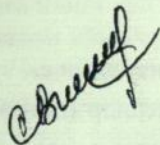


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ



На правах рукопису

СИДОРЕНКО Володимир Дмитрович

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС
НА ОСНОВІ НАДПРОВІДНИКОВИХ МАГНІТНИХ СИСТЕМ
ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ
СЛАБКОМАГНІТНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ

Спеціальності: 05.09.03-Електротехнічні комплекси та системи,
включаючи їх управління та регулювання
05.15.08-Збагачення корисних копалин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1996

АВ 35.512

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Науково-дослідному та проектному інституті по збагаченню та агломерації руд чорних металів, м. Кривий Ріг
МЕХАНОБРЧОРМЕТ

Міністерство промисловості України

Науковий керівник: доктор технічних наук, с.н.с.
Новосельцев Олександр Вікторович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
Щерба Анатолій Андрійович

доктор технічних наук, професор
Туркенич Олександр Михайлович

Провідна установа: Виробниче об'єднання "Кривбасруда"
Міністерства промисловості України,
м. Кривий Ріг

Захист відбудеться 10 жовтня 1996 р. о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 01.59.02 при Інституті проблем енергозбереження НАН України (252070, м. Київ-70, вул. Покровська, 11).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем енергозбереження НАН України.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00759972 (\$)

Автореферат розіслано "...."

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Мельничук Л.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми та ступінь дослідження тематики дисертації.

Однією із головних умов підвищення ефективності функціонування гірничо-металургійного комплексу є перехід до ресурсозберігаючих технологій та виробництва конкурентоспроможної продукції. Пріоритетним напрямком у реалізації цієї задачі є підготовка високоякісної металургійної сировини шляхом збагачення руд. Одним із найбільш поширених методів збагачення є магнітні методи сепарації, які ґрунтуються на використанні різниці у магнітних властивостях мінеральних різновидів сировини. У теперішній час магнітна сепарація з індукціями магнітних полів до 0,4 Тл широко застосовується для переробки сильномагнітних руд та матеріалів з питомою магнітною сприйнятливістю $\chi \geq 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$. Разом з тим, більша частина природної сировини представлена слабкомагнітними мінеральними сполученнями парамагнітних та діамагнітних мінералів з питомою магнітною сприйнятливістю $\chi = 1-300 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Для одержання із такої сировини високоякісних конкурентоспроможних матеріалів необхідні магнітні поля з індукцією більшою від 2 Тл та градієнтами 15-20 Тл/м при сухій та 500-1000 Тл/м при мокрій сепарації. Зі створенням в 60-ті роки високоградієнтних магнітних сепараторів (ВГМС) питання вилучення слабкомагнітних компонентів частково вирішене, але наявність в об'ємі сепарації феромагнітних матриць дає можливість переробляти тільки мілкоподрібнену (0,020 - 0,074мм) сировину. Об'ємно-градієнтні магнітні сепаратори (ОГМС), у яких в об'ємі сепарації відсутні феромагнітні матриці, в основному використовуються для переробки дрібнозернистих руд (3-0 мм). В сепараторах обох типів неможливе створення необхідних для сепарації слабкомагнітних руд параметрів магнітних полів у зв'язку з використанням резистивних магнітних систем, які мають обмежені (до 2 Тл) інтенсивності магнітних полів з причини магнітного насичення залізних сердечників та великих омичних втрат у обмотках котушки. В зв'язку з цим, сепаратори, які використовуються у промисловості України, мають високі питомі енерговитрати - більше 2 кВт·г/т готової продукції - і не забезпечують ефективного розділення слабкомагнітних матеріалів крупністю менше 0,02 мм та більше 3,0 мм.

Вирішення такої електротехнічної проблеми стало можливим завдяки розробці електротехнічних комплексів (ЕТК) з використанням магнітних систем на базі надпровідників (НП), які є основою для створення високих інтенсивностей та градієнтів магнітних полів. Надпровідники здатні пропускати струм дуже високої щільності без теплових втрат (150-170 А/мм² у порівнянні з 5-7 А/мм² у мідній котушці). В зв'язку з цим, дослідження та розробки, які направлені на створення ЕТК на основі надпровідникових

магнітних систем (НМС), що забезпечують підвищення енергетичної ефективності сепарації та високу селективність розділення слабкомагнітної мінеральної сировини, є актуальними для народного господарства України.

Наукові дослідження виконувались у відповідності із пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки ДКНТ СРСР - проєкт 6.2.5.1 "Розробка та виготовлення високопродуктивного сепаратора із криозабезпеченням", програмою пріоритетного розвитку науки та техніки ДКНТПП України "Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології" - проєкти: 05.53.08/134-92 "Розробка та виготовлення експериментального сепаратора із криогенним забезпеченням для сухого збагачення слабкомагнітних руд", 05.53.08/135-92 "Розробка та виготовлення експериментального високоградієнтного сепаратора на базі надпровідників для мокрого збагачення слабкомагнітних руд та нерудних матеріалів", 05.53.07/052-93 - "Розробка та створення надпровідникових магнітних аналізаторів для сепарації слабкомагнітної мінеральної сировини", розділом програми 4.14.06 "Технології та обладнання для переробки слабкомагнітної мінеральної сировини з використанням надпровідників", та міжгалузевою програмою "Новітні енергозберігаючі технології та обладнання магнітного збагачення", науковим керівником яких є автор.

