разів порівняно з n_0 , що значно збільшує ймовірність захоплення магнітних частинок матрицею з суспензії.

Пульсація суспензії значно покращує продуктивність розділення пульсуючого високоградієнтного магнітного сепаратора, а вплив пульсації суспензії на якість магнітного концентрату наведено Обертойфером (1974):

$$G_m = G_{\max} / (1 + A_{nm} K (F_i / F_c)) \quad (3.13)$$

Вплив пульсації суспензії на вилучення магнітних частинок виражається як [27]:

$$R = R_{\max} \cdot [1 - (1-p)^n], \quad (3.14)$$

де G_m – марка магнітного концентрату, $G_{\max}$ – максимальна марка магнітного концентрату, A_{nm} – масове співвідношення немагнітних частинок до магнітних частинок у сировині, K – константа, F_i – сила взаємодії між магнітними та немагнітними частинками, F_c – конкуруючі сили, що діють на частинки, R – вилучення магнітних частинок, $R_{\max}$ – максимальне вилучення магнітних частинок, а p – ймовірність захоплення частинки, що проходить через один шар матриці.

З рівняння (3.13) видно, що ступінь концентрату збільшується зі збільшенням конкуруючих сил. Оскільки пульсація суспензії створює додаткову конку-

руючу силу на частинки в пульсуючому високоградієнтному магнітному розділенні, що покращує ступінь концентрату; крім того, покращений ступінь концентрату також має вигоду від пухкого стану частинок у розділювальній матриці в результаті пульсації суспензії. Як видно з рівняння (3.14), відновлення збільшується зі збільшенням фактичних шарів часток, що проходять через матрицю.

Пульсація суспензії створює іншу модель захоплення матриці для магнітних частинок, ніж така без пульсації [27], як показано на рис. 3.5.

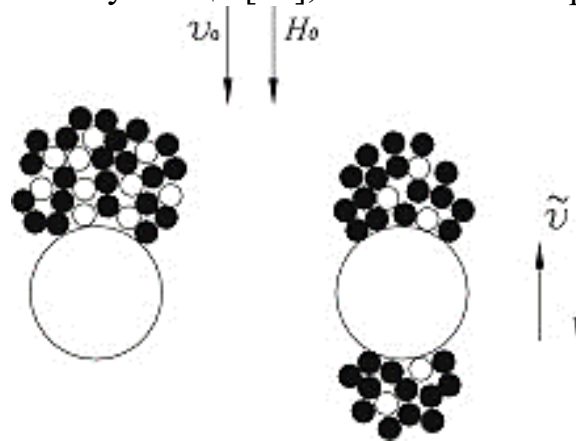


Рис. 3.5. Захоплення магнітних частинок на матрицю в неппульсуючих (ліворуч) та пульсуючих (праворуч) умовах

В неппульсуючих умовах суспензія тече вниз, і матриця переважно захоплює магнітні частинки на верхній поверхні магнітних елементів матриці. Але в умовах пульсації пульпа рухається вгору та вниз у матриці, і матриця захоплює магнітні частинки як на верхній, так і на нижній поверхнях магнітних елементів у матриці. З цієї точки зору, пульсація пульпи збільшує площу захоплення матриці для магнітних частинок і, таким чином, покращує пропускну здатність твердих речовин пульсуючого високоградієнтного магнітного сепаратора.

3.4. Аналіз фізико-хімічної поведінки та можливостей відновлення критичних сировинних матеріалів з гідрометалургійної переробки магнітів

Процес і можливості відновлення вибраних критичних сировинних матеріалів з гідрометалургійного процесу переробки магнітів розглянуто в роботі [29].

Насамперед варто враховувати, наскільки масштабним і потужним є ринок магнітних виробів та їх застосування в різних галузях, пам'ятаючи, що потужні магніти виготовляються на основі рідкоземельних елементів (рисунки 3.6, 3.7).

На рисунку 3.6 показано річні обсяги виробництва оксидів рідкоземельних елементів (SEO), розділені за областю застосування. Порівнюючи дві діаграми, можна побачити, що найдорожчі SEO, такі як європей та тербій, все частіше використовуються у люмінофорах.

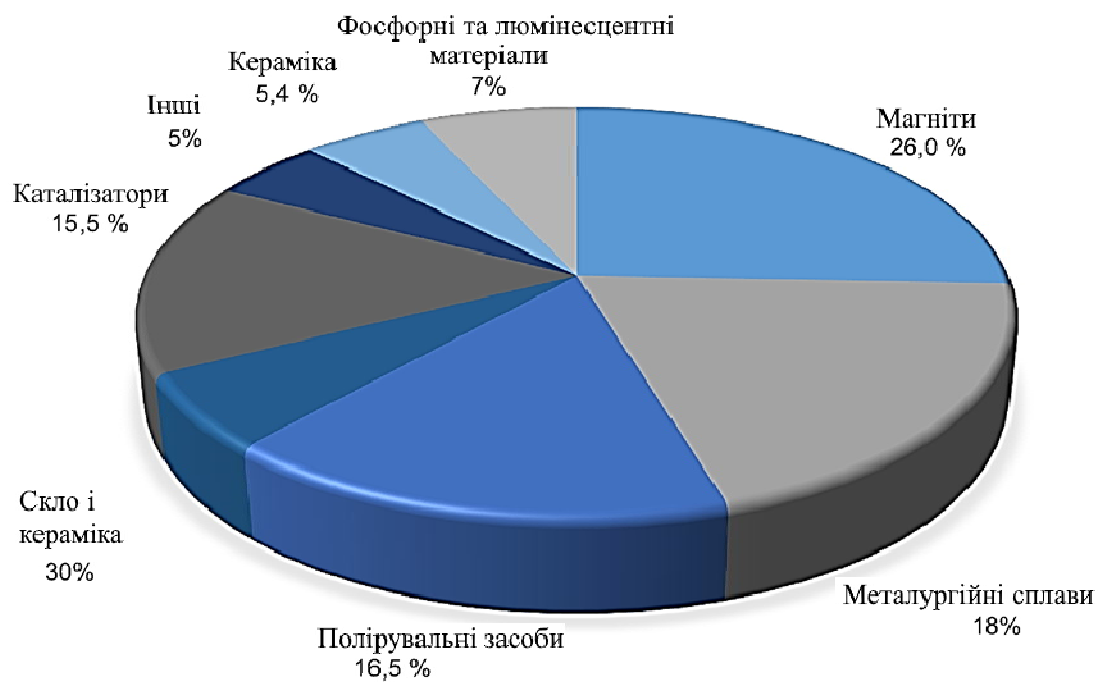


Рис. 3.6. Глобальний галузевий розподіл річних обсягів виробництва рідкоземельних елементів SEO [30]

Таблиця 3.2

Поточні ціни на чистий SEM у \$/кг [48]

Nd	Pr	Dy	Tb	Sa	Eu	Ce	La	Y
83	150	470	830	25	1000	10	9,5	60

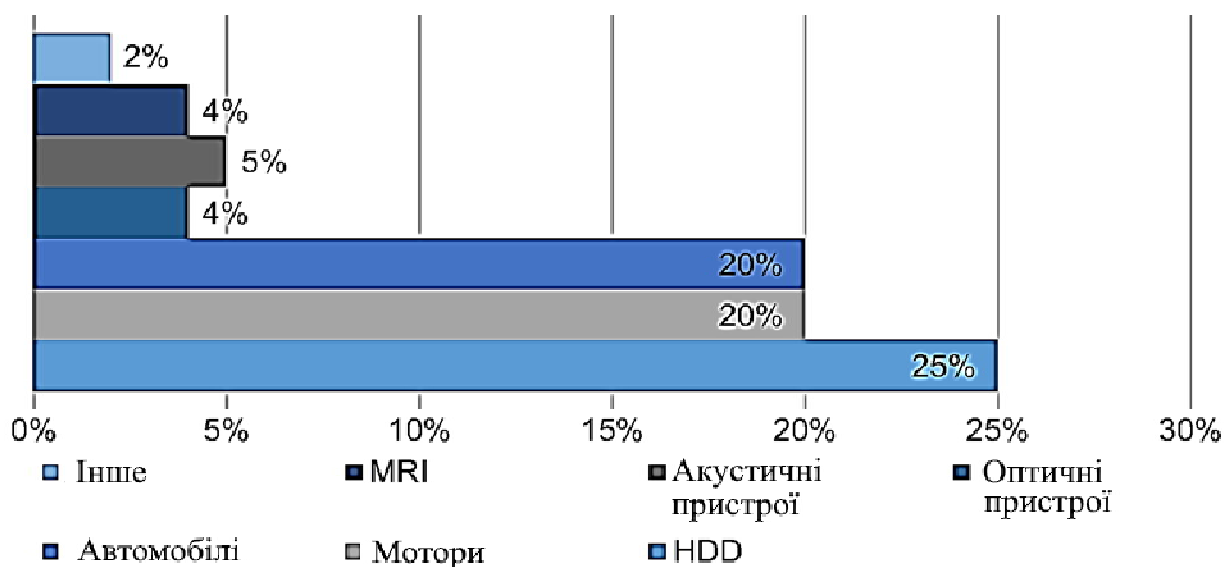


Рис. 3.7. Відсотковий розподіл застосувань NdFeB [31]

Враховуючи суттєву екологічну агресивність вилуговування рідкоземельних елементів, варто навести технологічні схеми, за якими воно реалізовується (рисунки 3.8, 3.9)

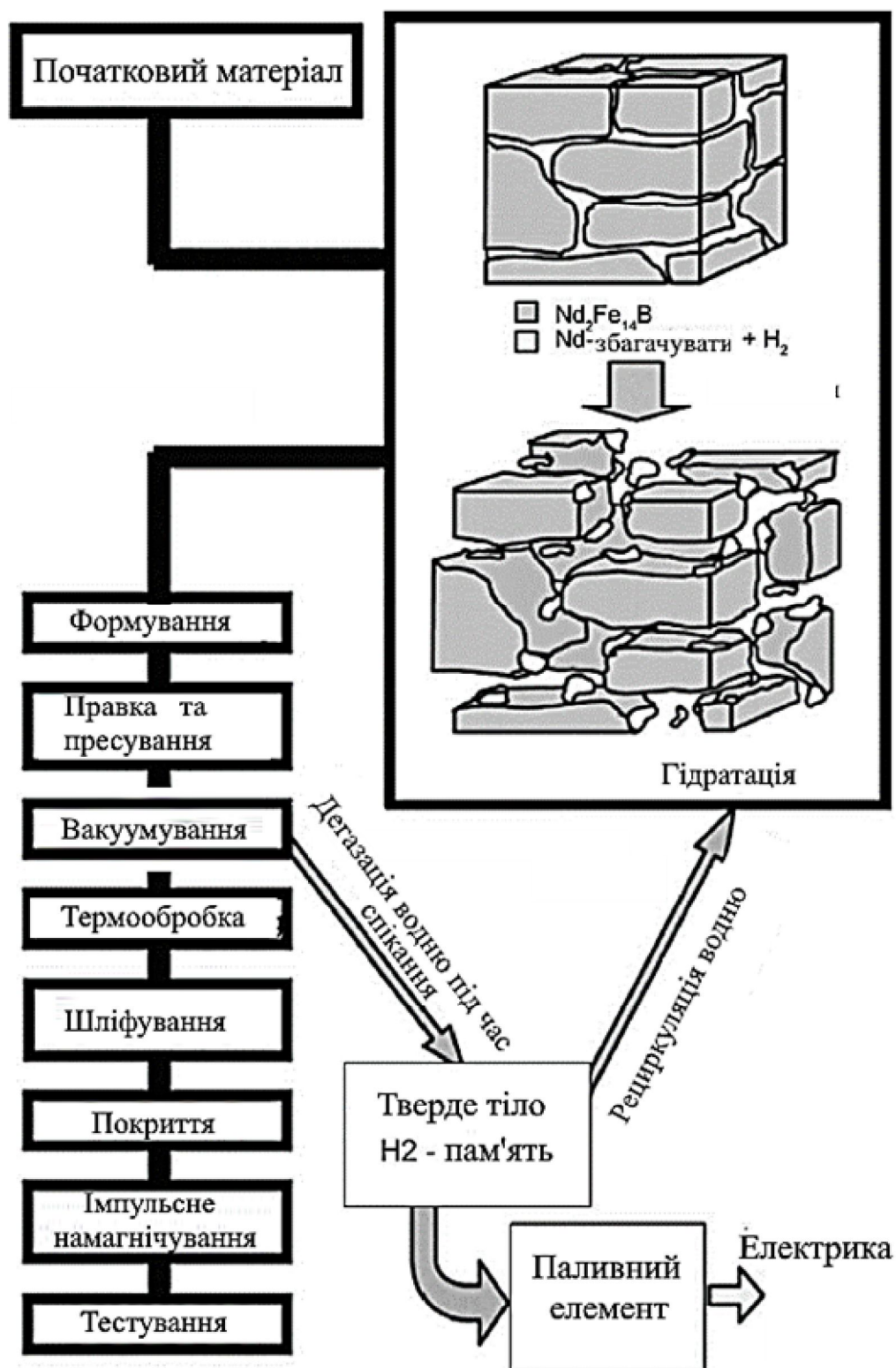


Рис. 3.8. Технологічний процес переробки сировини для виробництва спечених магнітів Nd Fe B [32]

