

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ЗАГІРНЯК Михайло Васильович

ШКІВНІ МАГНІТНІ СЕПАРАТОРИ
(теорія, розрахунок, удосконалення)

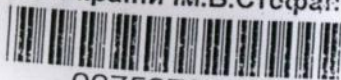
Спеціальність 05.09.06 - електричні апарати

А в т о р е ф е р а т
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 1996

Дисертація є рукописом.

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00759798 (2)

Робота виконана у Східноукраїнському державному університеті.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Власов Костянтин Петрович;

доктор технічних наук, доцент
Клименко Борис Володимирович;

лауреат Державної премії СРСР,
доктор технічних наук, професор
Копил Віталій Кирилович.

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

Провідна установа-

Державний проектно-конструкторський
інститут збагачувального устаткування
(м. Луганськ).

Захист відбудеться 22 травня 1996 р. о 14 годині 30 хвилин
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.15 Харківського
державного політехнічного університету за адресою: 310002,
м. Харків-2, МСП, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці університету.

Автореферат розісланий " 18 " квітня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

ЕГОРОВ Б. О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і ступінь дослідженості тематики роботи. Важливе місце серед широко застосовуваних у різних сферах виробництва і в побуті електричних апаратів, які комутують механічні навантаження, займають магнітносепараційні пристрої різноманітних конструкцій, що служать для відокремлення механічно не пов'язаних і відмінних один від одного магнітними якостями матеріалів. Окремий клас таких пристроїв, які відрізняються тим, що їх основою є обертові циліндричні магнітні системи (електромагнітні постійного струму або з постійними магнітами), складають шківні магнітні сепаратори, котрі завдяки простоті конструкції та високій надійності, одержали найбільш широке застосування і випускаються майже у ста типорозмірах десятками зрубіжних та вітчизняних підприємств.

Різнманітність областей та умов застосування (відокремлення сипких матеріалів при переробці вторинних ресурсів і відходів виробництва; очистка сипких матеріалів від технологічно неминучого небажаного металу; захист технологічного обладнання від попадання сторонніх металічних предметів разом із сипким матеріалом, який транспортується і переробляється) визначила різноманітність технічних рішень, що використовуються при їхньому проектуванні та промислового використанні, а також широту кола спеціалістів, котрі займаються цими завданнями.

Не випадково, тому, питанням теорії, розрахунку, удосконалення та застосування магнітних сепараторів присвячена велика кількість робіт авторів з СНД і дальнього зарубіжжя, більшість з яких - це журнальні статті, патенти й авторські свідоцтва. У наявних книгах з магнітної сепарації й обладнання для неї, останні з яких були написані більше десяти років тому, або наводяться лише короткі відомості про основні експлуатаційні характеристики конструкцій магнітних шківів, що серійно випускаються, або, в обмеженій кількості фундаментальних робіт, сепарація безпосередньо магнітними шківками та їхній розрахунок трактується спрощено. Використання для розрахунку та проектування магнітних шківів достатньо ефективних методик, розроблених для електричних апаратів з подібними конструкціями магнітних систем, у значній мірі ускладнюється, по-перше, відсутністю вихідних даних, які враховують реальні особливості експлуатації магнітних шківів, визначення яких вимагає розв'язання складної задачі встановлення впливу на процес сепарації багатьох параметрів; по-друге, відносно великими розмірами шківних сепараторів (до 1,6 м у діаметрі), які вимагають суттєвого корегування результатів і рекомендацій, одержаних з досвіту проектування традиційних електричних апаратів; по-третє, пов'язаною з математичними труднощами та великими витратами часу необхідністю модифікації зазначених методик, що мають в основному науково-дослідний ха-

рактер, для їхнього застосування до розглядаємих пристроїв.

Відсутність системного аналізу відомих удосконалень конструкцій призводить до неможливості вибору найбільш ефективних з них, а відсутність методики розрахунку та проектування, заснованою на достовірному (без суттєвих спрощувальних припущень) описі фізичних процесів, що відбуваються при сепаруванні сипких матеріалів шківними магнітними сепараторами й орієнтованої на сучасні комп'ютери, сильно стримує подальше удосконалення і розширення області застосування цих апаратів. Разом з тим, у зв'язку з різким подорожанням матеріалів та електроенергії в останні роки для вирішення завдань ресурсозбереження особливої актуальності набули як підвищення техніко-економічних показників самих магнітних шківів, так і удосконалення, в цілому, конструкцій сепараційних установок зі шківками.