Мета роботи і основні завдання наукового дослідження. Метою даної роботи є розробка та створення нових енергозберігаючих електротехнічних комплексів із надпровідниковими магнітними системами і систем забезпечення їх надпровідникового стану, а також оптимізація основних електротехнічних та технологічних параметрів ЕТК для підвищення селективності та енергетичної ефективності сепарації слабкомагнітної мінеральної сировини та матеріалів.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

-розроблені методи розрахунку та принципи створення ЕТК на основі НМС для сепарації слабкомагнітної мінеральної сировини, здійснена оптимізація параметрів магнітного поля (магнітної індукції та градієнту) у об'ємі розділення часток з урахуванням розмірів теплового захисту криостату;

-розроблені та створені фізична модель ЕТК на основі НМС, системи захисту та управління, які забезпечують можливість ідентифікації параметрів промислових зразків;

-визначені основні закономірності сухої та мокрої магнітної сепарації, встановлені кореляційні зв'язки між силовими характеристиками магнітного поля та технологічними параметрами НП сепараторів;

-розроблені технології сухої та мокрої магнітної сепарації слабкомагнітної мінеральної сировини, методики розрахунку та оптимізації основних енергетичних та технологічних параметрів ЕТК.

Наукова новизна дослідження:

-вперше встановлені кореляційні зв'язки між основними силовими характеристиками магнітного поля та технологічними параметрами НП сепараторів і визначені основні електротехнічні та технологічні особливості ЕТК на основі НМС для сухої та мокрої магнітної сепарації слабкомагнітної мінеральної сировини;

-визначені (в області сильних магнітних полів) регресійні математичні залежності показників розділення гематитових руд та нерудних слабкомагнітних матеріалів від параметрів магнітного поля (B , $grad B$) та магнітних властивостей мінералів (χ);

-розроблені методики розрахунку та оптимізації параметрів магнітного поля у об'ємі розділення при обмеженні теплових притоків до гелієвого об'єму криостату;

-створена фізична модель електротехнічного комплексу з НМС, системами електротехнічного та криогенного забезпечення для дослідження і визначення електро-технологічних параметрів ЕТК, які використовують сильні магнітні поля;

-з використанням ЕТК на основі НМС розроблені технології сухого магнітного збагачення гематитових руд крупністю 50-0 мм, які забезпечують абсолютний приріст масової частки заліза від 8% до 12%.

Теоретична та практична цінність дослідження. Встановлені основні конструктивні та технологічні параметри НП сепараторів, які створюють можливість конструювання та проектування ЕТК з більш високими у порівнянні з сучасними техніко-економічними показниками сепарації слабкомагнітної сировини. При цьому забезпечується: приріст на 8-12% масової частки заліза у агломераційних рудах, підвищення до 85-87% вилучення заліза у концентрат при зниженні у 20 разів питомих енерговитрат та збільшенні у 2-3 рази продуктивності сепаратора, зниження вмісту слабкомагнітних домішок у каолінах з 0,74% до 0,04%, польових шпатах з 0,9% до 0,15%, склопісках з 0,039% до 0,01%. Розроблена та досліджена фізична модель системи криогенного забезпечення ЕТК з вузлом стикування криостату НМС з криогенною гелієвою установкою, які при промисловому використанні забезпечують зменшення на 30% енерговитрат на охолодження НМС. Розроблена та випробувана електро-технологічна модель рейстрекової НП обмотки для барабанного сепаратора, яка є аналогом обмотки НМС промислового ЕТК і забезпечує ідентифікацію параметрів магнітного поля. Розроблені робочі проекти НП промислових сепараторів, технології сухої сепарації кускової слабкомагнітної сировини, які забезпечують підвищення якості залізорудної продукції, та технології одержання високочистих продуктів: каолінів, польових шпатів, кварцевих

пісків та ін.

Рівень реалізації наукових розробок. Технічні рішення, які одержані з використанням розроблених методик розрахунку НМС і складових елементів ЕТК та регресивних досліджень, взяті за основу у проєктах впровадження промислових ЕТК на шахті ім. Леніна ВО "Кривбасруда" та на Бакальському РУ (Росія) для сухого збагачення гематитових та сидеритових крупнозернистих руд, розробці проєкту ЕТК продуктивністю 1,0 т/г для мокрої сепарації тонкоподрібнених слабкомагнітних матеріалів, створенні моделі ЕТК у складі експериментального НП сепаратора, системи криогенного забезпечення із зріджувальною гелієвою установкою, систем вакуумного забезпечення, електроживлення, захисту та управління, а також сепараційних пристроїв для проведення технологічних досліджень.

Апробація результатів наукових досліджень. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на XIII та XIV міжнародних конференціях по магнітним технологіям MT-13, MT-14 (Бостон, 1994; Тампере, 1995), міждержавній конференції країн СНД "Сучасний стан техніки та технології магнітного збагачення руд і матеріалів" (Кривий Ріг, 1994), Першому міжнародному симпозиумі "Проблеми комплексного використання руд" (С.-Петербург, 1995), на Дні гірника у Московському гірничому інституті (Москва, 1995).

Публікація результатів наукових досліджень. За результатами роботи опубліковано 5 статей, одержано 2 авторських свідоцтва та патент України.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, 5 глав, висновків, списку літератури та додатків. Робота викладена на 125 сторінках машинописного тексту, включаючи 25 рисунків та 15 таблиць, 5 додатків на 56 сторінках, списку літератури із 124 найменувань.

Конкретний особистий внесок дисертанта у розробку наукових результатів, що виносяться на захист, полягає :

-у розробці фізичної моделі ЕТК на основі НМС з системами електротехнічного та криогенно-вакуумного забезпечення для технологій сухої та мокрої магнітної сепарації слабкомагнітної сировини у магнітних полях до 7,5 Тл;

-у розробці принципів побудування ЕТК на основі НМС для сухої та мокрої магнітної сепарації слабкомагнітної сировини, включаючи методики розрахунку конструктивних та електротехнічних параметрів;

-у розробці регресійних математичних моделей для визначення залежності показників розділення гематитових руд та нерудних слабкомагнітних матеріалів від параметрів магнітного поля (B , $gradB$) та питомої магнітної сприйнятливості (χ) мінералів;

-у розробці методик дослідження параметричних залежностей, визначення та оптимізації параметрів магнітного поля в об'ємі розділення надпровідникового ЕТК при обмеженні розмірів теплового захисту кріостату;

-у розробці електротехнологічної моделі рейстрекової обмотки НМС зануреного типу для барабанного пристрою сепарації та пристрою стикування НМС із кріогенною гелієвою установкою для підвищення ефективності кріостатування НМС [6];

-у розробці технології сухої магнітної сепарації, а також конструкції ЕТК на основі НМС для конкретних технологічних задач та проектів їх впровадження на гірничорудних підприємствах [8].