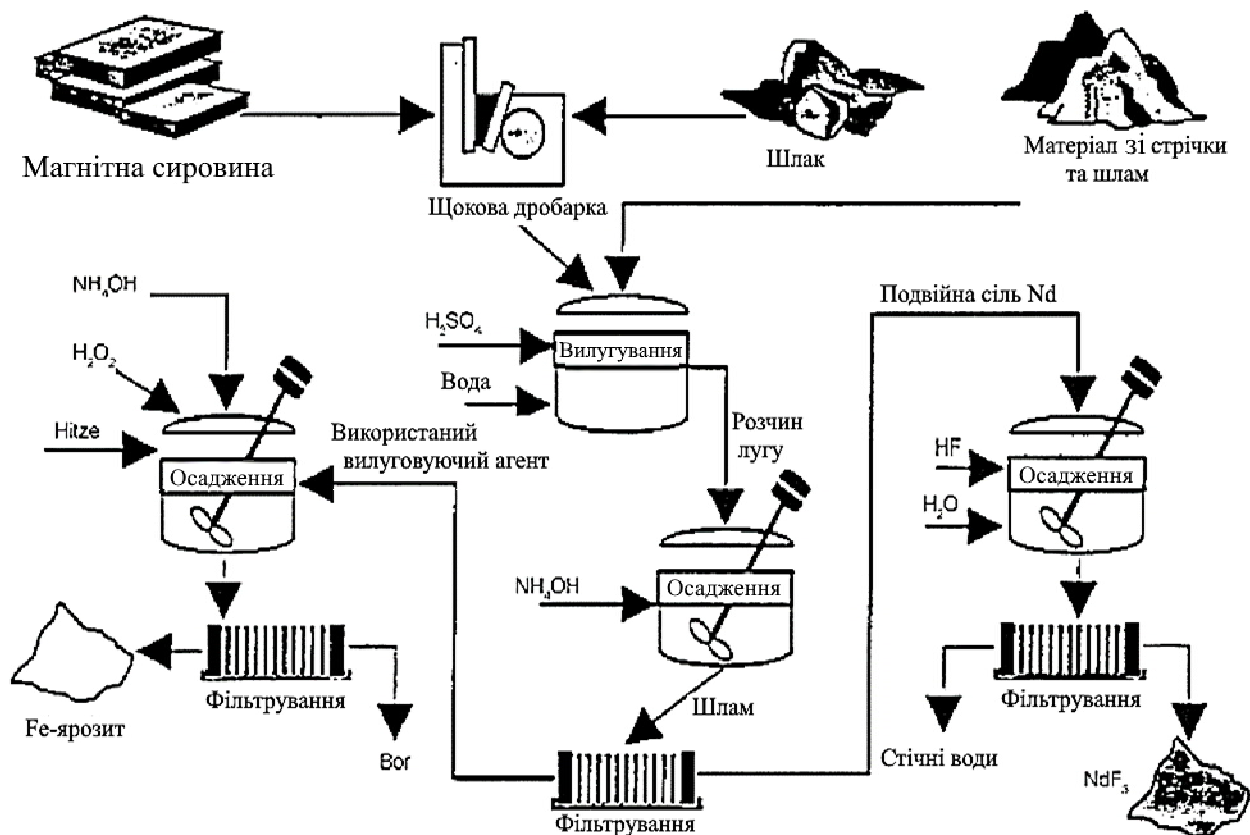


Рис. 3.5. Технологічна схема процесу переробки сірчаної кислоти за Лайманом та Палмером [33]

У цій магістерській роботі головна увага приділяється застосуванню магнітних сепараторів у залізорудних кар'єрах. Але ж добре відомо, наскільки вартісними є сучасні магніти, особливо високоградієнтні, виготовлені з використанням рідкоземельних елементів і сполук. В той же час, Кривбас має надзвичайно потужну металургійну базу, здатну вирішувати завдання практично якого завгодно рівня складності, тому ми розглянули окремо процес гідрометалургійної переробки магнітів з особливим акцентом на відновлення головних елементів магнітних сепараторів шляхом відновлення критичних сировинних матеріалів. Метою аналізу є розділення основних елементів постійного магніту, таких як рідкоземельні елементи, важкі метали та бор, на фракції, що підлягають переробці.

Але на початку даного підрозділу роботи необхідно встановити основу для розгляду теми, проаналізувавши загальні властивості, застосування та способи виробництва магнітів, тому для отримання базового розуміння та загального огляду, наведено пояснення основних шляхів переробки магнітної сировини відповідно до сучасного рівня техніки.

Серію розглянутих випробувань проводили в лабораторії мокрої хімії, щоб мати змогу сформулювати зрозумілі висновки відносно поведінки окремих елементів й ефективності процесу переробки вміщуючої їх сировини [29<https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1876725/AC13021067n01vt.pdf>]. Після чого можна буде зробити задовільний прогноз щодо можливої промислової доцільності процесу.

У даному підрозділі розглядається поведінка елементів неодиму, заліза, бору, празеодиму, диспрозію, нікелю та кобальту. Крім того, основна увага приділяється збільшенню об'єму протягом циклів. А головна увага приділяється самій проблемній особливості магнітів – їхньої властивості розмагнічуватися з часом (рис. 3.6, 3.7).

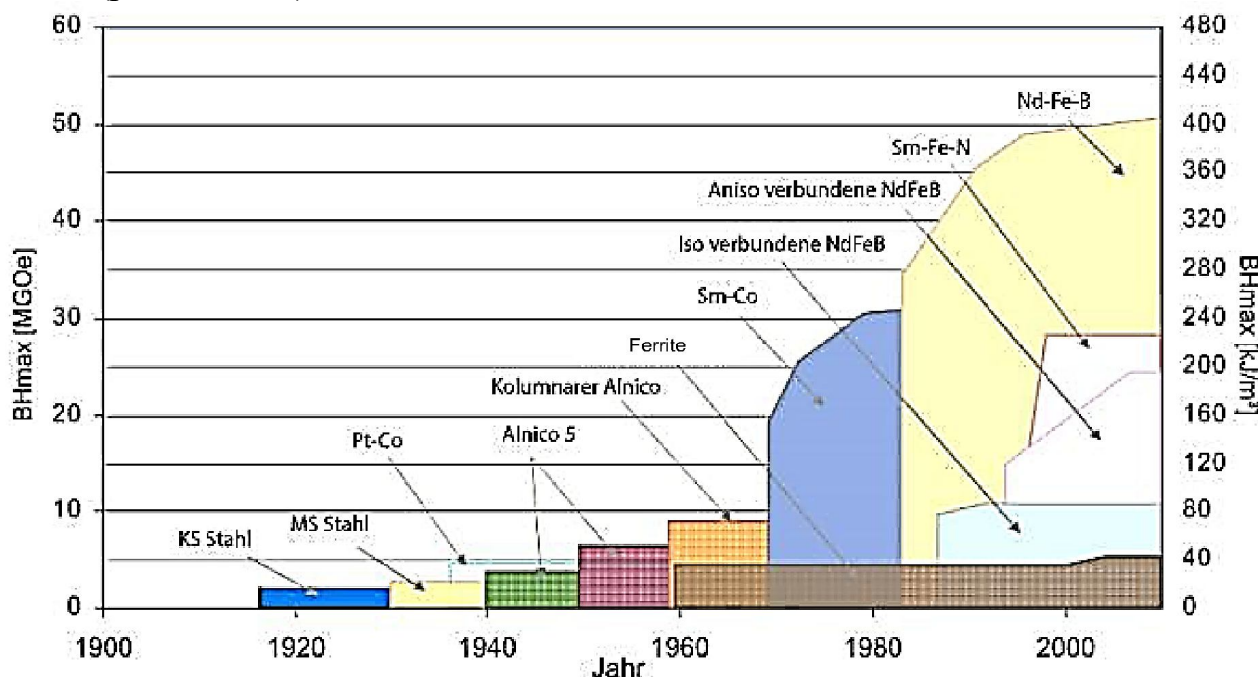


Рис. 3.6. Зміна магнітних властивостей з часом постійних магнітів [34]

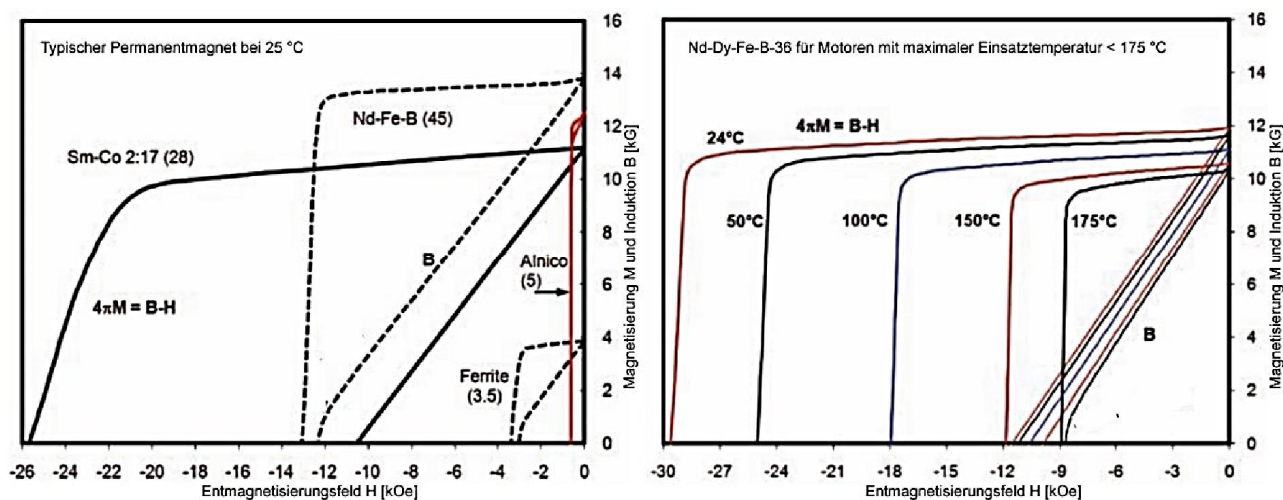
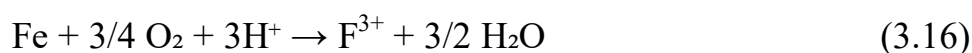
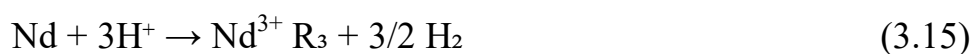


Рис. 3.7. Криві розмагнічування для чотирьох різних магнітів (ліворуч), коерцитивна сила як функція температури (праворуч) [35]

Кояма та Танака [36] порівнюють H_2SO_4 та HCl як луги, використовуючи наступні рівняння реакцій, які описують реакції розчинення неодиму та заліза відповідно.



Наступна діаграма Пурбе (рис. 3.8) показує необхідні умови для селективного розчинення неодиму, залишаючи твердий Fe_2O_3 . Відповідними етапами

процесу є розмагнічування, руйнування, окислювальний випад при 900 °C протягом шести годин та вилугування 2 моль/дм³ HCl при 180 °C протягом двох годин. Досягнута селективність становить 99%, роздільна здатність SEM з вмістом заліза менше 0,5%.

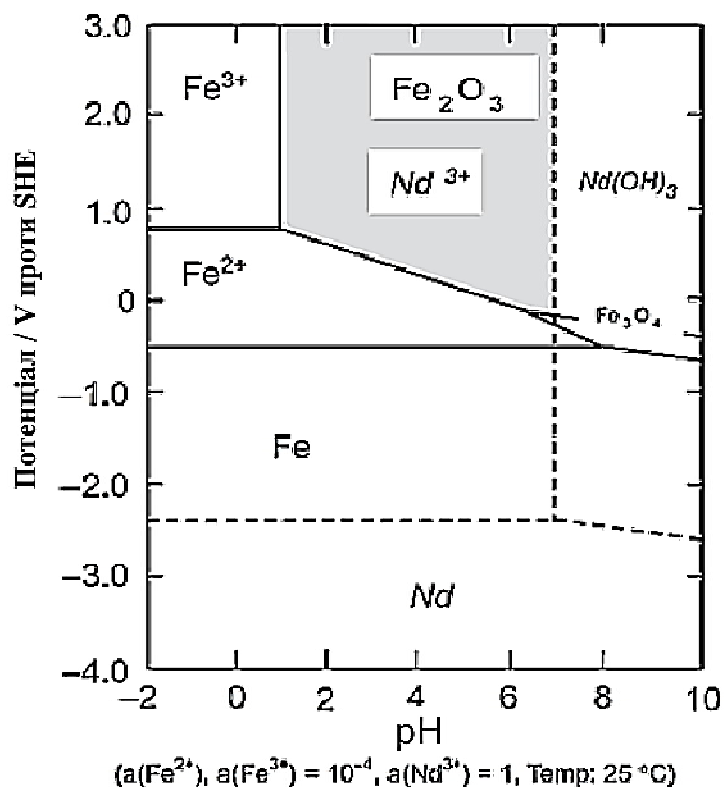


Рис. 3.8. Діаграма Пурбе для систем Fe-H₂O та Nd-H₂O [37]

На наступних рисунках 3.9-3.14 показано вміст елементів як функцію етапів обробки, з прикладом серії випробувань, що слугує ілюстрацією. На рис. 3.9 показано тенденцію вмісту неодиму, де можна побачити селективне видалення під час першого осадження оксалату.

Максимальний вміст розчиненого Nd становить 12 г, що, виходячи з 50 г зразка магнітної фракції, відповідає відносній частці 24%. Вихід рідкоземельних металів після першого циклу становить 98%, оскільки зменшення з 12,03 до 0,265 г не відбулося. Крім того, видно, що значного збагачення розчину елементом не відбувається.

Варіанти видалення бору

Початкові попередні випробування служать для аналізу основної поведінки елементів. Тут обраним методом характеристики є EDX (енергетично-дисперсійна рентгенівська спектроскопія) для отримання якісної інформації.

Через низьку атомну масу бору, його подібну питому енергію зворотного розсіювання електронів з вуглецем і хлором, а також його низьку концентрацію у зразках порівняно з SEM та залізом, якісне визначення цього напівметалу є складним. Тому аналітичні можливості EDX-пристрою спочатку визначають на SEM шляхом дослідження чистої борної кислоти. На рисунку 3.9 показано, що хоча аналіз бору – можливий, він створює труднощі через вищезгадане перекриття піків.