Це обумовило актуальність тематики дисертації та її **головну мету** - розвиток і узагальнення методології проектування шківних магнітних сепараторів шляхом уточнення й розробки теорії та методів розрахунку їхніх головних параметрів і характеристик. З практичної точки зору метою роботи є удосконалення існуючих і розробка нових конструкцій високоефективних та економічних шківних сепараторів.

Розробкою та виробництвом нових конструкцій шківних магнітних сепараторів займаються провідні західні електротехнічні фірми: *Eriez Co., Stearns Inc., Dings Co., Magni-Power Co.* (США), *Sala* (Швеція), *Zelba* (Чехія), *Krupp, Steinert* (Германія), *Rapid, Unimag* (Великобританія), *Kanetsu Kogoyo Co.* (Японія). У СНД виробництво та проектування цих сепараторів здійснюється, головним чином, АТ "Луганський машинобудівний завод ім.Пархоменка" і Державним проектно-конструкторським інститутом збагачувального устаткування ("Діпромашвуглезбагачення", м.Луганськ). У цих організаціях протягом останніх років проектується та виготовляються удосконалені конструкції, розроблені за участі автора даної роботи.

Основні завдання дослідження визначились його метою.

1. Системний аналіз конструкцій і головних задач, що розв'язуються при проектуванні шківних магнітних сепараторів.

2. Розробка ефективних узагальнених методів проектування шківних магнітних сепараторів, які містять методи розрахунку їхніх основних параметрів, а саме:

- видобувного зусилля магнітних сепараторів, а також його особливостей при застосуванні методу конформного перетворення;
- необхідної видобувної сили при сепарації сипких матеріалів магнітними шківками;

- магнітних провідностей, напруженості та градієнта напруженості в міжполюсних зазорах відкритих вісесиметричних систем;

- розподіл магнітних потоків у відкритих вісесиметричних електромагнітних системах;

- нагрівання обмоток намагнічування електромагнітних шківів.

3. Розробка ефективних алгоритмів і програм, які забезпечуватимуть та реалізовуватимуть зазначені методи на сучасних ЕОМ.

4. Розробка удосконалення конструкцій шківних магнітних сепараторів, оцінка ефективності й одержання співвідношень для вибору оптимальної геометрії нових конструктивних елементів: вертикальних секторних феромагнітних шунтів-пластин у робочій зоні, горизонтальних феромагнітних шунтів-екранів у зоні розвантаження.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- класифіковані технічні рішення, що удосконалюють конструкції шківних магнітних сепараторів;

- обґрунтовано розрахунковий вираз видобувного зусилля магнітних сепараторів шляхом аналізу та визначення інтегральної еквівалентності різних формул силової дії магнітного поля на магнетики, одержані розрахункові вирази для видобувної сили магнітосепараційних пристроїв і аналітичні співвідношення для визначення зведеної питомої сили магнітного поля, що діє на магнетик, при розрахунку цього поля методом конформного перетворення;

- подане нове формулювання динамічної задачі щодо розрахунку руху видобуваного тіла при сепарації сипких матеріалів і розроблена методика розрахунку необхідної видобувної сили магнітних шківів, заснована на запронованій уточненій математичній моделі потоку скидання сипкого матеріалу зі шківа та розрахунку параметрів відносного руху видобуваного тіла в сипкому середовищі при сепарації магнітними шківками з використанням моделі випадкового блукання і відповідного рівняння Ейнштейна-Фокера-Планка (РЕФП);

- розроблена методика фізичного моделювання відкритих вісесиметричних електромагнітних систем шківних сепараторів, реалізація якої дозволила одержати залежності для розрахунку магнітних провідностей, напруженості магнітного поля H і значень $H \text{ grad} H$ у міжполюсному просторі двополюсних електромагнітних систем;

- розв'язана задача аналітичного розрахунку магнітного поля в обмотувальному вікні вісесиметричного електромагніту й одержані формули для визначення магнітних провідностей потоків, що замикаються у цій зоні;

- розроблена методика розрахунку розподілу магнітних потоків у відкри-

тих вісесиметричних магнітних системах електромагнітних шківів по запропонованих схемах заміщення, а також запропоновано новий метод розрахунку магнітних кіл електромагнітних систем за відповідними схемами заміщення;

розроблена методика проектного розрахунку електромагнітних систем шківних сепараторів, яка використовує визначені експериментально залежності питомої потужності розсіяння обмоток електромагнітних шківів від геометричних параметрів котушок при різних значеннях усталеного перегріву, яка дозволяє проводити багатокритеріальну оптимізацію розглядаємих магнітних систем;

запропоновано удосконалені конструкції шківних електромагнітних сепараторів і розроблені методики дослідження і розрахунку найбільш ефективних з них.