Предмет та об'єкт дослідження. В дисертації досліджується використання явища надпровідності із урахуванням множинних кореляційних зв'язків між технологічними параметрами сепарації та силовими характеристиками магнітних полів для розробки малоенергоємних технологій збагачення слабкомагнітних руд та матеріалів.

Методи досліджень базуються на використанні основних положень теорій електромагнітного поля та магнітної сепарації; елементів теорії та методів пасивного і активного експериментів; критеріїв подібності теорії моделювання; методів математичної статистики; елементів теорії надпровідності та кріогеніки. Достовірність основних наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджена шляхом зіставлення з експериментальними даними, одержаними у лабораторних та напівпромислових умовах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність і ступінь досліджень теми дисертації, сформульовано мету і основні завдання, відображено наукову новизну, практичну цінність та рівень впровадження наукових досліджень, структуру роботи і конкретний особистий внесок автора у розробку.

Перший розділ присвячений огляду сучасного стану питань створення НМС. Виконаний аналіз відомих конструкцій сепараторів із НП магнітними системами. Дана оцінка основних конструктивних, технологічних та техніко-економічних показників НП сепараторів різних типів, відмічено, що розробники НП магнітних сепараторів, в більшості, роглядають конструктивні параметри без урахування їх залежності від характеристик сировини, яка розділяється [1]. Визначені основні задачі дослідження магнітних сепараторів: вивчення конструкцій, включаючи основні принципи створення умов розділення з застосуванням кріогенної техніки, вивчення конструкцій НП магнітів, забезпечуючих створення магнітних сил, які діють у великих об'ємах сепарації, вивчення можливостей та

надійності використання НП магнітних систем із криогенним забезпеченням в умовах підприємств гірничорудної та інших галузей.

У другому розділі з'ясовані теоретичні та експериментальні питання підвищення ефективності сепарації слабкомагнітної мінеральної сировини. На основі експериментальних даних та розрахунків обґрунтовані основні конструктивні та технологічні параметри ЕТК на основі НМС для сухої магнітної сепарації гематитових та сидеритових руд та мокрої магнітної сепарації каолінів, польових шпатів та кварцевих пісків з метою їх очищення від слабкомагнітних домішок [2,3].

Як відомо, питома електромагнітна сила \bar{f} , яка діє на парамагнітну частку з питомою магнітною сприйнятливістю χ , визначається слідуючим виразом:

$$\bar{f} = \frac{\chi}{\mu_0} (\bar{B} \cdot \text{grad}) \cdot \bar{B}, \quad (1)$$

де: $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна постійна, \bar{B} - магнітна індукція поля, Тл.

Відповідно виразу (1), на кожен парамагнітну частку, яка знаходиться у магнітному полі, діє сила, величина якої визначається природними магнітними властивостями частки - питомою магнітною сприйнятливістю χ та силовими характеристиками магнітного поля - індукцією B та градієнтом магнітного поля. Отже, процес розділення слід розглядати як процес взаємодії елементів системи сепарації: вихідної сировини, середовища розділення та сепаруючого пристрою.

З метою обґрунтування електротехнічних параметрів ЕТК проведені

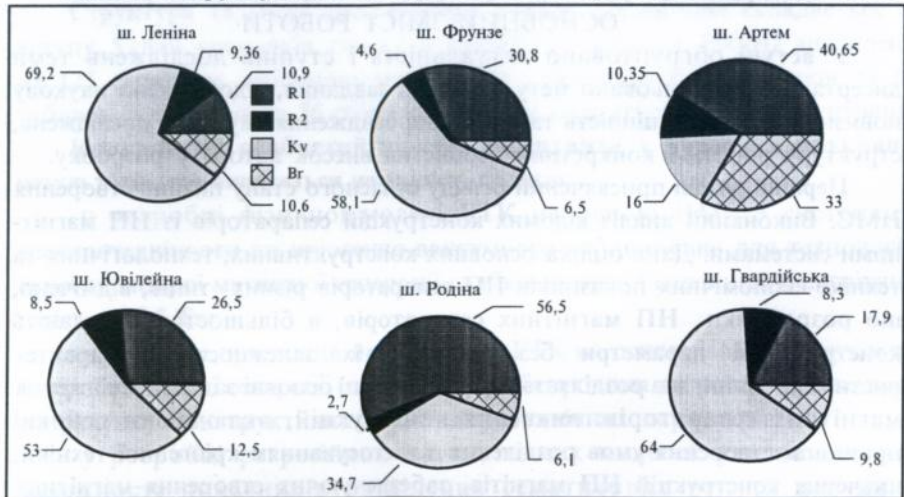


Рис.1. Діаграми розподілення груп мінеральних різновидів: R1 - руда підземного видобутку багата ($Fe_2 > 55\%$); R2- руда підземного видобутку бідна ($Fe_2 = 46-55\%$); Kv - залізни кварцити ($Fe_2 < 45\%$); Br - безрудні різновиди ($Fe_2 < 25\%$).

математико-статистичні дослідження мінерального та хімічного складу товарних руд шести шахт північної групи рудників Кривбасу (рис.1) [4,5].