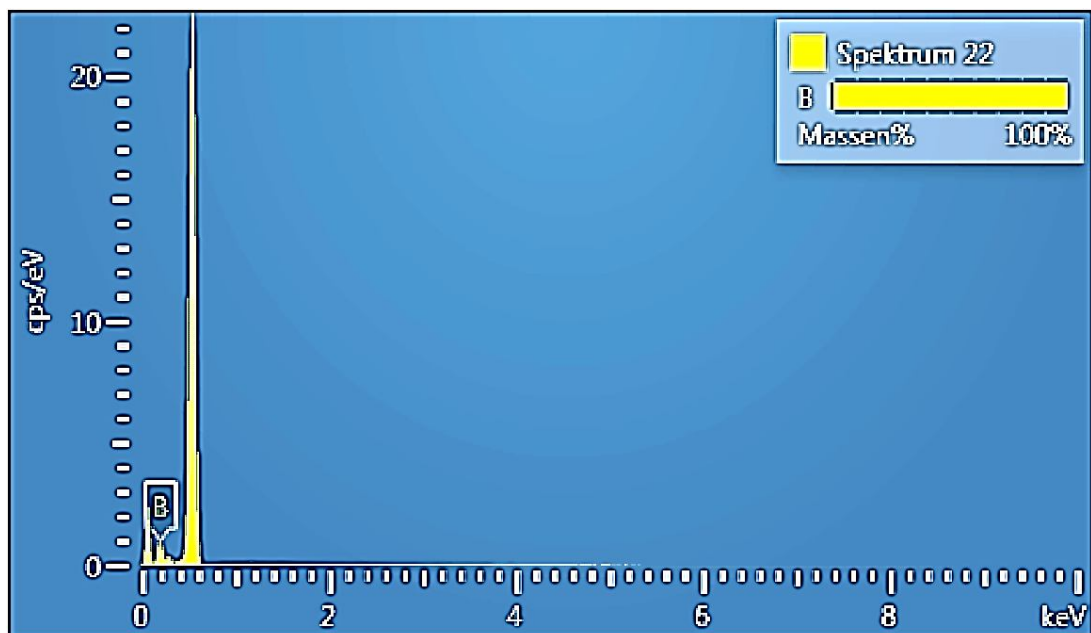


Рис. 3.9. REM-зображення чистого бору кислота (H_3BO_3) [29]

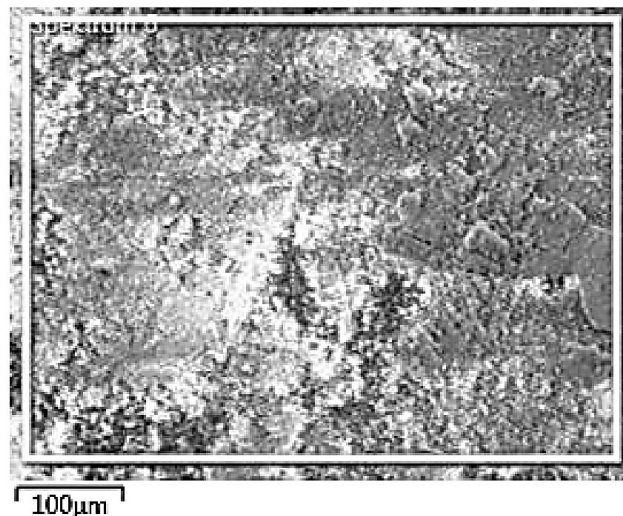
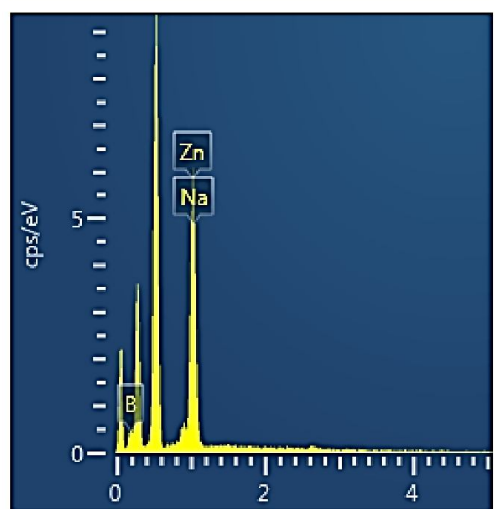
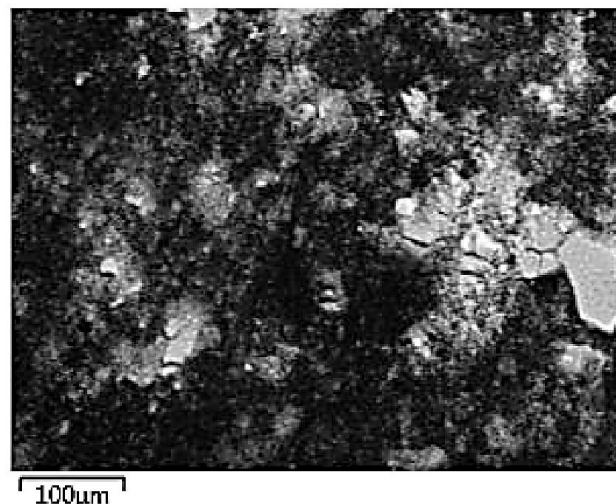
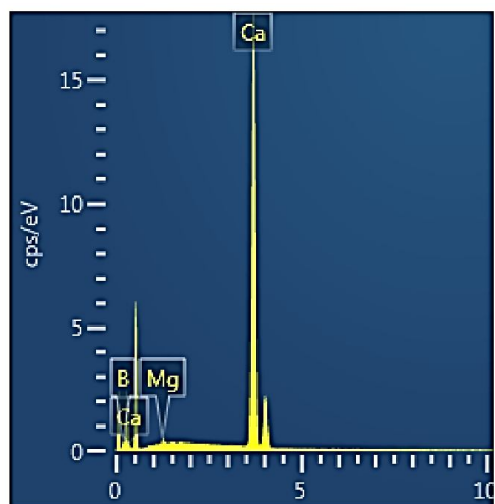


Рис. 3.10. SEM/EDX аналіз осаду з розчину бору з концентрацією 10 г/л, що містить $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та ZnO , з відповідними електронними зображеннями (зверху вниз) [29]

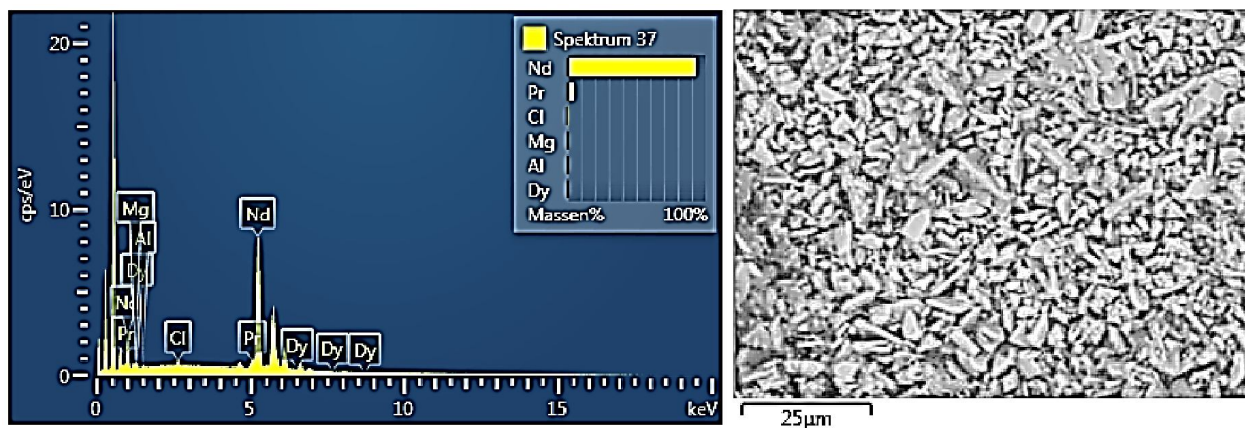


Рис. 3.11. Зображення SEM продукту осадження ацетату з відповідним електронним зображенням [29]

Додавання 6,7 г гідроксиду кальцію або 3,7 г MgO призводить до дуже сильного осадження багатьох розчинених металів, що проявляється, як дуже прозорим фільтратом, так і утворенням великої кількості залишку (див. рис. 3.12). Однак це призводить до підвищення значення рН у лужний діапазон, що робить неспецифічне осадження логічним.

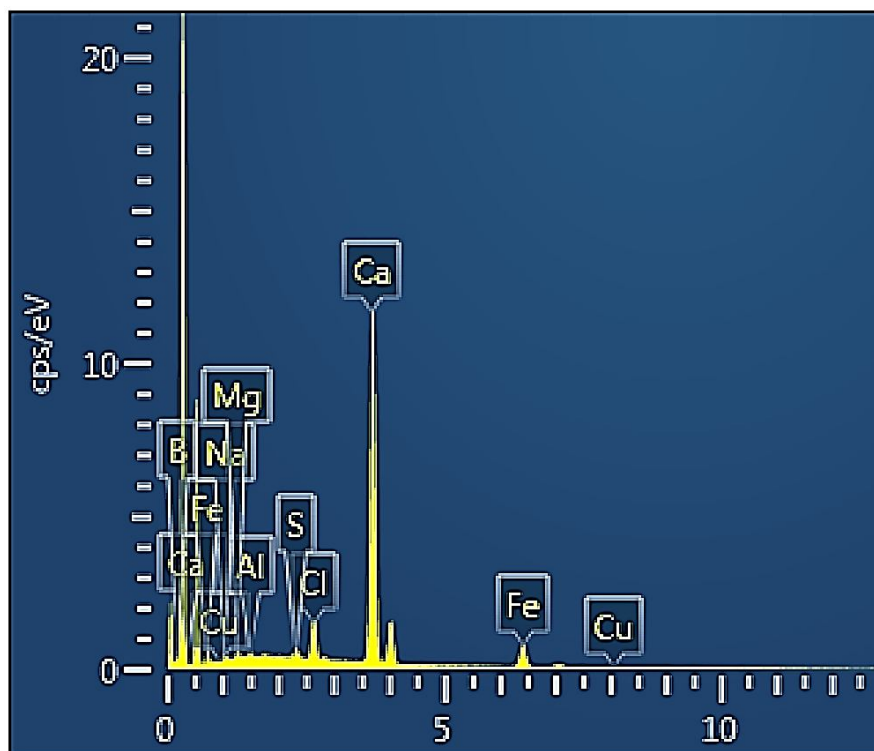


Рис. 3.12. REM/EDX аналіз продукту осадження борату кальцію з вилуженої магнітної фракції [29]

Відповідні вимірювання ICP показують, що відбулося успішне зниження вмісту бору та заліза. Після кількох циклів виникають два варіанти обробки фільтрату вилуговування. З одного боку, додавання $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та MgO у невеликих кількостях може видалити B з незначною зміною рН. З іншого боку, відповідна нейтралізація може призвести до відділення решти елементів та утилізації фільтрату як стічних вод.

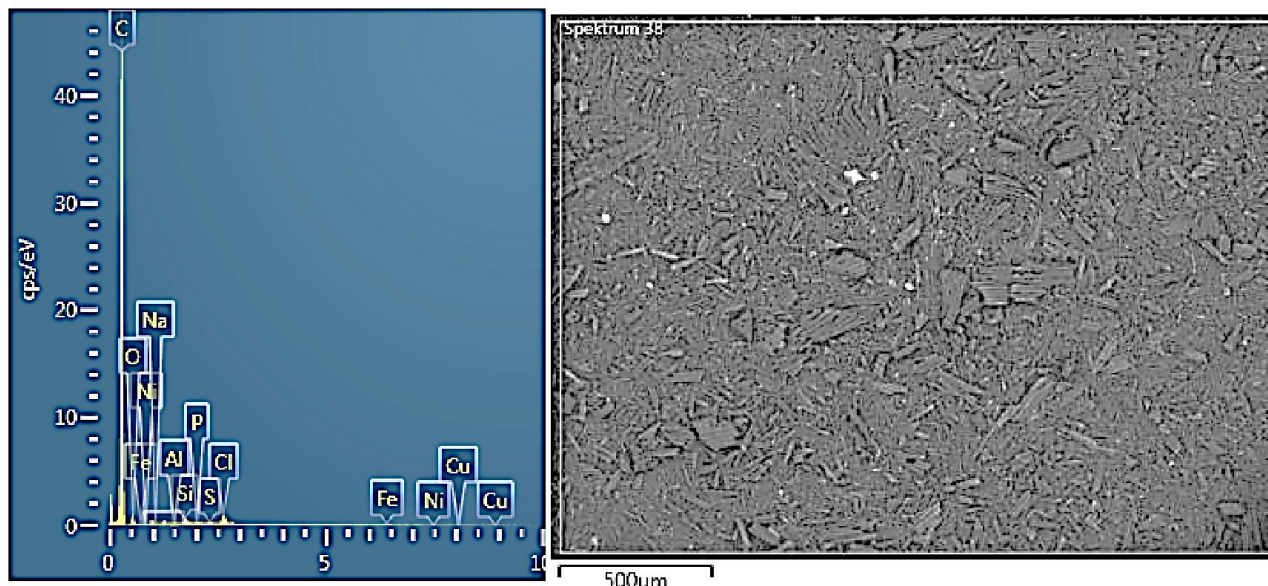


Рис. 3.13. SEM-зображення та EDX аналіз адсорбовані елементи на активованому вугіллі [29]

Поведінка елементів

Нижче розглянуто дослідження поведінки елементів неодиму, заліза, бору, празеодиму, диспрозію, нікелю та кобальту. Крім того, основна увага приділяється збільшенню об'єму під час циклів [29].

На рисунках 3.14 – 3.19 показано вміст елементів як функцію етапів обробки, використовуючи серію експериментів як приклад. На рисунку 3.14 показано вміст неодиму, що свідчить про селективне видалення під час першого осадження оксалату. Максимальний вміст розчиненого Nd становить 12 г, що, виходячи з 50-грамового зразка магнітної фракції, відповідає відносній частці 24%. Вихід рідкоземельного металу становить 98% після першого циклу, оскільки відбулося зменшення з 12,03 до 0,265 г. Крім того, видно, що значного збагачення елемента в розчині немає.