Практична цінність дослідження обґрунтована:

- розробкою науково обґрунтованої методики розрахунку шківних магнітних сепараторів, що дозволяє досить-таки просто розв'язувати задачі розрахунку та проектування їхніх магнітних систем з необхідною для інженерних розрахунків точністю;

- створенням ефективних алгоритмів і програм, які реалізують зазначені рішення на сучасних ЕОМ і забезпечують одержання оптимальних значень геометричних параметрів для проектуємих заново шківів з більш високими порівняно із серійними сепараторами техніко-економічними показниками, а також рекомендацій щодо модернізації серійних апаратів, які дозволять підвищити їхню видобувну спроможність без перемотування;

- пропозицією нових, захищених авторськими свідоцтвами, конструкцій сепараторів і способів магнітної сепарації сипких матеріалів;

- розробкою нових конструкцій шківних електромагнітних сепараторів з вертикальними секторними ферромагнітними пластинами-шунтами в робочій зоні, що підвищують видобувну спроможність і надійність роботи апарата, і з ферромагнітним трапецієвидним шунтом у зоні розвантаження видобутого металу, який забезпечує безперервність розвантаження і можливість використання шківів на низькошвидкісних транспортерах;

- оцінкою ефективності й одержанням співвідношень для вибору оптимальної геометрії шунтів.

Характеристика методів дослідження. Достовірність проведених у роботі досліджень підтверджується використанням наукових методів дослідження явищ і процесів, які відбуваються при сепарації сипких матеріалів магнітними шківками.

Теоретичні дослідження силової дії магнітного поля базуються на рівняннях теорії електромагнетизму. При цьому у роботі поряд із стандартними підходами, використовуються і найсучасніші інтегрально-векторні представлення для параметрів магнітного поля, а також аналітичні методи (конформного перетворення).

Розроблена в дисертації методика розрахунку необхідної видобувної сили магнітних шківів заснована на розв'язанні диференційних рівнянь, що описують рух видобуваного при сепарації тіла, використанні стохастичного підходу (моделі випадкового блукання і відповідного РЕФП).

Наукові положення щодо розрахунку магнітних систем обґрунтовані результатами комплексних досліджень з використанням фізичного моделювання, класичних методів безпосереднього розрахунку поля методом поділу перемінних і розрахунку магнітних кіл за еквівалентними схемами заміщення, застосуванням сучасних чисельних методів розрахунку (наприклад, метод магнітних модулів) й оптимізації, орієнтованих на можливості сучасних комп'ютерів.

Достовірність висновків підтверджується великою кількістю чисельних рішень, співпаданням результатів розрахунків з даними інших дослідників, а також чисельних експериментів у лабораторних і промислових умовах.

Реалізація наукових розробок. Результати дисертаційних досліджень реалізовані в 12 господарських договорах на проведення науко-дослідних робіт, виконаних у відповідності з Республіканською комплексною цільовою науково-технічною програмою РН.Ц.003 "Матеріаломісткість", затвердженою Постановою Ради Міністрів УРСР №250 від 11.07.85 р. (1985-90 рр.), науково-технічною програмою "Ресурсозбереження", затвердженою Постановою Державного Комітету України з питань науки і технологій №12 від 4.05.92 р. (1992-95 рр.), планами НДР і ДКР Всесоюзного главку "Союзтепловозпутьмаш" і Міненерго України (1973-95 рр.), а також ряді держбюджетних НДР за планами Східноукраїнського державного університету (1991-96 рр.).