Встановлені регресійні математичні моделі фізико-хімічних властивостей залізних руд та їх впливу на процеси збагачення:

-залежності масової частки заліза загального Fe_3 у шахтних рудах Кривбасу від вмісту основних мінеральних різновидів: гематиту Fe_2O_3 , кремнезему SiO_2 та оксиду заліза FeO , яка, наприклад, для руд шахти ім.Леніна має вигляд (коефіцієнт множинної кореляції 0,9979):

$$Fe_3 = 19,76 + 0,49Fe_2O_3 - 0,17SiO_2 + 0,26FeO; \quad (4)$$

-залежності масової частки заліза загального α у товарній руді від вмісту груп різновидів мінералів γ_i та розподілення в них заліза ε_i (коефіцієнти множинної кореляції 0,9857 и 0,9987 відповідно):

$$\alpha = 83,94 + 11,47\sqrt{\gamma_{Br}} \left(1 - 0,09 \frac{\sqrt{\gamma_{R1}}}{\sqrt{\gamma_{Br}}} \right) - 180,19 \frac{1}{\sqrt{\gamma_{Kv}}} \times \left(1 + 0,078\sqrt{\gamma_{R2} \cdot \gamma_{Kv}} \right), \quad (5)$$

$$\alpha = 62,16 + 1,37 \left(\sqrt{\varepsilon_{R1}} - 2,08\sqrt{\varepsilon_{Br}} \right) - 22,56 \times \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{Kv}} - 0,54\sqrt{\varepsilon_{R2}}}{\sqrt{\varepsilon_{R2} \cdot \varepsilon_{Kv}}} \right); \quad (6)$$

$$d = 48,02 - 0,27R_2 - 0,31K_v - 1,06B_r; \quad (7)$$

-залежності вилучення заліза у концентрат ε_k від магнітної індукції B та крупності вихідного матеріалу d агломераційних та кускових залізних руд з коефіцієнтами детермінації 0,9752 та 0,9295 відповідно:

$$\varepsilon_k = 175,7 + 10,7B - 1,2d - 1,3 \cdot 10^8 \chi - \frac{0,06}{\sqrt{\chi}} + \frac{9,8}{\sqrt{(d \cdot \chi)^3}} + \frac{2,82}{\sqrt{(B \cdot d \cdot \chi)^5}}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_k = -8,7 + 33,44B - 2,24d. \quad (9)$$

На основі одержаних залежностей зроблені наступні висновки:

-масова частка заліза Fe_3 у товарній сировині визначається співвідношенням Fe_2O_3 та SiO_2 , які являють собою відповідно парамагнітний мінерал з $\chi = 50 \cdot 76 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ та діамагнітний мінерал з $\chi = 0,57 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, при середніх вмістах Fe_2O_3 76,9% та SiO_2 20,3% (4);

-співвідношення різновидів груп мінералів визначає оптимальну крупність руд d для збагачення, магнітні властивості класів та вміст заліза у товарній руді (5,6,7);

-максимальне вилучення заліза із конкретного типу руди визначається оптимальними значеннями магнітної індукції та крупності часток (8,9).

Встановлені основні параметри створюємих ЕТК: оптимальна індукція магнітного поля в об'ємі розділення для залізних руд крупністю від 3 до 50 мм при вилученні заліза 85% визначається значеннями 3,0-4,5Тл; оптимальна глибина робочої зони розділення, яка необхідна для сепарації кускових залізних руд, складає $3d$, що становить 45 мм.

У третьому розділі вирішені питання розробки ЕТК на основі НМС. Розроблені: концепція створення надпровідникових промислових ЕТК, два електротехнічних комплекси на основі НМС - з пристроєм об'ємно-градієнтної магнітної сепарації (ОГМС) барабанного типу [6], з пристроєм високоградієнтної магнітної сепарації (ВГМС) дискового типу [7], стенд випробувань (модель ЕТК) з надпровідниковою НМС для дослідження процесів сухої та мокрої магнітної сепарації мінеральної сировини в магнітних полях з індукцією до 7,5 Тл.

Концепція створення НП промислових установок для сепарації слабкомагнітних матеріалів полягає у розробці ЕТК, які конструктивно та технологічно поєднують вузли: надпровідниковий магніт, систему живлення та управління, кріогенно-вакуумну систему та пристрій для сепарації.

Розроблені методики розрахунку НМС електротехнічних комплексів для мокрої та сухої магнітної сепарації з барабанним та дисковим сепаруючими пристроями.

Розрахунок та оптимізація НМС комплексу з барабанним сепаруючим пристроєм виконані виходячи із вимог до параметрів поля у робочому об'ємі сепарації $B_{grad} B \geq 120 \text{ Тл}^2/\text{м}$ при обмеженнях: нерівномірність поля $(B_{max} - B_{min}) / B_{max} \leq 20\%$, максимальна конструкційна щільність струму $j=148 \text{ А/мм}^2$, індукція магнітного поля на обмотці із вибраного ніобій-титанового надпровідника не більше 7 Тл, ширина котушки поздовж осі барабана 300 мм, форма представлення струму та поля - гармонійна поздовж осі барабана (вісь Z). Здійснена оптимізація: по розташуванню котушок відносно осі обертання барабана (поперечне та поздовжнє), по їх числу, формі та розмірам перерізу, взаємному розташуванню. На основі розрахунків прийнята НМС з поперечним розміщенням рейстреків, яка забезпечує у об'ємі сепарації більше (у 1,3 рази) значення магнітної сили при рівних значеннях індукції на котушках.