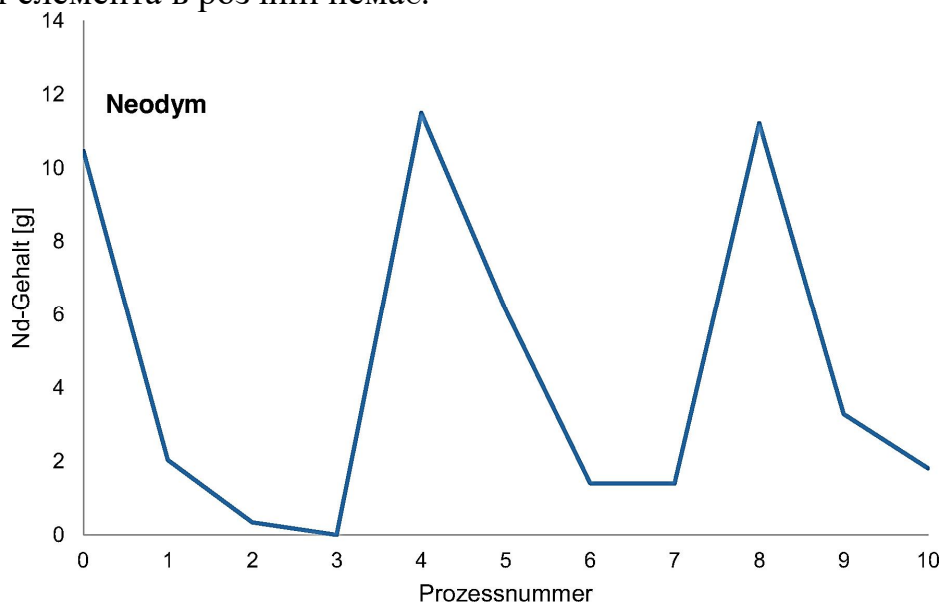


Рис. 3.14. Зміна вмісту неодиму на окремих етапах процесу (0 = вилуговування, 1 = осадження RE, 2 = осадження Fe, 3 = розщеплення оксалатної групи, 4–7 = 2-й цикл, 8–10 = 3-й цикл) [29]

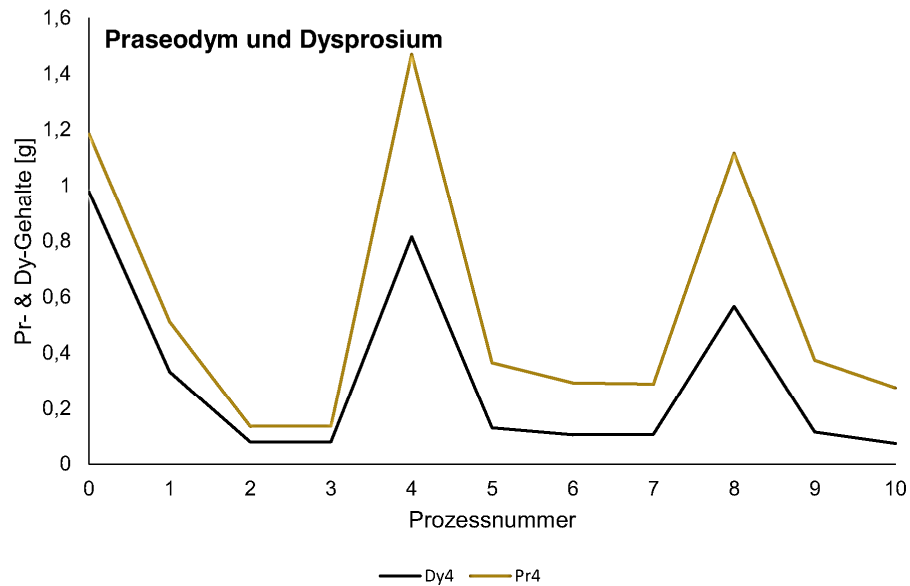


Рис. 3.15. Тенденції вмісту празеодиму та диспрозію протягом окремих етапів процесу [29]

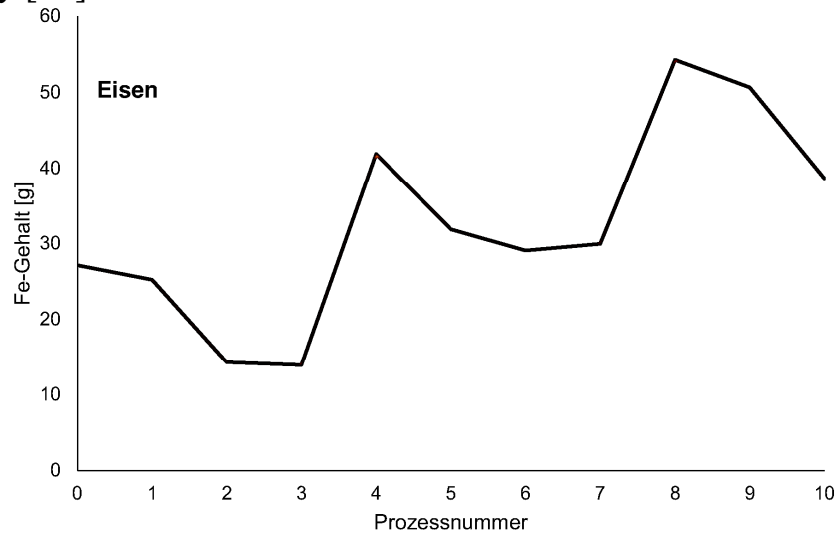


Рис. 3.16. Тенденції вмісту заліза протягом окремих етапів процесу [29]

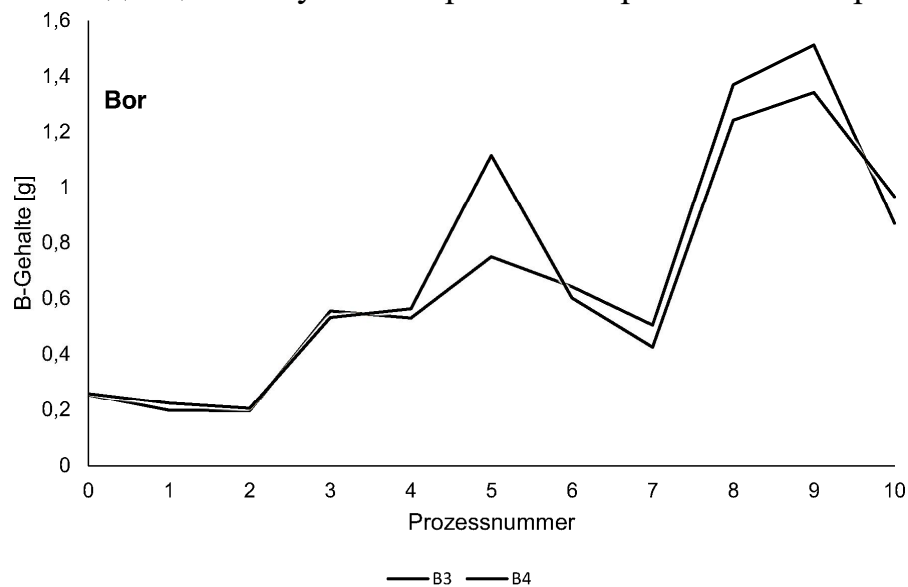


Рис. 3.17. Бор Тенденції вмісту для зразків 3 та 4 протягом окремих етапів процесу [29]

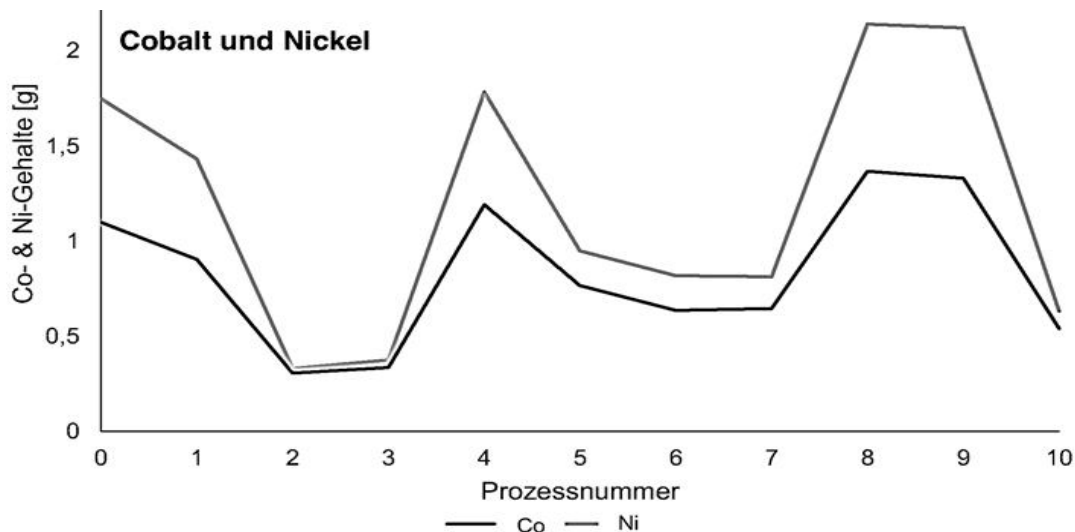


Рис. 3.18. Тенденції вмісту кобальту та нікелю протягом окремих етапів процесу [29]

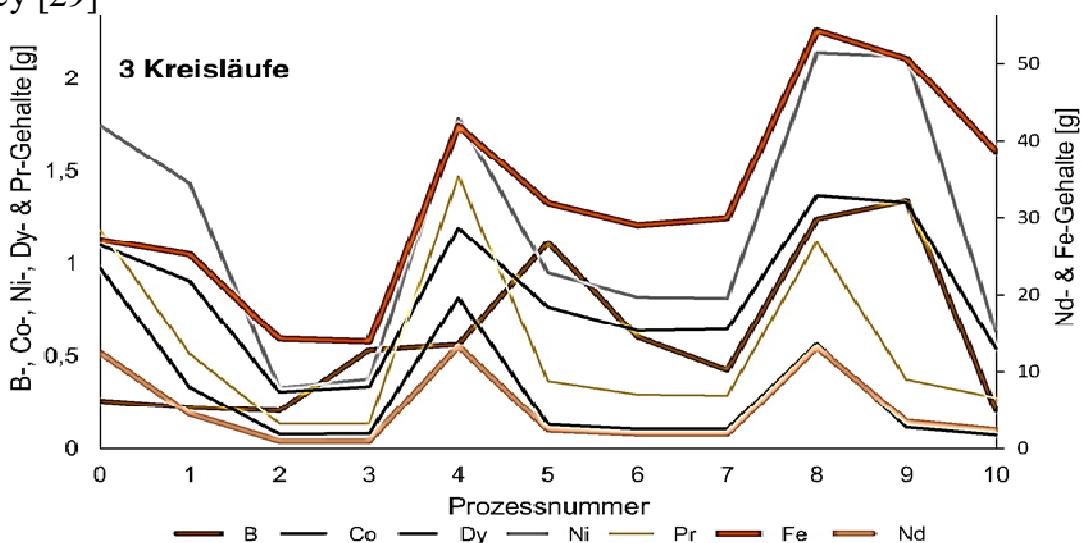


Рис. 3.19. Крива вмісту елементів для зразка V4 протягом окремих етапів процесу [29]

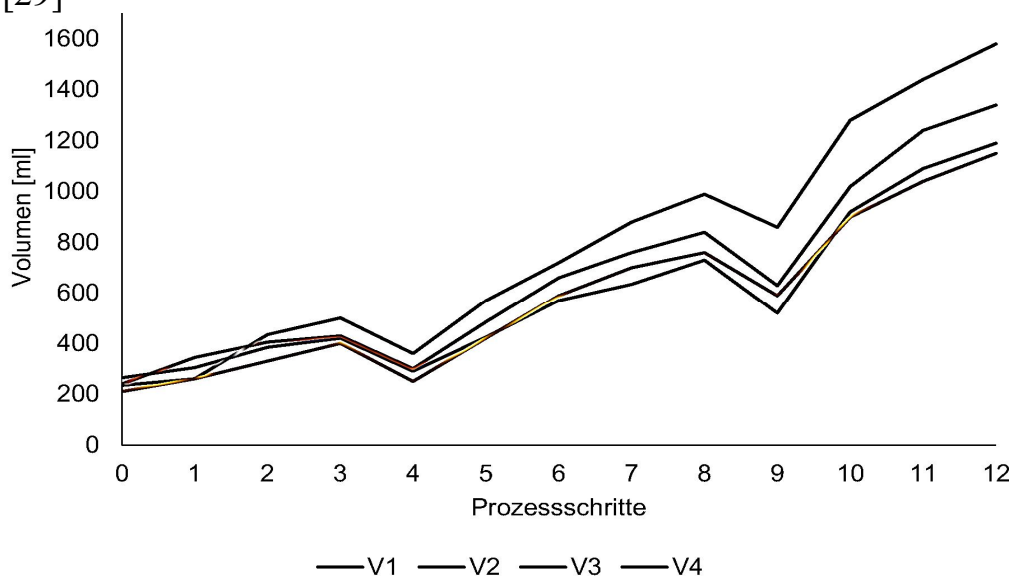


Рис. 3.20. Крива об'єму чотирьох зразків протягом окремих етапів процесу (0 = вилуговування, 1 = осадження SE, 2 = осадження Fe, 3 = розщеплення оксидатної групи, 4 = випаровування, 5-9 = 2-й цикл, 10-12 = 3-й цикл) [29]

Результат обробки зразка V1.3.2 кислотою для подальшого осадження розчинених елементів показано на рис. 3.21 і вказує на те, що залізо, зокрема, знає відновлення. Однак повне видалення неможливе. Збільшення вмісту заліза, що спостерігається на етапах процесу 5 та 6, а також 9 та 10, можна пояснити неточностями вимірювання ICP або об'ємного вимірювання.