З використанням результатів дисертації під керівництвом і за особистою участю автора розроблені, виготовлені та впроваджені удосконалені електромагнітні сепаратори: модернізований з проточною і феромагнітними обіддями для стрічки шириною 650 мм - у чавуноливарному цеху ВО "Ворошиловградтепловоз"; з максимально можливим видобувним зусиллям у стандартному габариті на ширину стрічки 1000 мм - на Новолипецькому металургійному комбінаті; багатополюсні для стрічки шириною 400 мм - на Кемеровському НВО "Карболит" і Ленінградському ВО "Русский дизель"; з вертикальними феромагнітними секторними пластинами-шунтами в робочій

зоні - на Зміївській ДРЕС і Макеївському металургійному заводі; з горизонтальним трапецієвидним феромагнітним шунтом в зоні розвантаження - на Зміївській ДРЕС (два апарати) і Первомайському електромеханічному заводі.

Усереднений на один сепаратор річний економічний ефект від впровадження склав більше 30 тисяч карбованців (у цінах до 1991 р.) в одних випадках за рахунок скорочення простою обладнання та збереження транспортної стрічки, в інших - за рахунок збереження вторинної сировини.

Результати роботи використовуються в інституті "Діпромашвуглезбагачення" при розробці та проектуванні магнітних сепараторів, а також у навчальному процесі в Східноукраїнському державному університеті при підготовці інженерів-електромеханіків.

Апробація роботи. Результати наукових досліджень докладені, обговорені й отримали схвалення на науково-технічних конференціях Східноукраїнського державного університету (1973-1995 рр.), Харківського державного політехнічного університету (1977, 1996 рр.), Всесоюзному семінарі Інституту математики АН УРСР (м.Київ - 1974 р.), Республіканських науково-технічних конференціях (м.Луганськ - 1975, 1979, 1981, 1990 рр., м.Запоріжжя - 1989 р., м.Київ - 1991 р.); Всесоюзних науково-технічних конференціях (м.Луганськ - 1973 р., м.Москва - 1978, 1988, 1990 рр., м.Ташкент - 1987 р., м.Київ - 1988 р., м.Ярославль - 1989 р., м.Воронеж - 1991, 1993 рр., м.Вінниця - 1991 р., м.Красногорськ, Московської обл. - 1992 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах (м.Детройт - 1984 р., США; м.Дрезден - 1989 р., м.Кемніц - 1990 р., Німеччина; м.Стокгольм - 1991 р., Швеція; м.Заборов - 1993 р., м.Познань - 1994 р., м.Блазеджево - 1994 р., м.Ланкут - 1994 р., м.Краків - 1994 р., Польща).

Розробки демонструвались на обласних, республіканських, всесоюзних виставках і відзначені дипломом III ступеня на ВДНГ УРСР (1981 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 121 роботу, серед яких два одноосібних навчальних посібники з грифом Міністерства освіти України, 5 брошюр (2 одноосібно), 38 статей (4 у США), 35 авторських свідоцтв.

Структура і об'єм дисертації. Робота, що складається із вступу, шести глав, загальних висновків, списку літератури (275 найменувань) і шести додатків, містить в основному тексті 260 машинописних сторінок, 31 таблицю та 80 рисунків на 112 сторінках.

Наукові результати, що виносяться на захист.

1. Узагальнені методи розрахунку та проектування шківних магнітних сепараторів з урахуванням взаємозв'язків визначальних електромагнітних, механічних і теплових процесів, а саме:

1.1. Обґрунтування розрахункового виразу видобувного зусилля магнітних сепараторів шляхом аналізу й установлення інтегральної еквівалентності різних формул силової дії магнітного поля на магнетики; аналітичні співвідношення для визначення питомої сили магнітного поля, що діє на магнетик, при розрахунку цього поля методом конформного перетворення.

1.2. Нове формулювання динамічної задачі по розрахунку руху видобуваного тіла при сепарації сипких матеріалів і методика розрахунку необхідної видобувної сили магнітних шківів, заснована на запропонованій уточненій математичній моделі потоку скидання сипкого матеріалу зі шківа та розрахунок параметрів відносного руху видобуваного тіла в сипкому середовищі при сепарації магнітними шківками з використанням моделі випадкового блукання і відповідного РЕФП.

1.3. Методика розрахунку магнітних провідностей, напруженості магнітного поля H і значень $H \text{ grad}H$ у міжполюсному просторі двополюсних електромагнітних систем на основі даних фізичного моделювання.

1.4. Метод аналітичного розрахунку магнітних провідностей для потоків, що замикаються в обмотувальному вікні вісесиметричного електромагніту.

1.5. Методика розрахунку розподілу магнітних потоків у відкритих вісесиметричних магнітних системах електромагнітних шківів по запропонованих схемах заміщення та новий метод розрахунку магнітних кіл електромагнітних систем за відповідними схемами заміщення.