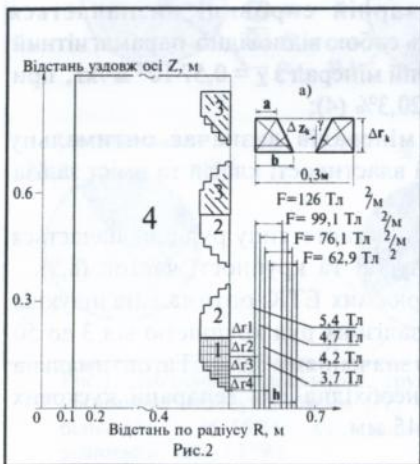


Рис.2

Вихідна схема та результати оптимізації показані на рис.2. З метою приближення максимальних значень магнітного поля до об'єму сепарації вибрана трапецієподібна форма перерізу котушок та визначені оптимальні розміри: радіальна ширина котушки Δr_k та кут нахилу бокової поверхні γ , одержані числові значення для НМС барабанного сепаратора.

Відношення індукцій магнітних полів на поверхнях внутрішнього (R_1) та зовнішнього (R_2) радіусів робочого об'єму складає $B(R_1)/B(R_2) \approx 2$.

Визначене сумарне значення індуктивності L , яке складає 5,8 Гн. Найбільше значення B в зоні розділення на відстані від струмової поверхні $\Delta r_s = 30, 40$ та 50 мм, та відповідні значення магнітної сили F , при глибині робочого об'єму $h = 60$ мм показані на рис.2.

На підставі розрахунків магнітного поля вибраний обмоточний дріт в вигляді скрутки із 8 ніобій-титанових дрітів МНТ-50-0,42-8630 діаметром $0,85$ мм, здатний у магнітному полі до 7 Тл нести транспортний струм 1000А . Після прокатки площа поперечного перерізу дроту складає $5,6$ мм².

Розрахунок НМС електротехнічного комплексу для мокрої магнітної сепарації виконаний з використанням векторного магнітного потенціалу A при індукції магнітного поля в об'ємі сепарації $B \geq 3,5$ Тл. Для розрахунків прийняті наступні допущення: обмотка складається із фрагментів, вісь кожного з котрих є примітивом, а поперечний переріз являє собою прямокутник з розмірами a та b , однаковими для усіх фрагментів. Для зображення геометричної моделі конфігурації системи використовуються дві системи координат: глобальна OXY - для зображення усієї системи в цілому та локальна oxy - для зображення примітивів. Для визначення силових характеристик магнітного поля у робочому об'ємі розділення вибрані два розрахункових характерних перерізи: у площині симетрії та у площині внутрішнього краю обмотки. Параметрами, які характеризують обмотку в цілому, є число витків ϖ та сила струму I .

Компоненти вектора індукції визначені послідовним скануванням для кожного із фрагментів (прямокутника чи сегмента):

$$B_x = 0; \quad B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z}; \quad B_z = \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (10)$$

Векторний магнітний потенціал A для фрагментів визначається рівнянням:

$$A_x = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} dx \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \ln \frac{b/2 - z_0 + \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (b/2 - z_0)^2 \right]^{1/2}}{-b/2 - z_0 + \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (b/2 + z_0)^2 \right]^{1/2}} dy. \quad (11)$$

Використовуючи зображення векторного потенціалу (11), компонента індукції магнітного поля B_y визначається:

$$B_y = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \left\{ \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \left[\ln \frac{a/2 - y_0 + \left[(x - x_0)^2 + (a/2 - y_0)^2 + (b/2 + z_0)^2 \right]^{1/2}}{-a/2 - y_0 + \left[(x - x_0)^2 + (a/2 + y_0)^2 + (b/2 + z_0)^2 \right]^{1/2}} + \ln \frac{-a/2 - y_0 + \left[(x - x_0)^2 + (a/2 + y_0)^2 + (b/2 - z_0)^2 \right]^{1/2}}{+a/2 - y_0 + \left[(x - x_0)^2 + (a/2 - y_0)^2 + (b/2 - z_0)^2 \right]^{1/2}} \right] dx, \quad (12)$$

де: J - середня по перерізу катушки щільність струму.

Розподілення вектора індукції магнітного поля, яке генерується НМС, визначене на підставі результатів числового інтегрування та підсумовування компонентів усіх фрагментів: $B = \sum B_k$.

По вибраному типу ніобій-титанового надпровідника при максимальних значеннях індукції B_{max} та струму I визначений критичний струм I_k у НП обмотці, який визначається виразом: $I_k = 600 \cdot (1 + 60 \cdot B_{max} / I)$.

Як робочий струм прийнята величина $I_p = 0,8 I_k$.



Параметри обмотки вибрані так, щоб індукція B у робочому об'ємі розділення, який має ширину 150 мм, була не меншою 3,5 Тл. Одержані значення: висота 440 мм, товщина 20 мм, число витків - 35200, робочий струм 88А. Значення модуля вектора індукції магнітного поля \bar{B} по висоті сепаруючого пристрою (матриці) при його русі по колу у магнітному полі НМС представлені на рис.3.

Енергія E , яка запасається НМС, визначена інтерполюванням об'ємної щільності енергії $\omega = B^2 / 2\mu_0$ у всьому об'ємі, у якому $|B| \geq 0,05$ Тл. У результаті розрахунків визначено, що енергія дорівнює 6,0 Мдж, час живлення обмотки струмом - 23 хв при напрузі живлення 100 В.

Розроблені методики дозволяють виконати розрахунки НМС з характеристиками поля, які задані відповідними параметрами вихідної сировини та режимами процесу сепарації. Наприклад, для ЕТК з барабанним сепаруючим пристроєм значення індукції $B \geq 4,0$ Тл та градієнти поля $grad B \geq 120$ Тл²/м, які необхідні при збагаченні кускових гематитових руд крупністю 25-0 мм, можуть бути забезпечені НМС із ніобій-титанового дроту перерізом 5,6 мм² при робочому струмі $I_p = 1000$ А.

На підставі розрахунків магнітних систем розроблені системи кріостатування, живлення та управління.