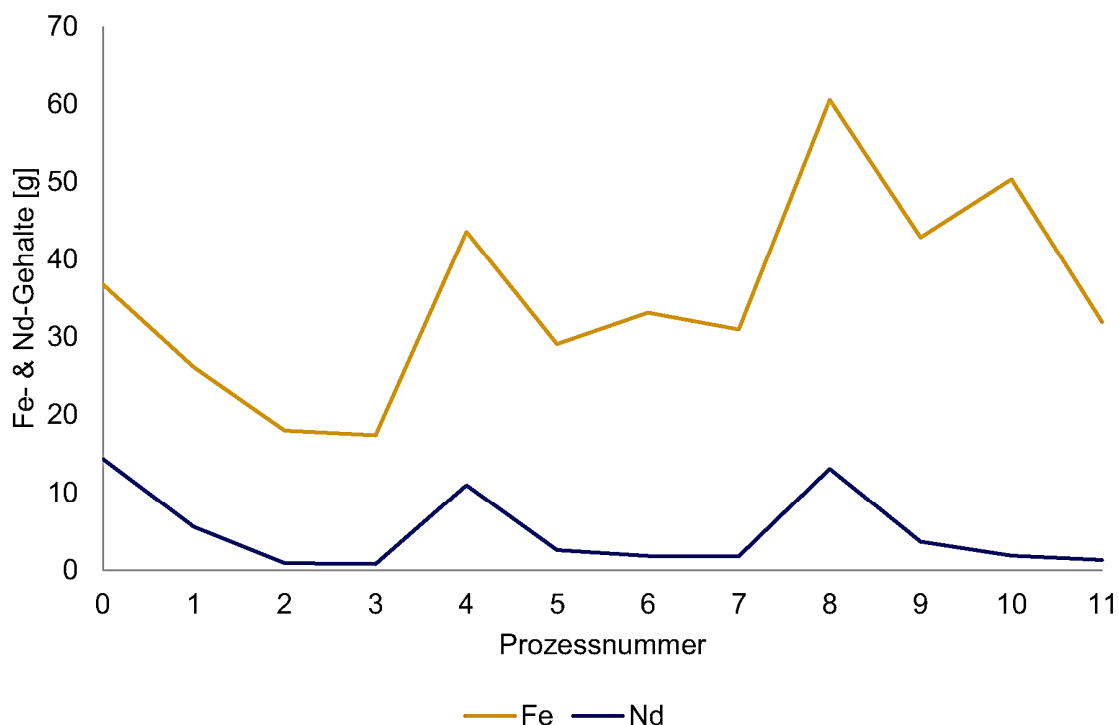


Рис. 3.21. Крива концентрації заліза та неодиму для тестового зразка V1.3.2 після подальшого осадження оксалату [29]

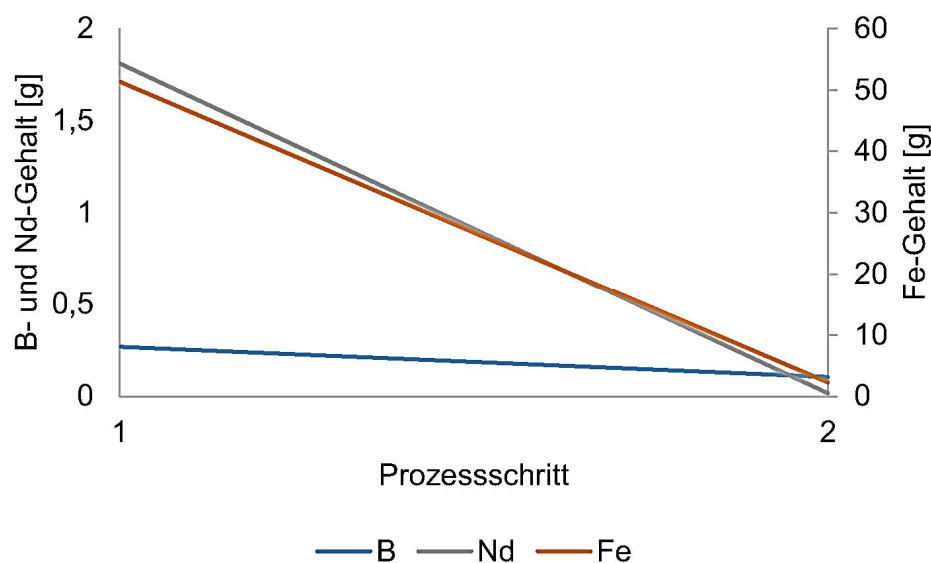


Рис. 3.22. Вміст B, Nd та Fe у 200 мл розчину до та після додавання $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [29]

Значна кількість осадів 24,54 г та 19,04 г відповідно спостерігається під час нейтралізації розчину за допомогою гідроксиду натрію, де значення рН досягає 6,8 (див. рис. 3.23).

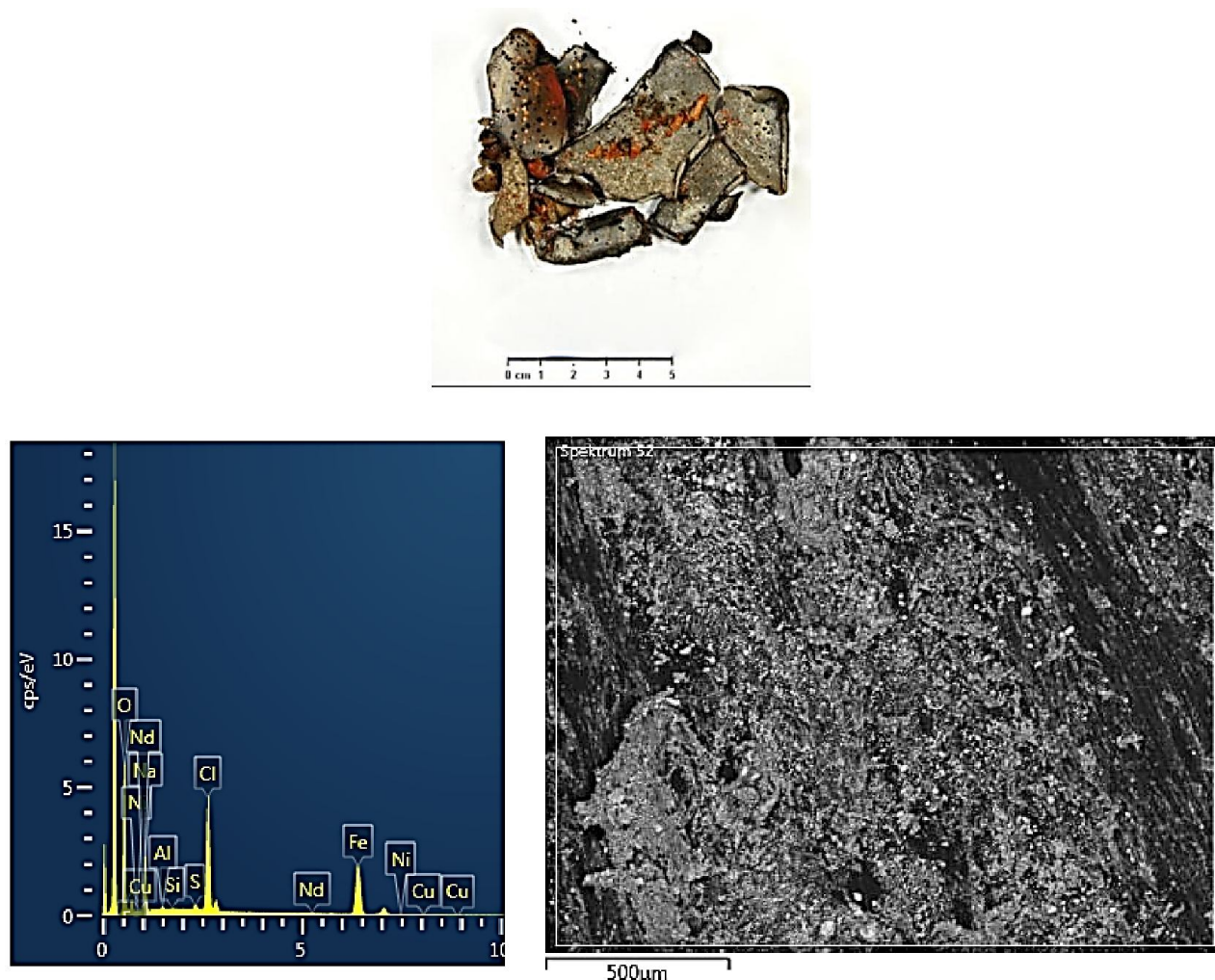


Рис. 3.23. Осадження після реакції нейтралізації з NaOH з відповідним EDX-аналізом та зображенням зворотно розсіяних електронів (BSE)

У цьому підрозділі обґрунтовано важливість магнітів загалом, з особливим акцентом на рідкоземельні метали, використання яких тісно пов'язане з енерго-ефективною та екологічно чистою роботою. Аналіз другої половини 20-го століття показує різке збільшення максимального енергетичного продукту з 1 MGOe для сталі, 3 MGOe для феритів та альніко до 56 MGOe для NdFeB. Останні мають чудові магнітні властивості та покращили свою максимальну робочу температуру під час розмагнічування і свою корозійну поведінку завдяки додаванню диспрозію, празеодиму, кобальту, хрому та міді, а також завдяки органічним, керамічним або неорганічним захисним покриттям. Покриття Ni-Cu-Ni все частіше використовуються як корозійностійкі оболонки [37].

Високоенергетичні постійні магніти, завдяки своїм оптимальним властивостям, займають дуже широкий спектр застосування, від мобільних телефонів та жорстких дисків до електродвигунів в автомобілях та генераторів у вітрових турбінах. У 2008 році річний обсяг виробництва магнітів SEM становив 64 000 тонн, що відповідає приблизній ринковій вартості 7 мільярдів доларів США.

Процес виробництва такої продукції в основному базується на принципі порошкової металургії, за яким сировина піддається механічному подрібненню після вакуумного плавлення, а потім пресуванню та намагнічуванню. Для досягнення оптимальної якості потрібні різні модифікації, особливо під час ущільнення. [35, 38, 39] Сучасним методом переробки для вилучення критичної сировини з магнітів є водневе подрібнення магнітів, при якому реактивний газ під тиском і підвищеною температурою проникає в матрицю матеріалу, утворює гідриди на межах зерен і таким чином руйнує магніт.

Висновки за розділом 3

Як видно з викладеного в даному розділі, експериментальна процедура переробки промислових магнітів спрямована головним чином на відновлення неодиму, празеодиму, диспрозію, заліза, нікелю, кобальту та бору зі спечених магнітів NdFeB. На основі раніше розробленого технологічного циклу [40, 41] метою є спостереження за поведінкою елементів протягом трьох циклів, мінімізація залишкових матеріалів шляхом повторного використання розчинника та видалення бору. На першому етапі 50 г фракції магнітів SEM з жорстких дисків вилуговується за допомогою соляної кислоти. Після повного розчинення спочатку видаляють неодим та інші рідкісноземельні елементи (2 год), а потім відбувається осадження залізо-нікель-кобальтом (24 год). Щавлева кислота використовується в обох реакціях осадження в різних концентраціях. Останнє тверде утворення спочатку хімічно інгібується і може відбутися лише через кілька годин. Після цього відбувається розщеплення оксалатної групи та випаровування води для підтримки постійного об'єму. Отриманий розчинник потім використовується для початку другого циклу вилуговування.

В розглянутих експериментах було проведено ряд циклів для спостереження за збагаченням різними елементами та розчинною здатністю кислоти під час вилуговування. Остаточна обробка розчинів має на меті, з одного боку, осадження бору й інших елементів, а з іншого – повну нейтралізацію розчину, щоб видалити будь-які залишки речовин і дозволити утилізувати фільтрат як стічні води.

Аналіз елементів під час циклів показує можливість майже повного відновлення скануючого електронного розчину (SEM) з розчину (96–98%). Однак цей метод не дозволяє розділити рідкісноземельні елементи (SSEM), такі, як диспрозій, та рідкісноземельні елементи (LSEM) – празеодим та неодим. Через кінетичне гальмування утворення оксалатів важких металів, більшість рідкоземельних елементів необхідно видалити. Однак невелика їх частина сприяє забрудненню продукту SEM та випадає в осад протягом перших двох годин після додавання $C_2H_2O_4$. Це – проблематично.

ПРИКЛАДНІ РІШЕННЯ, РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ КРУПНОКУСКОВОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ РУД У КАР'ЄРАХ

4.1. Передумови та виробничий потенціал напрямку досліджень

Добре оптимізований процес магнітної сепарації та конфігурації обладнання є дуже важливими для видобутку і збагачення залізних руд, особливо – магнетитових. Тому він доволі стрімко розвивається й охоплює все ширше коло різновидів руд, що й вмотивувало нас до розгляду можливостей та перспектив упровадження його в кар'єрах гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу.

Безумовно: магнітна сепарація не тільки широко застосовується на усіх без виключення ГЗК, вона є основною технологією, але – виключно в процесах збагачення руди, але – не її видобутку. Ми ж пропонуємо більш активно упроваджувати її саме у видобувних операціях, серед яких вбачаємо найбільш перспективною крупнокускову розборку підірваної рудної маси шляхом магнітної сепарації.

Власне, магнітна сепарація головним чином спрямована для переробки залізняку з високою магнітною проникністю, яким є той же магнетит. Завданням же даної роботи є адаптація більш-менш придатних технологій до видобутку залізистих кварцитів.

Обладнання, необхідне на установці магнітної сепарації залізної руди, являє собою в основному грохоти, дробарки, сухі магнітні сепаратори та вібраційні сита. Але вищевказана технологічна схема підходить тільки для збагачення власне магнетиту. Для збагачення слабомагнітних залізних руд необхідно застосовувати процес сильної магнітної сепарації.

Хімічний склад магнетиту – Fe_3O_4 . Кристали є оксидними мінералами в рівноосній кристалічній системі. Кристали часто являють собою октаедри та ромбодричні додекаедри, а їх агрегати – щільні блокові або зернисті. Колір залізно-чорний, із чорними прожилками, блиск металевий або напівметалевий, непрозорий, без спайності, твердість за Моосом 5.5-6, питома вага 4.8-5.3. Він має сильний магнетизм і після окислення стає гематитом або лимонітом.

Видобуток залізистих кварцитів з методом магнітної сепарації, включаючи крупнокускову, має безліч переваг, таких як енергозбереження, висока ефективність і високий індекс збагачення. Магнітна сепарація, особливо при переробці бідних магнетитових руд, є найефективнішим методом, на наше переконання, й стосовно залізистих кварцитів.

Саме тому магнітна сепарація (в тому числі й крупнокускова) – метод поділу фрагментів дробленої вибухом або дробарками гірничої маси, в якому використовується різниця в магнітній проникності мінералів – застосовувався раніше інших в історії гірничої справи, і, на наше переконання, займе надзвичайно важливе місце, не тільки в переробці, але й безпосередньо у самому видобутку залізних руд Кривбасу.

Стосовно ж магнітного розділення рудної маси з метою попереднього збагачення (передзбагачення) крупнокускової та середньої за крупністю залізної

руди в процесі її видобутку існує відповідне видобувним технологіям спеціальне обладнання для магнітної сепарації саме такого матеріалу, а різні процеси безпосереднього розділення та конфігурації обладнання можуть бути спроектовані відповідно до фактичних конкретних умов.

Як правило, при розробці покладів різних типів руд при науково обґрунтованому проектуванні процесу магнітної сепарації на різних етапах видобутку і переробки та конфігурації сучасного обладнання вміст концентрату може сягати більше 63%, а ступінь видобування – перевищувати 90%.

4.2. Науковий внесок України в рішення означеної проблеми

4.2.1. Удосконалення технології переробки залізистих кварцитів

Рівень гірничої науки нашої країни є надзвичайно високим і всесвітньо відомим. Значний внесок в розвиток геотехнологій та їх наукове забезпечення зробили заклади, як академічної, так і вузівської науки: Академії гірничих наук України, Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, Криворізького національного університету, Київської та Дніпропетровської «Політехнік» й ін.