1.6. Методика проектного розрахунку електромагнітних систем шківних сепараторів, яка використовує експериментально визначені залежності питомої потужності розсіювання обмоток електромагнітних шківів від геометричних параметрів котушок при різних значеннях усталеного перегріву.

1.7. Методики розрахунку і дослідження запропонованих удосконалених конструкцій шківних електромагнітних сепараторів, а також механічного переміщення видобутих тіл у зоні розвантаження.

2. Результати практичної реалізації розроблених узагальнених методів проектування шківних магнітних сепараторів, а саме:

2.1. Нові, захищені авторськими свідоцтвами, конструкції сепараторів і способи магнітної сепарації сипких матеріалів.

2.2. Алгоритми розрахунку магнітних систем шківних електромагнітних сепараторів та їхніх найбільш ефективних удосконалень.

2.3. Алгоритм проектування електромагнітних систем шківних сепараторів, який забезпечує одержання оптимальних значень геометричних параметрів для шківів, що проектується заново, і рекомендацій щодо модернізації серійних апаратів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані її мета й вирішувани завдання; подана анотація результатів, що виносяться на захист, та інформація про апробацію і впровадження роботи.

У першій главі наведені огляд і аналіз конструкцій шківних сепараторів, подана характеристика основних задач їхнього проектування.

Основною шківних магнітних сепараторів є симетричні відносно осі обертання магнітні системи, що містять для створення робочого магнітного поля у відносно великих об'ємах значні міжполюсні зазори, наявність яких суттєво ускладнює їхні розрахунки. Ці системи можуть виконуватися зі спеціальним способом зібраними високоефективними постійними магнітами або з електромагнітним збудженням постійним струмом і бути дво- або багатополюсними. Останні набираються за модульною технологією з двополюсних секцій.

Магнітні шківні із збудженням від постійних магнітів застосовуються для легко- і середньовантажених транспортерів. Для високопродуктивних (важковантажених) транспортерів застосовуються більш ефективні електромагнітні шківні, з яких для умов експлуатації, прийнятих в Україні та країнах СНД (перш за все, велика нормативна товщина шару матеріалу на стрічці) визнано доцільним використання двополюсних електромагнітів.

Головні завдання, що вирішуються при конструюванні шківних магнітних сепараторів і визначають основні шляхи удосконалення їхніх конструкцій: поліпшення видобувної можливості магнітного поля в робочій міжполюсній зоні, інтенсифікація охолодження обмоток і зменшення енерговитрат, покращення технологічних умов сепарації, підвищення надійності розвантаження видобутого металу. У відповідності з цим були проведені огляд, класифікація і аналіз відомих на даний час технічних рішень (зміною конструкції сепаратора) кожної із сформульованих задач.

Існуючі технологічні схеми застосування магнітних шківів (у якості ведучого шківа стрічкового транспортера чи підвісного шківа, який розвантажується самостійно) і відомі конструктивні рішення задачі інтенсифікації охолодження в цілому задовольняють сучасні вимоги.

З усього різноманіття конструктивних рішень задач поліпшення видобувної можливості шківа найбільш простим і застосовуваним є використання секторних вертикальних пластин-шунтів [46], а для задачі покра-

щення розвантаження шківних сепараторів - установка між шківом і віткою транспортера, що збігає зі шківа, спеціальних пристроїв з феромагнітними шунтами-екранами [49,51-54].

Перспективою майбутніх досліджень на шляхах підвищення ефективності видобування уявляється застосування феромагнітних обмоток [48,55-57] і додаткового підмагнічування [47,48,50], а на шляху інтенсифікації охолодження - використання природного рідинного охолодження [58-61].

Незалежним від конструкції сепаратора важливим напрямком підвищення його техніко-економічних характеристик є оптимальне проектування (вибір геометричних та інших параметрів) деякої, прийнятої за основу, конструкції шківа (у розглянутому випадку - двополусної відкритої вісесиметричної магнітної системи виду показаної на рис.1).