У четвертому розділі з'ясовані питання розробки систем забезпечення надпровідникового стану НМС та принципів побудови систем управління ЕТК. Виходячи із розрахованих характеристик магнітної системи барабанного сепаратора: $I_p = 1000$ А, $L = 5,8$ Гн, напруги захисного виводу енергії $U_{max} = 500$ В, розроблена система живлення, захисту та управління. З метою підвищення енергетичної ефективності ЕТК передбачена робота магнітної системи у режимі "замороженого потоку", для чого розроблена електрична схема з надпровідниковим ключем-перемичкою, який забезпечує замикання струму магнітної системи та відключення зовнішнього джерела живлення. За допомогою системи управління здійснюється автоматичне живлення НМС електроенергією, контроль параметрів та управління режимами роботи сепаратора. Для забезпечення надійності комплексу на підставі порівняльного аналізу двох видів вводу електроенергії у магнітну

систему - безконтактного (з НП перетворювачем) та контактної (з токовводами, які відстикуюються), прийнятий другий варіант. На основі розрахунків та аналітичної оцінки активних та пасивних схем захисту НМС при переході її до нормального стану вибрана пасивна схема.

Однією із найбільш відповідальних у комплексі є система кріогенного забезпечення (СКЗ), яка визначає енергетичну ефективність, надійність роботи усього комплексу та можливість його використання у промисловості. Розроблені дві СКЗ для НМС зануреного типу: з кріогенно-гелієвою установкою і буферним резервуаром та зріджувально-рефрижераторна.

По тепловому балансу кріогенної системи з урахуванням компенсації теплопритоків рідким гелієм виконаний розрахунок системи кріозабезпечення ЕТК з сепаруючим пристроєм барабанного типу. На підставі результатів оптимізації параметрів магнітного поля визначено, що максимальна відстань між надпровідниковими обмотками та зовнішнім кожухом кріостата повинна бути не більшою 25 мм. Прийнята конструкція НМС зануреного типу, в якій надпровідникові обмотки занурені у ванну з рідким гелієм при температурі $T=4,5^0\text{ К}$. Для теплового захисту гелієвого об'єму застосована високовакуумна суперізоляція, яка розміщена у вакуумному кожусі кріостату, у якому за допомогою розробленої вакуумної системи забезпечується тиск не вище $1 \cdot 10^{-4}$ Торр. З метою запобігання зниження коефіцієнту чорноти поверхні вакуумної порожнини та теплопритоків розроблена форвакуумна ловушка, яка охолоджується рідким азотом. Встановлено, що при даних умовах у режимі підтримки робочих температур НМС теплопритоки до гелієвого об'єму складають 7,25 Вт, що відповідає випарюванню 10 л/г рідкого гелію та 1 л/г рідкого азоту. Визначено, що при встановленні двох ЕТК з пристроями сепарації барабанного типу на шахті ім. Леніна, з метою підвищення енергоефективності, доцільним є розміщення однієї кріогенної гелієвої установи для забезпечення рідким гелієм обох комплексів.

У п'ятому розділі представлена практична реалізація питань створення фізичних моделей елементів ЕТК для сухої та мокрої сепарації слабкомагнітної сировини. Для експериментальних досліджень конструкцій магнітних систем та схем сепарації створений стенд випробувань, який включає: НП універсальний магнітний сепаратор для дослідження процесів та технологій сухої і мокрої сепарації, кріогенну гелієву та вакуумну установи для моделювання систем кріозабезпечення НП сепараторів, систем живлення, контролю, захисту та управління, пристроїв підготовки та проведення експериментів. Універсальний НП сепаратор являє собою кріостат із магнітною системою на базі чотирьох ніобій-олов'яних соленоїдів з "теплыми" отворами для встановлення пристроїв сепарації, конструкція якого дозволяє в широких межах змінювати технологічні параметри: індукцію магнітного поля від 0,05 до 7,5 Тл, довжину зони

вилучення від 150 до 510 мм, питоме навантаження на матрицю від 0,1 до 0,5 г/см, швидкість фільтрації від 0,02 до 0,1 м/с, швидкість промивки від 0,1 до 0,4 м/с, крупність матеріалів, які розділяються, від 0,01 до 25 мм.

Розроблена, виготовлена та випробувана фізична модель рейстреккової НП обмотки пристрою сепарації барабанного типу. За основні критерії подібності моделі та натурального зразка прийняті геометрія обмотки, розподілення магнітного поля та щільність струму.

Розроблені та створені моделі системи криогенного забезпечення на базі гелієвої установки КГУ 150/4,5 та напівавтоматична зріджувально-рефрижераторна система з вузлом стикування із криостатом ЕТК.

Одержані графічні залежності впливу індукції магнітного поля на показники збагачення гематитових руд (рис.4) та на вилучення шкідливих домішок (Fe_2O_3 та Al_2O_3) із польових шпатів (рис.5a) та каолінів (рис.5б), де β , θ та ϵ відповідно масова частка слабкомагнітних компонентів в концентраті і хвостах збагачення та їх вилучення.

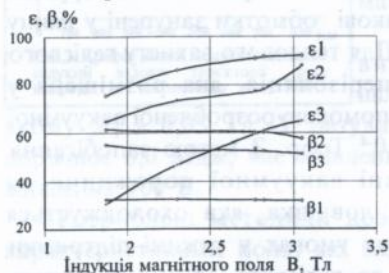


Рис.4. Результати магнітного збагачення слабкомагнітних гематитових ($\beta_2, \epsilon_2, \beta_3, \epsilon_3$) та сидеритових залізних руд (β_1, ϵ_1)

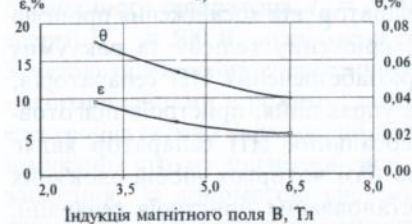
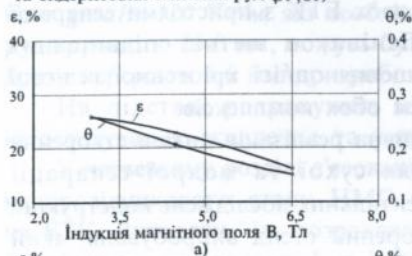


Рис.5. Результати магнітного збагачення польового шпату (а) та каоліну (б)

Зроблений висновок, що з причини наявності складних взаємозв'язків між функціональними елементами ЕТК на основі НМС, які математично не моделюються, фізичне моделювання є невід'ємним етапом їх створення.