Особливої уваги заслуговує докторська дисертація Бабій К.В. "Геомеханічні основи технології передзбагачення руди в глибоких залізородних кар'єрах" [42] за спеціальностями 05.15.09 – "Геотехнічна і гірнична механіка" та 05.13.09 – "Відкрита розробка родовищ корисних копалин", а також монографія [43]. Цінність даних наукових праць в ракурсі теми даної магістерської роботи полягає головним чином в тому, що розроблені рішення цілеспрямовано орієнтовано на упровадження в умови кар'єрів ГЗК України (ПГЗК, ЦГЗК й ін.) з належним науковим обґрунтуванням та техніко-економічними рзрахунками.

В даних роботах та ряді інших [44-47] науковців Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України на високому науковому рівні розглядаються питання крупнокускової магнітної сепарації залізистих кварцитів родовищ України та наукового обґрунтування параметрів розроблених технологій.

4.2.2. Досвід сухого магнітного збагачення окислених мідних руд

Розглядаючи приклади успішного видобутку рудної сировини в різних країнах світу, ми не могли не включити до виконаного аналізу досвід видобутку і сухої магнітної сепарації окислених мідних руд на африканському континенті, враховуючи особливим чином ту обставину, що в науковому супроводі даного проекту брали участь науковці з «Дніпровської політехніки» [48].

В Конго останнім часом усе активніше розробляються стратиформні родовища мідного поясу Африки, довжиною близько 700 км та шириною до 80 км з сотнею міднородних покладів з вмістом Cu від 1,15 до 8%.

Найчастіше переробка мідних руд виконується шляхом флотації й окислювального випалу, що є неприйнятним для наших завдань, оскільки застосування

цього методу пов'язане з використанням поверхнево-активних реагентів і пов'язане з зараженням токсичними відходами сепарації доквілля.

Гідрометалургійна переробка вживається, коли флотація не забезпечує повноту вилучення Cu, до того ж не допускається присутність в руді кислоторозчинних мінералів та метод є надмірно витратним і екологічно агресивним. Тому у даній частині роботи розглядається сухий магнітний метод видобутку й переробки мідновмісної руди.

Науково-виробничою фірмою “Магнітні та гідравлічні технології” спільно з рядом науковців «Дніпровської політехніки» (Україна) було досліджено проби мідної руди родовищ провінції Катанга (Конго) із завданням отримати концентрат з вмістом міді не менше 30% виключно методами сухого збагачення.

Мінералогічний склад проб подано в табл. 4.1

Таблиця 4.1

Мінералогічний склад проб

Мінерали	Мідьвміщуючі					Залізовмісні
	Малахіт $\text{Cu}_2[\text{CO}_3] \cdot (\text{OH})_2$	Куприт Cu_2O	Аурихальцит $(\text{Zn,Cu})_5 \cdot (\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$	Хризосола $\text{Cu}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Самородна мідь	(магнетит, гематит, гідроокисли)
Вміст, %	26	3,5	3	2	0,5	11
Мінерали	Кобальтвмісні		Породні			
	Гетерогеніт $(\text{CoO} \cdot \text{OH})$		Кварц	Кальцит	Барит	Аморфна речовина
Вміст, %	5		33	1	0,5	14,5

Малахіт і хризосола мають слабомагнітні властивості, питома магнітна сприйнятливість – $10\text{-}25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ і $6\text{-}6,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ відповідно. Решта мінералів – немагнітні: самородна мідь ($0,0163 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$), аурихальцит та куприт ($0,05\text{-}0,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$).

Магнітні властивості мають залізовмісні мінерали: магнетит, гематит і гідроокиси заліза, чому першочергово виконувався магнітний аналіз щодо збагачуваності проб магнітним методом, оскільки основним мідьвмісним мінералом є малахіт (до 26%). Всього було виділено 7 продуктів: 6 магнітних і 1 – немагнітний. Контрольного перевищення зазнав – немагнітний при індукції магнітного поля від 0,3 до 1,1 Тл.

Результати мінералогічного аналізу отриманих продуктів показав, що самородна мідь і куприт виділилися в магнітний продукт внаслідок того, що дендрити та платівки самородної міді включали магнетит або гематит (мартит).

Поверхня кристалів кварцу здебільшого покрита тонкими плівками гідроокисів заліза або міді. Результати хімічного аналізу продуктів збагачення подано в табл. 4.2.

Виходячи з результатів магнітного аналізу, було запропоновано схему збагачення, яка включала наступні операції: знешламлювання продукту за класом –0,063 мм, магнітна сепарація у скальпуючому режимі при зниженій індукції магнітного поля для виділення залізовмісних мінералів, що мають високу пи-

тому магнітну напруженість магнітного поля. Запропоновану схему збагачення зображено на рис. 4.1.

Таблиця 4.2

Вміст основних хімічних елементів у продуктах поділу

Продукти	Вміст, %							
	Cu	Fe	Si	Al	Co	Mn	Ni	Ca
Вихідний	15,6	7,0	16,6	1,9	1,3	0,3	<0,1	1,3
Сильно магнітний	13,2	21,1	4,1	1,6	2,4	0,42	<0,1	2,5
Магнітний	36,7	7,7	10,8	1,5	1,8	0,36	<0,1	0,8
Немагнітний	2,1	0,6	24,6	1,9	0,3	0,12	<0,1	1,2
Шлами	11,3	6,9	20,4	3,1	1,6	0,42	<0,1	1,2

Як видно з табл. 4.2, кількість шламів у вихідній руді становила 18,2% із вмістом міді 11,3%. Сильномагнітна фракція виділялася у два прийоми при індукції магнітного поля відповідно 0,25-0,3 Тл та 0,6-0,7 Тл. Вміст міді у цій фракції становило 13,2%. Кількість слабوماгнітної фракції становила 29,3%, із вмістом міді 36,7% за її вилучення 68,8%. Немагнітна фракція, вихід якої склав 37,1%, містила 2,1% міді.

Вміст кобальту за продуктами поділу, також перерозподілився. У класі - 0,063 мм, його вміст становив 1,6%; у сильномагнітній фракції – 2,4%; у слабوماгнітній фракції – 1,8% та у немагнітній – 0,3%.

Для реалізації даної технології НВФ "Магнітні та гідравлічні технології" [49] розробила схему ланцюга апаратів, представлену на рис. 4.1.

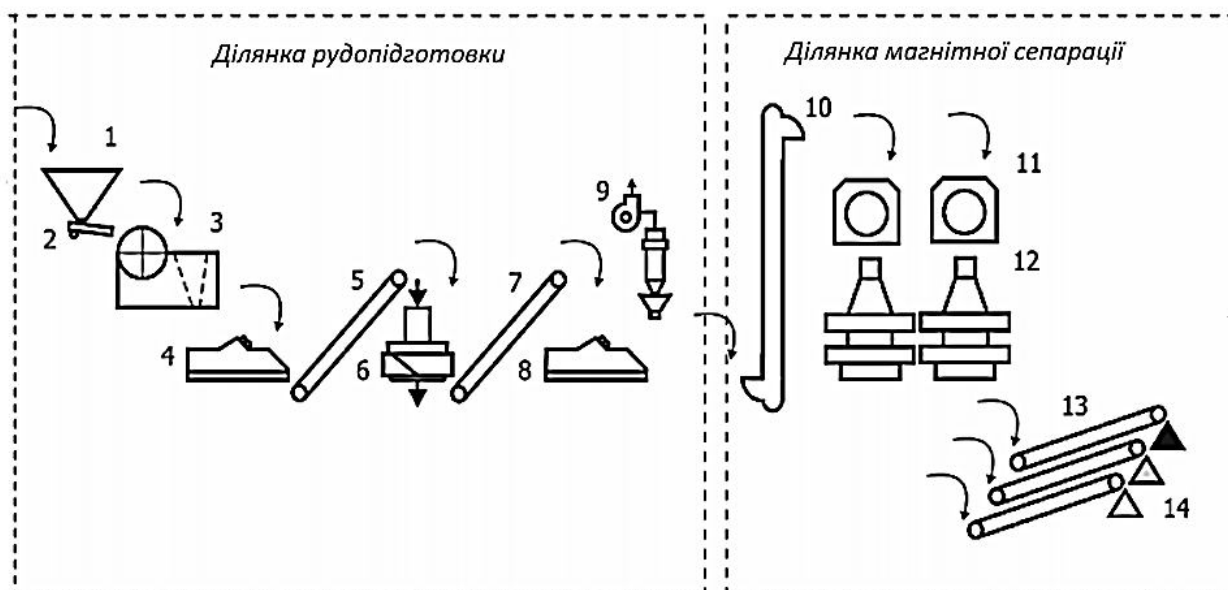


Рис. 4.1. Схема ланцюга апаратів реалізації технології: 1 – накопичувальний бункер вихідної руди; 2 – віброживильник; 3 – щоква дробарка; 4, 8 – віброгрохоти; 5, 7, 13 – конвеєри; 6 – відцентровий млин; 9 – система обезпилювання

вання; 10 – елеватор; 11 – барабанні магнітні сепаратори з індукцією до 0,7 Тл; 12 – бар’єрний магнітний сепаратор “Туркенич”; 14 – склад готового концентрату

Таким чином, в результаті проведених українськими науковцями досліджень встановлено можливість збагачення мідних руд родовищ Мідного поясу Африки сухим способом з використанням методу магнітної сепарації, при цьому виділено 29,3% матеріалу з вмістом міді 36,7%, при її вилученні 68,8%.

Для визначення технологічних показників бар’єрного електромагнітного сепаратора "Туркенич" і підвищення показників збагачення необхідно провести додаткові дослідження, які також включатимуть дослідження з визначення класу крупності руди.

4.3. Реалізація крупнокускової магнітної сепарації в рудних кар’єрах

На сьогоднішній день крупнокускова магнітна сепарація залізних руд, включаючи залізисті кварцити, набуває все більшого значення для кар’єрів потужних гірничо-збагачувальних комбінатів, незважаючи на поки що доволі обмежені масштаби її практичної реалізації, чому є багато, як об’єктивних, так і суб’єктивних причин.

Але причини ці стосуються здебільшого організаційної сфери, а не технологій, тому – залишаємо їх поза увагою, а піддаємо аналізу суто цільові питання і процеси, що відповідають напрямку даної роботи.

4.3.1. Проект підрядного дроблення в Казахстані як прототип вхідної частини комплексу крупнокускової магнітної сепарації

З осені 2023 року запущено проект підрядного дроблення для реконструкції дороги Караганда – Балхаш (Казахстан) [50].

Ми розглядаємо даний приклад виключно з метою оцінки потенціалу запозичення реалізованих інженерних рішень для рудників Кривбасу на вході пропонованого комплексу крупнокускової магнітної сепарації на стадіях перевантаження сирової руди, її грохочення та первинного дроблення.

Запропонована QS Group [51] технологічна схема спочатку складалася з двох стадій дроблення.

Первинне дроблення здійснювалося мобільною щековою дробаркою на гусеничному шасі.

На другій стадії використовувався напівмобільний комплекс з конусною дробаркою – найпопулярніша установка в парку підрядного дроблення QS Group.

Але вже в січні цього року для збільшення продуктивності до існуючої виробничої лінії була додана ще одна стадія дроблення – стаціонарна конусна дробарка на опорних металоконструкціях.

Загальна продуктивність комплексу (рис. 4.2) сягає 200 т/год. Отримані фракції матеріалу – 5-10 мм і 10-20 мм.

Вироблений щебінь використовується для зимового утримання доріг та для підготовки до майбутнього дорожньо-будівельного сезону. Для безперебійної роботи дробильно-сортувального комплексу фахівці QS Group працюють у цілодобовому режимі.



Рис. 4.2. Комплекс підрядного дроблення проекту QS Group [50]

4.3.2. Комплекси рудорозбірки Magnetis KMP

Комплекс механізованої магнітної рудорозбірки КМР (рис. 4.3) використовується для поділу видобутої в зоні контакту руди та породи гірничої маси на два продукти: магнітний та немагнітний [52].



Рис. 4.3. Комплекс механізованої магнітної рудорозбірки КМР [52]

Магнітний продукт являє собою кондиційну магнетитову руду, немагнітний – порожню породу. Комплекси також застосовуються для поділу суміші магнетитової і гематитової (окисленої) руд.

Склад комплексу: бункер прийому гірничої маси, щоква дробарка крупного дроблення до 350 мм, живильник, стрічковий конвеєр, комплекс рудорозбирання КМР, стрічкові конвеєри для відведення продуктів рудорозбирання, система автоматизації (рис. 4.4, 4.5).



Рис. 4.4. Передаточний вузол комплексу механізованої магнітної рудорозбірки КМР [52]



Рис. 4.5. Відібрана крупнокускова фракція комплексу механізованої магнітної рудорозбірки КМР [52]

Технічні характеристики:

- продуктивність – від 500 до 1000 т/год.
- крупність матеріалу, що переробляється 0-450 мм.

Ефект:

Зниження втрат кондиційної руди з гірською масою, що спрямовується у відвал. При переробці в комплексі КМР гірничої маси із зон контакту руди і породи з вмістом заліза нижче бортового значення, вона спрямовується в породний відвал, магнітний продукт витягується (близько 40-50%) до кондиційної руди, придатної для збагачення та отримання концентрату.

Підвищення якості залізорудного концентрату. Механізована магнітна рудорозбірка виключає засмічення руди шматками порожньої породи і перешкоджає залученню цієї породи в мокрий збагачувальний процес на ДЗФ. В результаті підвищується середній вміст заліза в руді, що надходить на збагачувальний переділ і – як наслідок – підвищується якість концентрату.

Підвищення продуктивності збагачувальної фабрики. Обмежуючи потік на фабрику порожньої породи, у значному обсязі вивільняються виробничі потужності для завантаження рудою, що збільшує вихід концентрату.

Короткий термін окупності застосування. Зазвичай інвестиції у переробку руди на комплексі магнітної рудорозбірки КМР повністю окупаються менше ніж за 2 роки експлуатації.

Цифри:

- 42000000+ тонн на рік переробляється гірничої маси.
- 20 000 000+ тонн на рік кондиційної руди для виробництва концентрату з гірничої маси, що спрямовується у відвал.
- 10+ років експлуатації з першого впровадження

Унікальність проектів

Магнетитові руди різних родовищ, а також різних ділянок одного родовища відрізняються одна від одної за багатьма показниками: вмістом магнітного заліза, мінеральним складом, структурою, текстурою і т.д.

Враховуючи це, для досягнення максимальної ефективності сепарації перед реалізацією проекту обов'язково проводяться багаторазові випробування руди на дослідно-промисловій установці, в результаті яких створюється спеціальна технологія, що максимально відповідає даному типу руди і вимогам замовника до межі поділу.

Реалізовані проекти:

- комплекс КМР на кар'єрі Корпанга: продуктивність по вихідній гірничій масі – 600 т/год.
- комплекс КМР на кар'єрі Центральний: продуктивність по вихідній гірничій масі – 1000 т/год.
- Кімкано-сутарський ГЗК: 2 комплекси КМР на Кімканському родовищі з продуктивністю по вихідній гірничій масі – 800 т/год.
- модернізація КМР на кар'єрі Корпанга – збільшення продуктивності по вихідній гірничій масі до 1000 т/год. Зроблено заміну магнітного барабана, збі-

льшено діаметр на 200 мм із заміною опорних блоків. Інші конструкції комплексу залишилися без змін.

4.3.3. Технології магнітного сортування фракцій Norditek та Idemag

Переробка металу – це галузь, де можна досягти значної економії енергії. Метали є гарним прикладом, оскільки ця переробка економить 95% енергії, яка в іншому випадку потрібна для виробництва нового алюмінію.

Шведська компанія Norditek [53] має технологію для кращого сортування фракцій, що збільшує якість переробки матеріалів.

Метали видобуваються у три етапи (рис. 4.6, 4.7).



Рис. 4.6. Комплекс магнітного сортування фракцій компанії Norditek [54]



Рис. 4.7. Комплекс магнітного сортування мінеральної сировини Norditek [Джерело: <https://norditek.se/de/energieerueckgewinnung/> [55]]

Перший етап – це стрічка подачі з обертовими пальцями, яка розподіляє матеріал у дуже тонкий шар – моношар.

На наступному етапі матеріал подається на стрічку прискорення, яка збільшує довжину матеріалу, а магніт кінцевого ролика на кінці стрічки витягує магнітний матеріал.

Немагнітний матеріал видобувається на третьому етапі за допомогою вихрострумового магніту, який має високоінтенсивну магнітну конфігурацію. Це унікальна властивість магнітних роликів Goudsmit, яка генерує надзвичайно високі магнітні сили, що дозволяють вилучати малі та слабوماгнітні частинки NF.

У Norditek розробляються нові машини, які вирішують більшість проблем у сфері переробки матеріалів. Компанія здає в оренду власні машини, а також дробарки та будь-які інші машини, необхідні для вирішення роглянутих вище проблем. Окрім власної марки, вона є постачальником марок Finlay, Backers, Tana та Goudsmit у Швеції.

Norditek продає понад 700 видів обладнання у Швеції, і окрім великої кількості запасних частин та машин, у неї завжди є нові ідеї щодо вирішення проблем переробки сировини. В ній розробляють концепції, за якими різні машини вирішують різні типи проблем.

Німецька фірма IDEMAG [56] також пропонує широкий спектр магнітних рішень і розробок в крупнокусковій розробці сировини, прикладом чого можуть слугувати сортувальні комплекси магнітної та електромагнітної сепарації різної потужності у гірничнодобувній промисловості (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Сортувальний комплекс магнітної сепарації [Джерело: <https://idemag.com/de/recycling-und-trennung-von-metallen-in-der-bergbauindustrie/> [56]]

4.3.4. Приклад упровадження КМР на Куржункульському руднику

Технологія крупнокускової магнітної рудорозбірки (КМР), найбільш ефективна при переробці сильномагнітних руд, таких як магнетитові, де магнітна сприйнятливість корисного компонента значно вища, ніж у порожньої породи,

впроваджена на Куржункульському руднику [57] Соколовсько-Сарбайського гірничо-збагачувального виробничого об'єднання у складі Eurasian Resources Group (ERG) в Казахстані (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Росташування Куржункульського руднику [58]

Основні цілі проекту:

- Попереднє збагачення руди.
- Отримання з хвостів збагачення продуктів різного розміру (0-20 і 20-40 мм).



Рис. 4.10. Комплекс крупнокускової магнітної рудорозбірки (КМР)

[Джерело: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQnd4A6R-e8CXyi195jMhRLb7PLCcAt5jgxLA&s> [59]

Позитивний досвід упровадження АТ «ССДПО» технології КМР на Куржункульському руднику в 2008 р. де була запущена ділянка крупнокускової магнітної рудорозбірки для попереднього збагачення руди, дає всі підстави стверджувати її потенційну придатність до умов Кривбасу, враховуючи близькість характеристик тамтешніх руд та криворізьких залізистих кварцитів.

4.3.5. Устаткування і досвід магнітної сепарації фірми Gongyi Forui

Gongyi Forui – машинобудівний завод, заснований в 1986 році [60]. Він є одним з провідних постачальників гірничодобувного та збагачувального обладнання в Азії – може проектувати та виготовляти професійне обладнання для видобутку і переробки більшості різновидів залізних руд, включаючи залізисті кварцити.

Враховуючи останнє, та цінову політику даного виробника гірничого обладнання, ми вважаємо його реально прийнятним для умов України, тому включили в даний аналіз окремим порядком.

При цьому варто відзначити і взяти до уваги успішне рішення проблем розробки покладів магнетиту (рис. 4.11) в умовах Індонезії та набутий досвід адаптації свого обладнання в надзвичайно складних геологічних, гірничотехнічних та організаційних умовах.



Рис. 4.11. Зразки крупнокускового магнетиту з Індонезії [Джерело: <https://dcdn.foruimining.com/wp-content/uploads/2021/05/01-Samples-of-magnetite-from-Indonesia.jpg.webp> [61]



Рис. 4.12. Барабанний магнітний сепаратор Gongyi Forui [https://dcdn.foruimining.com/wp-content/uploads/2021/05/05-Magnetic-separation-equipment-for-chromite.jpg.webp [62]



Рис. 4.13. Експериментально-виробнича ділянка з процесом попередньої крупнокускової магнітної сепарації і лінією наступної магнітної класифікації

магнетитових руд компанії – виробника збагачувального обладнання FORUI MACHINERY [60]

Нижче представлено блок-схему процесу магнітної сепарації, розроблену Forui Machinery (рис. 4.14).

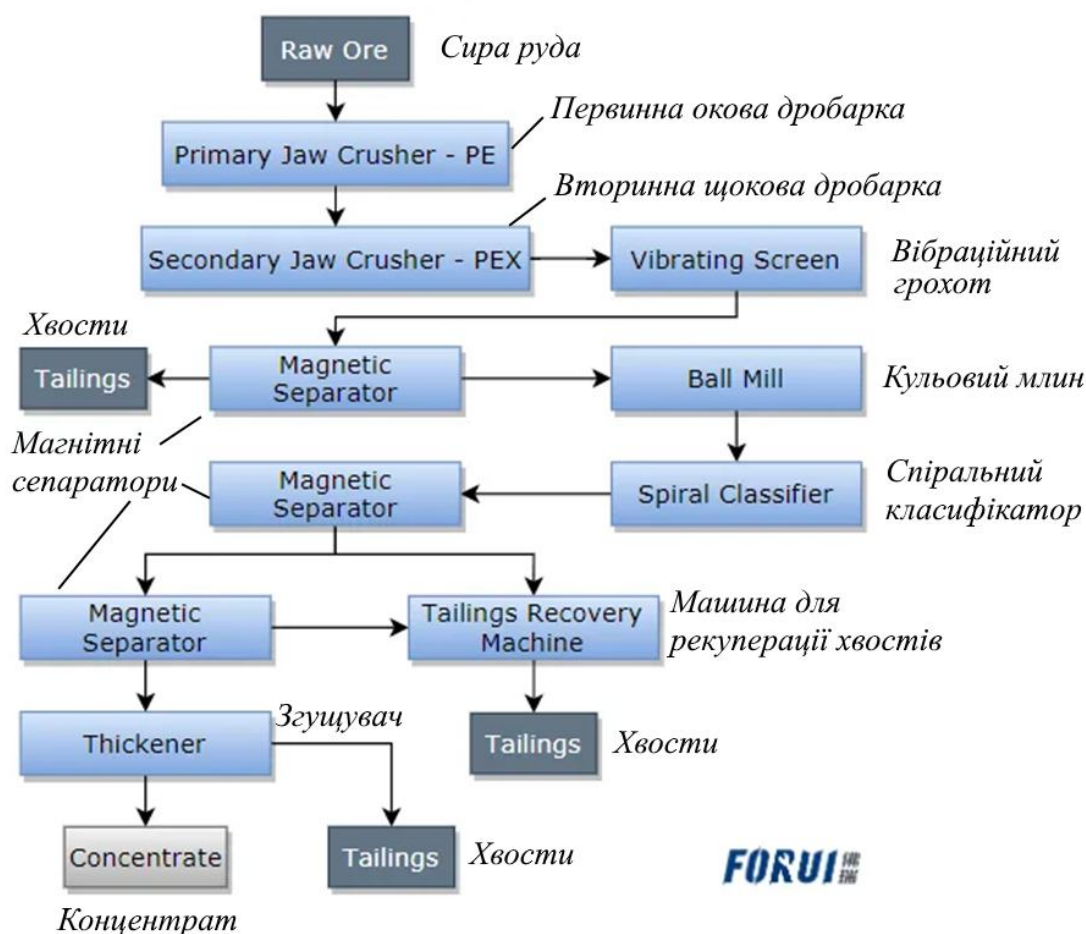


Рис. 4.14. Технологічна схема збагачення магнетиту, розроблена FORUI MACHINERY [60]

Си́ра руда двічі подрібнюється, а потім матеріал відправляється на сортування. У процесі сортування матеріал ділиться на два розміри: +30 мм та -30 мм. Руда розміром більше 30 мм надходить на дрібну дефрагментацію та знову подрібнюється, а руда розміром менше 30 мм надходить у сухий магнітний сепаратор для попереднього відбору.

4.4. Пропозиції щодо вдосконалення крупнокускової магнітної сепарації залізистих кварцитів

Проаналізувавши спільно а) завдання й умови початкового розділення видобутої в кар'єрі рудної маси та б) особливості видобутку руди із застосуванням у ньому мобільних дробарок, грохотів та конвеєрів, а подекуди й класифікаційних сит, ми пропонуємо модифікувати розглянуту вище технологію FORUI MACHINERY шляхом уведення на вході комплексу двоетапної крупнокускової магнітної сепарації конвеєрного рудопотоку, який найбільшою мірою

відповідає умовам кар'єру Полтавського ГЗК України, де накопичено доволі значний досвід реального упровадження й використання напівстаціонарних та пересувних дробарних і дробарно-сортувальних установок, а також – крутопохилих конвеєрів, які найбільшою мірою відповідають вимогам саме крупнокускової магнітної сепарації залізистих кварцитів.

У запропонованій нами схемі (рис. 4.15) сира руда на вході подрібнюється первинною та вторинною щокowymi дробарками.



Рис. 4.15. Пропонована схема внутрішньокар'єрної крупнокускової магнітної сепарації за умов застосування пересувних дробарок та конвеєрів

При цьому, після проходження сирої руди через первинні грохоти, вона подається на крупнокусовий магнітний сепаратор першої черги відбору магнітних кусків залізистих кварцитів, після чого решта руди відправляється на первинну дробарку, за якою – на крупнокусовий магнітний сепаратор другої черги відбору магнітних кусків, а потім – на вторинну дробарку і далі – на сорту-

вання. У процесі сортування матеріал, як і в аналогу, ділиться на два розміри: +30 мм та -30 мм. При цьому потік руди фракцій вище 30 мм, отриманий з відділених магнітними сепараторами першої та другої черги відбору кусків, класифікованої за крупністю та вже передзбагаченої, спрямовується на усереднюючий якість руди комплекс, або – на склад. А основний рудопотік надходить на дрібну дефрагментацію, але вже на збагачувальній фабриці, та знову подрібнюється, а руда розміром менше 30 мм надходить у сухий магнітний сепаратор для попереднього відбору.

За необхідності, даний комплекс можна доповнити магнітним сепаратором третьої черги відбору магнітних кусків, встановленим після вторинної дробарки, доцільність чого має визначатися показниками сумарної ефективності функціонування розглянутого комплексу за різної його комплектації.

Таким чином, основна функція сухого магнітного сепаратора першої черги – попередній відбір крупнокускової, а другої – крупнозернистої руди, що дозволяє відкинути велику кількість порожньої породи та низькосортної руди. Процес попереднього відбору підходить для магнетиту з крупнозернистим і нерівномірним розподілом мінералів заліза в руді та залістим кварцитам. Після цього грубий концентрат із сухого магнітного сепаратора направляють у силос, а під силосом встановлюють електромагнітний віброживильник для рівномірної подачі великого концентрату в шаровий млин для подрібнення руди.

Подрібнений матеріал надходить у процес магнітної сепарації після калібрування класифікатором. Процес магнітної сепарації поділяється на три стадії. Перший етап є процесом чорнової обробки з високою напруженістю магнітного поля, який використовується для вилучення більшої частини мінералів заліза з продуктів подрібнення. Другий етап – процес відбору, основною метою якого є покращення якості. Таким чином, на другій стадії магнітної сепарації можна отримати більшу частину дрібнодисперсного порошку заліза, тоді як хвости все ще містять певну кількість мінералів заліза без дисоціації мономеру.

Отже, хвости, отримані на другому етапі, необхідно знову збагатити, потім знову пройти процес подрібнення і сортування, та повторно запровадити процес магнітної сепарації. Налаштування цього процесу є надзвичайно корисним для покращення якості концентрату та ступеня вилучення заліза всього процесу. Це – необхідний компонент для будь-якої великої установки магнітної сепарації залізної руди. Зрештою, концентрат після магнітної сепарації направляють у згущувач для концентрування або у відстійник для відстоювання з отриманням кінцевого концентрату.

Висновки за розділом 4

Аналіз концентратів магнітного збагачення ГЗКів Кривбасу показує, що розподіл заліза за класами крупності – неоднакове. Найбільш багата залізом – тонкозерниста фракція - 50 +20 мкм, крупні класи представлені зростками з різним співвідношенням рудних і породних мінералів, тонкі фракції концентрату (-20 мкм) розубожені найтонкішими породними зернами.