Розроблені на підставі досліджень на фізичних моделях електротехнічне обладнання та промислові технологічні схеми сепарації засвідчують високу ефективність використання ЕТК на основі НМС для розділення гематитових та сидеритових руд, польових шпатів, каолінів та ін. [7,8]. Наприклад, впровадження технології сухого магнітного збагачення гематитових руд на базі ЕТК на дробарно-сортувальній фабриці шахти ім.Леніна дозволить підвищити вміст заліза з 54,4% до 58,8% та вихід товарної аглоруди з 68,6% до 76,9%. Строк окупності установки становить 2,3 роки. Заміна високоградієнтних резистивних магнітних сепараторів 6ЕРМ 35/315 на НП сепаратори дискового типу на Криворізькому гірничозба-

гачувальному комбінаті окислених руд дозволить у 15-17 разів скоротити енерговитрати збагачувального переділу. Економія енерговитрат для однієї збагачувальної секції комбінату становить близько 10000 кВт·г.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У даній роботі розроблені та створені енергозберігаючі ЕТК на основі НМС, системи забезпечення надпровідного стану, методики розрахунків та оптимізації основних електроенергетичних та технологічних параметрів ЕТК, що забезпечить вирішення важливих актуальних задач переробки слабкомагнітної мінеральної сировини та створення нових енергоефективних технологій сухої та мокрої магнітної сепарації.

При цьому досягнуті наступні основні результати:

1. Доведена технологічна та економічна доцільність використання ЕТК на основі НМС для сепарації слабкомагнітної мінеральної сировини та матеріалів. При цьому забезпечується приріст на 12% масової долі заліза у агломераційних рудах та вилучення до 87% заліза до концентрату при підвищенні продуктивності ВГМС у 3 рази та зниження у 20 разів питомих енерговитрат, зменшення вмісту шкідливих домішок у каолінах до 0,04%, у польових шпатах - до 0,15%, склопісках - до 0,01%, підвищення вилучення із енергетичного та коксівного вугілля шкідливих та токсичних домішок (ртуті- до 98%, мишьяку, нікелю, кобальту, марганцю- до 80%, сірчанних сполук - до 70%).

2. Визначена технічна можливість та розроблені принципи побудовання НП магнітних систем, які забезпечують силу магнітного поля до 126 Тл²/м (при глибині об'єму розділення 60 мм) для сухої сепарації та індукцію рівномірного магнітного поля до 5,4 Тл в об'ємі розділення 2200×254×560 мм для мокрої магнітної сепарації.

3. Розроблені ЕТК, які включають НМС, пристрій збагачення з системами управління та криогенно-вакуумного забезпечення надпровідного стану НМС, для створення та реалізації малоенергоємних технологій сухої та мокрої магнітної сепарації слабкомагнітної сировини.

4. Розроблений напівавтоматичний пристрій стикування криогенно-гелієвої установки з криостатом ЕТК для створення зріджувально-рефрижераторного режиму заохолодження НМС, який забезпечує зниження на 30% енерговитрат та підвищення надійності промислового ЕТК.

5. Встановлені регресійні математичні залежності фізико-механічних характеристик руди (крупності, магнітної сприйнятливості) та силових характеристик магнітного поля (індукції, градієнту), які дозволяють розрахувати необхідні параметри магнітного поля та конструкцію ЕТК для вирішення конкретних технологічних задач сепарації.

6. Розроблена та створена повномасштабна електро-технологічна модель секції рейстрекової обмотки НМС для сепаруючого пристрою барабанного типу, яка дозволила здійснити оптимізацію технологічних параметрів виготовлення промислових НМС.

7. Розроблені методики експериментальних досліджень процесів сепарації слабкомагнітної сировини з постійною ув'язкою у часі параметрів ЕТК (індукції магнітного поля, температури захолодження НМС, транспортного току у обмотці НМС, швидкості вводу та виводу струму, маси магнітного та немагнітного продукту), які дають можливість комплексного дослідження як процесів сепарації, так і конструктивних елементів ЕТК при значному скороченні матеріальних витрат на проведення експериментів. Розроблені методики розрахунку та оптимізації енергетичних та конструктивних параметрів НМС.

8. Встановлено, що шляхом сухого збагачення у сильних магнітних полях (з індукцією більш як 3,5 Тл) досягається збільшення масової частки заліза у товарних залізних рудах України до 62%, що забезпечить підвищення їх конкурентоспроможності. Розроблений спосіб захищений патентом України [8].

9. Розроблені проекти установки ЕТК на гірничорудних підприємствах ПО Кривбасруда та КГЗКОР та виконані техніко-економічні обґрунтування використання ЕТК для сухого та мокрого збагачення залізних руд. Встановлено, що впровадження ЕТК на шахті ім. Леніна забезпечить отримання товарної руди з вмістом заліза до 59%. Строк окупності витрат складає 2,3 роки. Впровадження ЕТК з НМС на збагачувальній фабриці КГЗКОРУ замість існуючих ВГМС дозволить у 15-17 разів скоротити енерговитрати збагачувального переділу, що для однієї секції фабрики складає більш як 10000 кВт·г.