Для доведення концентратів у НДІ і на діючих фабриках випробувано глибоку дешламацію сильно розведених намагнічених концентратів з наступним

ущільненням піскової частини на сепараторах ПБМ і поверненням немагнітного продукту сепаратора в дешламатор, поділ концентрату по крупності з грохоту доподрібненням і сепарацією виділених крупних класів, флотаційно-магнітна доробка концентратів, а також доведення концентратів у магнітному полі, що обертається.

Глибока дешламація підвищує якість концентрату на 0,5% і більше, доведення концентрату з поділом по крупності в гідроциклонах – на 2-2,7, а флотаційно-магнітне доопрацювання – на 1,4-3%. Схема збагачення магнетитової руди Дніпровського ГЗК із застосуванням тонкого грохочення – класична. При доведенні концентратів з руд Кривбасу й інших родовищ у магнітному полі, що обертається, встановлено можливість отримання магнітних продуктів з вмістом до 70,5-72 % заліза і до 1,5-0,5 % діоксиду кремнію.

Разом з тим, застосування зворотної катіонної флотації для доведення магнетитових концентратів на фабриках "Reserve Mining" та "Empire" дозволило підвищити вміст заліза в концентратах з 64-65 до 67-68% і знизити вміст кремнезему в них з 8-9 до 5-6%.

В розділі проаналізовано найбільш ефективні сучасні технології КМР і КМК, а також відповідне їм обладнання та визначили варті упровадження в умовах залізорудних кар'єрів України.

Стосовно безпосередньо крупнокускової магнітної сепарації залізистих кварцитів Кривбасу, то ми визначили як найбільш відповідну їм за рядом основних показників технологію, розроблену компанією – виробником збагачувального обладнання FORUI MACHINERY, та запропонували часткове її адаптаційне удосконалення на вході рудного потоку: від завантаження живильника – до вторинної щоклової дробарки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Виконані в даній магістерській роботі дослідження свідчать про наступне.

Аналіз збагачувальної світової техніки та технологій показує, що, починаючи з п'ятдесятих років минулого століття донині, жоден метод сепарації не розвивався такими швидкими темпами, як магнітний та комбінований з ним. У цьому напрямі отримано тисячі патентів, а впровадження у промисловість нових магнітних методів є надзвичайно ефективним, як з економічної точки зору, так і з екологічної, підвищуючи вилучення металів та підвищуючи обсяги їх виробництва, комплексне використання сировинної бази, відкриваючи дорогу новим процесам металургії.

До послуг гірничодобувних компаній наразі існують практично необмежені пропозиції та перелік різнотипного обладнання, цілком придатного для високо-якісного розділення дробленої вибухом та дробарками руди шляхом магнітної її сепарації.

Експериментальна суть аналізу можливостей рециклінгової переробки промислових магнітів спрямована головним чином на відновлення неодиму, празеодиму, диспрозію, заліза, нікелю, кобальту та бору зі спечених магнітів.

У цілому, в роботі проаналізовано найбільш ефективні сучасні технології магнітної сепарації руд, перспективні з точки зору можливостей промислового їх трансферу, спрямованого на впровадження в кар'єрах гірничозбагачувальних комбінатів України, а також – відповідного їм обладнання, з визначенням найбільш доцільних, з урахуванням поставлених в роботі задач, та шляхів необхідної технологічної адаптації.

Що стосується безпосередньо крупнокускової магнітної сепарації залізистих кварцитів Кривбасу, то рекомендується в якості прототипу використати технологію, розроблену компанією – виробником збагачувального обладнання FORUI MACHINERY, багаторічний досвід роботи якої в схожих з українськими умовами виявив сталу та надійну ефективність. При цьому ми запропонували часткове адаптаційне удосконалення даної технології на вході рудного потоку: від завантаження живильника – до вторинної щоклової дробарки.

Бібліографія.

1. Бизов В.Ф., Дриженко А.Ю. Відкриті гірничі роботи. Т. XIII «Виробничі процеси»: підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Гірництво». - Кривий Ріг: Мінерал. 2004. - 341 с.
2. Бизов В.Ф. Про специфіку сучасного стану та перспективи комплексного освоєння залізрудних родовищ [Текст] / В.Ф. Бизов, С.О. Жуков, В.П. Цвілий // Розробка рудних родовищ: наук.-техн. зб. / М-во освіти України. - Кривий Ріг, 1997. - Вип. 61. - С. 15-19.
3. Пригунов О.С. Технологічні основи відкритої розробки підірваних скельних порід комплексами машин безперервної дії: дисерт. докт. наук. ДГУ, 1999. Режим доступу: <https://uacademic.info/ua/document/0599U000398#>!
4. Бакка М.Т., Гуменик І.Л., Редчиць В.С. Екологія гірничого виробництва: Навчальний посібник. – Житомир: ЖДТУ, 2004. – 307 с.
5. множина машинобудівних фірм постачальників гірничого обладнання (напри-клад, GME Magnets [5])
6. Григор'єв Ю.І. Підвищення ефективності проектних рішень щодо пошуку оптимального режиму гірничих робіт при сумісному комплексному відпрацюванні техногенних і геогенних родовищ / Ю.І. Григор'єв // Якість мінеральної сировини : зб. наук. пр. – Кривий Ріг, 2014. – С. 529–536
7. Григор'єв Ю.І. Розробка технології формування і відпрацювання техногенного родовища сухої сировини / Ю.І. Григор'єв // Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК : міжнар. наук.-техн. конф., 19 черв. 2015 р. : тези доп. – Кривий Ріг, 2015, – С. 74–75.
8. Магнетитові руди гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу https://studbooks.net/2571814/tovarovvedenie/magnetitovye_rudy#google_vignette
9. Кармазин В.В. Проблеми і перспективи магнітного збагачення // ГИ-АБ. 2013. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-magnitnogo-obogascheniya> (дата звернення: 11.11.2025).
10. Barry A. Wills, James A. Finch. Mineral Processing Technology (Eighth Edition), 2016. ISBN 978-0-08-097053-0. DOI <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65478-2>. Copyright © 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/intensity-magnetic-separation>
11. Ing. Michal Novotný, Ph.D. https://www.fzu.cz/en/people/ing-michal-novotny-phd/publications?f%5B0%5D=publication_year%3A2003&f%5B1%5D=publication_year%3A2007&f%5B2%5D=publication_year%3A2014&f%5B3%5D=publication_year%3A2018
12. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1080/1478647031000101223>
13. <https://asiafoodjournal.com/?s=Courtesy+Eriez>
14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687591900687>
15. https://www.valmet.com/globalassets/investors/reports--presentations/neles-archive/2014/english/metso_2014_q2_interim_review.pdf
16. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03403039>
17. Svoboda Jan. Magnetic methods for treatment of minerals. - Elsevier, 2007.
18. https://www.google.com/search?q=s%3A%9eparation+magn%3A%9tiqu_e+grossi%3A%8re&sca_esv=e81afafc0933ec03&biw=1280&bih=559&ei=zwT7a

Nn1DNKJ7NYP1Mm_mQI&ved=0ahUKEwiZmYvxg7yQAxXSBNsEHdTkLyMQ4dUDCBE&oq=s%C3%A9paration+magn%C3%A9tique+grossi%C3%A8re&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiInPDqXBhcmF0aW9uIG1hZ27DqXRpcXVIIgdyb3NzacOocmUyBRAhGKABSLJHUABYAHAaeAGQAQCYAbQBoAG0AaoBAzAuMbgBDMgBAPgBAvgBAZgCAaACzQGYAwCSBwMyLTGgB98BsgcDMi0xuAfnAcIH AzMtMcgHCg&sclient=gws-wiz-serp

19. <https://fr.gme-magnet.com/info/magnetic-separation-in-mineral-processing-17105077363631104.html>

20. J.H.P. Watson, P.A. Beharrell (2006). Extracting values from mine dumps and tailings. December 2006 / Minerals Engineering 19(15):1580-1587. DOI:10.1016/j.mineng.2006.08.014.

21. Chen B, Gilbert LA, Cimini BA, Schnitzbauer J, Zhang W, Li GW, Park J, Blackburn EH, Weissman JS, Qi LS, Huang B. Dynamic imaging of genomic loci in living human cells by an optimized CRISPR/Cas system. Cell. 2013 Dec 19;155(7):1479-91. doi: 10.1016/j.cell.2013.12.001. Erratum in: Cell. 2014 Jan 16;156(1-2):373. PMID: 24360272; PMCID: PMC3918502.

22. <https://fr.greatmagtech.com/info/magnetic-separation-in-mineral-processing-87078425.html>

23. <https://ejetmagnet.com/products/c-type-permanent-suspended-magnets/>

24. johnson@ejetmagnet.com

25. HTЦ TOB Магнiс ЛТД. <https://uglex.com/company/7598-magnis-ltd-ntc-ooo.html>

26. Intensity magnetic separation. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/intensity-magnetic-separation>

27. Dahe Xiong, Shuyi Liu, Jin Chen. New technology of pulsating high gradient magnetic separation. // International Journal of Mineral Processing. Publisher: Elsevier, 1998.

28. Yong Zeng, 2003. "A Partially Observed Model for Micromovement of Asset Prices with Bayes Estimation via Filtering," Mathematical Finance, Wiley Blackwell, vol. 13(3), pages 411-444, July.

29. https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1876725/AC130210_6_7n01vt.pdf

30. M. Humphries: "Rare Earth Elements: The Global Supply Chain," p. 31, 2013.

31. H. Kara et al.: Lanthanide Resources and Alternatives. Oakdene Hollins Research & Consulting, 2010.

32. D. Schüler et al.: Study on Rare Earths and Their Recycling - Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament. Öko-Institut e.V., vol. 49, 30-40, 2011.

33. J. W. Lyman und G. R. Palmer: Recycling of Rare Earths and Iron from NdFeB Magnet Scrap. High Temp. Mater. Process., vol. 11, no. 1-4, 1993.

34. S. Constantinides: Rare Earth Materials. Arnold Magnetic Technologies Corp, 2010.

35. O. Gutfleisch et al.: Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. Adv. Mater., vol. 23, no. 7, 821-42, 2011.

36. Y. Tanaka, Q. Zhang und F. Saito: Sonochemical Recovery of Metals from Recording Media. J. Chem. Eng. JAPAN, vol. 35, no. 2, 173–177, 2002.
37. I. Rampin, F. Bisaglia und M. Dabalà: Corrosion Properties of NdFeB Magnets Coated by a Ni/Cu/Ni Layer in Chloride and Sulfide Environments. J. Mater. Eng. Perform., vol. 19, no. 7, 970–975, 2009.
38. J. M. D. Coey: Permanent magnets: Plugging the gap. Scr. Mater., vol. 67, no. 6, 524–529, 2012.
39. W. T. Benecki: The Permanent Magnet Market - 2015. Magnetic Conference, Orlando, Florida, 2013.
40. P. Stuhlpfarrer: Recycling von Elektronikschrott unter besonderer Berücksichtigung des Sondermetalle und Seltenen Erden. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2015.
41. P. Stuhlpfarrer, S. Luidold und H. Antrekowitsch: Recycling of Nd₂Fe₁₄B-magnets. In Proc. of the European Metallurgical Conference, 2015.
42. Бабій К.В. Геомеханічні основи технології передзбагачення руди в глибоких залізородних кар'єрах: Дис. докт. техн. наук. – Дніпро: Інститут геотехнічної механіки ім. М. Полякова НАН України, 2019. - 407 с.
43. Бабій К.В. Технологія передзбагачення залізних руд в глибоких кар'єрах / К.: Наукова думка, 2011. - 184 с.
44. Бубнова О.О., Бабій К.В., Левченко К.С. Удосконалення технології розробки техногенних родовищ // Геотехнічна механіка. Міжвід. зб. наук. праць. - Дніпро: 2016. - Вип. 130. - С. 137-143.
45. Бабій К.В. Теоретичні основи технології передзбагачення руди в глибоких залізородних кар'єрах // Металургійна і гірничорудна промисловість. 2018. № 1. - С. 45-50.
46. Бабій К.В. Визначення основних параметрів технології передзбагачення руди в кар'єрах та їх вплив на роботу гірничо-збагачувального комплексу // Вісник Кременчуцького національного університету ім.і М. Остроградського, 2018. – Вип. 1/2018 (108). - С 87-94.
47. Бабій К.В., Кратковський І.Л., Іщенко К. С., Коновал Н. Інноваційний ресурс – економія від вибухового руйнування складно-структурних залізистих кварцитів // Традиції та інновації ресурсозберігаючих технологій у видобутку корисних копалин і переробці. Петрошані, Румунія, 2019. - С.44-62. <http://lib.ktu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/10/Monograph-6.pdf>
48. Рудицький А.В., Левченко К.А., Богданов В.М., Дементьєв В.В. Технологія сухого магнітного збагачення окислених мідних руд // Збагачення корисних копалин, 2014. - Вип. 58(99) - 59(100), 2014.
49. Науково-виробнича фірма "Магнітні та гідравлічні технології" <https://opendatabot.ua/c/13472249>
50. <https://qskz.kz/news/proekt-podryadnogo-drobleniya-v-kazahstane/>
51. <https://qskz.kz/>
52. <https://rusmine.com/products/complexes-mining-magnis-kmp/>
53. <https://www.largestcompanies.com/company/Norditek-AB-135869>
54. Norditek. <https://www.ragnsells.com/about-us/press-media/articles/norditek/>
55. <https://norditek.se/de/energieruckgewinnung/>

56. Idemag. <https://idemag.com/de/recycling-und-trennung-von-metallen-in-der-bergbauindustrie/>
57. Внедрение крупнокусковой магнитной рудоразборки на Куржункульском руднике. https://rudmet.net/media/articles/Article_MJ_06_14_pp.43-44_1.pdf
58. Куржункуль.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b3/Relief_Map_of_Kazakhstan.png/960px-Relief_Map_of_Kazakhstan.png
59. КМР. <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQnd4A6Re8CXyi195jMhRLb7PLCcAt5jgxLA&s>
60. Magnetite Beneficiation Process, Magnetite Beneficiation Method. <https://www.foruimining.com/solutions/magnetite-beneficiation-process-magnetite-beneficiation-method/?srsltid=AfmBOooVXIYqF8bwggU1AaOyLnBAZvASw1FU9LvJvE0q1jWZwCOffenA>
61. <https://dcdn.foruimining.com/wp-content/uploads/2021/05/01-Samples-of-magnetite-from-Indonesia.jpg.webp>
62. <https://dcdn.foruimining.com/wp-content/uploads/2021/05/05-Magnetic-separation-equipment-for-chromite.jpg.webp>