Публікації по темі дисертації:

1. Сидоренко В.Д., Герасименко І.А. Використання надпровідникових сепараторів для підвищення якості руд підземного видобутку // Обогащение руд.- С.Петербург.- 1995.- №4-5.- с. 46-51.

2. Sidorenko V.D., Gerasimenko I.A., Kretinin E.A., Zhelamsky M.V., Bondarchuk E.N., Rodin I.Yu. and Muratov V.P. The Design of the Drum Separator with Superconducting Magnets. // XIV Intern. Conf. of Magnet Tecnology MT-14. - Tampere, Finland, 11-16 Juny, 1995. - p.105.

3. Sidorenko V.D., Gerasimenko I.A., Kutin A.M., Yufеров v.B., Skibenko Ye.I., Gladky V.V. Creation of Superconducting Magnetic Separators for Weakly Magnetic Mineral Raw Material Processing // XIV Intern. Conf. of Magnet Tecnology MT-14. - Tampere, Finland, 11-16 Juny, 1995. - p.119.

4. А.с.1078253 (СРСР). Автоматичні конвейєрні терези / В.Л. Каменій, В.І. Бульба, В.Д. Сидоренко. - Друк. 07.03.84, Бюл. № 9.

5. А.с. 827169 (СРСР). Прилад подачі кускових матеріалів / В.В. Дядюра, Г.Г. Кононенко, В.Д. Сидоренко. - Друк. 07.05.81, Бюл. № 17.

6. Сидоренко В.Д., Герасименко І.А. Створення надпровідникових сепараторів - новий етап у розвитку техніки та технології збагачення мінеральної сировини // Сучасний стан та перспективи розвитку техніки та технології магнітного збагачення руд та матеріалів. : Зб. матеріалів наук. техн. конф. -Кривий Ріг: Механобрчормет. - 1994. - с.10-12.

7. Сидоренко В.Д., Герасименко І.А.. Надпровідниковий сепаратор для збагачення залізних руд // Сучасний стан та перспективи розвитку техніки та технології магнітного збагачення руд та матеріалів. : Зб. матеріалів наук. техн. конф.-Кривий Ріг: Механобрчормет. - 1994. - с.15-16.

8. Патент України по заявці № 94011778 від 10.01.94, МПК В 03 С 1/00. Спосіб збагачення окисних залізних руд" / В.Д. Сидоренко, І.А. Герасименко.

Особистий внесок автора. В роботах, опублікованих в співавторстві, автору належить: у (2,3) - постановка задач, математична обробка результатів досліджень, у (4,5,8) - участь автора показана у матеріалах заявок, у (1,6,7) - результати належать авторам в рівній мірі.

V.D. Sidorenko. The electrical engineering complex (EEC) based on the superconducting magnetic systems (SMS) to separate weakly magnetic mineral raw materials.

The manuscript of the thesis to compete the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on specialities 05.09.03 - "Electrical engineering complexes and systems including their control and monitoring" and 05.15.08 - "Mineral processing", Institute for Energy Saving Problems of National Academy of Sciences in Ukraine, Kiev, 1996.

The idea of the thesis is the use of the phenomenon of superconductivity and the established multi-correlation dependences between the separation process parameters and the magnetic field characteristic in order to develop the energy-saving technologies for dry and wet separation of weakly magnetic ores and materials as well as electrical engineering complexes with superconducting magnetic systems for their implementation. The calculation methods and creation concepts for the electrical and engineering complex were developed, the magnetic field parameters (induction, B , and gradient, $B \text{ grad}B$) in the particles separation volume were optimized; correlation dependences between the magnetic field force characteristic and the superconducting separators (SCS) process parameters were established, the EEC physical model at magnetic

induction of up to 7.5 T was developed and constructed as well as the protection and control systems and the technologies for dry and wet magnetic separators of weakly magnetic mineral raw materials. The designs of the EEC commercial implementation were developed, the energy efficiency of the SMS-based EEC in mining industry was calculated.

The results of this work are highlighted in the 5 papers and 3 inventions.

Сидоренко В.Д. Электротехнический комплекс на основе сверхпроводниковых магнитных систем для сепарации слабомагнитного минерального сырья.

Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.09.03 - "Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование" и 05.15.08 - "Обогащение полезных ископаемых". Институт проблем энергосбережения НАН Украины, Киев, 1996.

Идея работы заключается в использовании явления сверхпроводимости и установленных множественных корреляционных связей между технологическими параметрами сепарации и силовыми характеристиками магнитного поля для разработки энергосберегающих технологий сухого и мокрого обогащения слабомагнитных руд и материалов и создания электротехнических комплексов (ЭТК) со сверхпроводниковыми магнитными системами для их реализации. Разработаны методы расчета и принципы построения ЭТК, осуществлена оптимизация параметров магнитного поля (индукции B и градиента $BgradB$) в объеме разделения частиц; установлены корреляционные связи между силовыми характеристиками магнитного поля и технологическими параметрами СП сепараторов; разработаны и созданы физическая модель ЭТК с индукцией магнитного поля до 7,5 Тл, системы защиты и управления, технологии сухой и мокрой магнитной сепарации слабомагнитного минерального сырья. Разработаны проекты промышленного внедрения ЭТК, выполнены расчеты энергетической эффективности применения ЭТК на основе СМС в горнорудной промышленности.

Результаты работы освещены в 5 статьях и 3 изобретениях.

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

Надпровідникова магнітна система (НМС), електротехнічний комплекс на основі НМС, принципи створення, математична та фізична модель, кріогенна система, системи живлення, захисту та управління, магнітна сепарація, ефективність.

Подписано к печати 21.08.96 г.
Бумага офсетная. Усл.-печ. лист 1,0
Тираж 100 экз. Заказ №258. Бесплатно

Формат 60x84/16
Уч.-изд. лист 1,0

ОТД института Механобрчермет
324039, г. Кривой Рог, ул. Телевизионная, 3

1120202