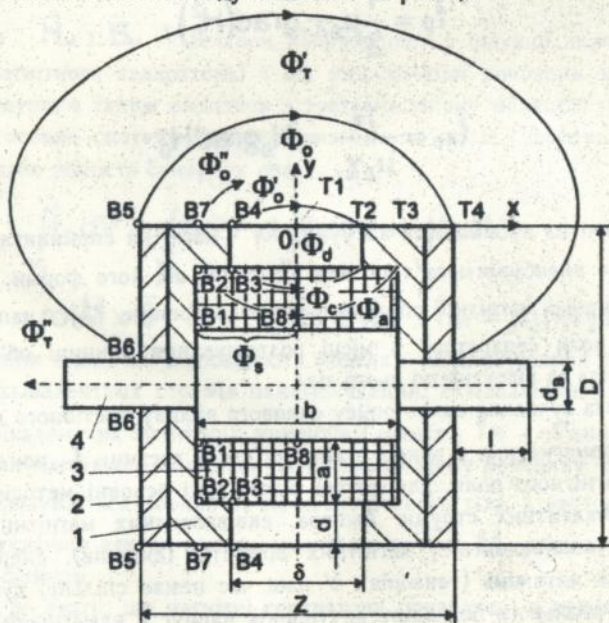


Рис. 1. Узагальнена фізична модель електромагнітного шківа

При цьому загальна задача проектування магнітних шківів включає розв'язання таких задач: розрахунок розподілу векторів стаціонарного магнітного поля в робочій зоні шківа; визначення за цими відомими векторами силової дії поля на тіло, що намагнічується; розрахунок динаміки руху видобуваного в процесі сепарації тіла; синтез магнітної системи шківного сепаратора і вибір її оптимальних за прийнятим критерієм

параметрів; розрахунок механічного переміщення видобутих тіл у зоні розвантаження.

З урахуванням викладеного були визначені завдання дослідження.

У другій главі розглядаються питання теоретичних основ розрахунку силової дії магнітних сепараторів на видобуваємі феромагнітні тіла. Головним з них є обґрунтування придатності при таких розрахунках, не дивлячись на відомі теоретичні невизначеності, градієнтних формул для питомой (на одиницю об'єму видобуваємого тіла) та питомої зведеної (до μ_0 і χ_T) сил видобування, відповідно:

$$\bar{f}_0 = \frac{1}{2} \mu_0 \chi_T \text{grad}(H_0^2). \quad (1)$$

$$\bar{f}_{\text{пр}} = \frac{\bar{f}_0}{\mu_0 \chi_T} = H_0 \text{grad} H_0. \quad (2)$$

де μ_0 - магнітна проникність вакууму; χ_T - магнітна сприйнятливість феромагнітного видобуваємого тіла, яка залежить від його форми, співвідношення розмірів і магнітної сприйнятливості речовини; H_0 - напруженість магнітного поля сепаратора в місці розташування одиниці об'єму видобуваємого тіла за відсутністю цього тіла.

Однією із сучасних основ опису силового впливу постійного магнітного поля на феромагнетики є використання об'ємної густини \bar{f} пондеромоторної сили магнітного поля, для котрої відомі такі основні методи її визначення: еквівалентних струмів Ампера, еквівалентних магнітних зарядів (Пуассона), еквівалентних магнітних моментів (диполів), енергетичний, Максвелових натяжінь (тензорів). У наш час немає спільної думки щодо обчислення реального розподілу внутрішніх напруг у намагніченому феромагнетику. Але, якщо відштовхуватися від необхідності у більшості розрахунків (магнітних сепараторів, у тому числі) визначати сумарну силу дії магнітного поля на все феромагнітне тіло (за відсутністю необхідності знання точного розподілу питомої сили), то питання про придатність тієї чи іншої формули може бути вирішене на основі встановлення еквівалентності розглядаємих формул при інтегруванні по всьому об'єму намагніченого тіла одна одній та реальній сумарній силі.

Зазначений інтегральний підхід і був застосований для теоретичного підтвердження придатності формули (1) для розрахунку сумарної сили, яка

діє на феромагнетик у стаціонарному магнітному полі. При цьому, оскільки останні два з вищезазначених методів визначення густини \vec{f} при строгому підході ґрунтуються на певних формулах для об'ємного розподілу пондеромоторної сили поля у магністику, тобто є вторинними по відношенню до перших трьох методів, то в дисертації аналізуються саме ці три методи.

Використовуючи представлення напруженості \vec{H} та індукції \vec{B} магнітного поля в одиночному об'ємі розглядаємого магнетика у вигляді сум

$$\begin{aligned}\vec{H} &= \vec{H}_0 + \vec{H}_m, \\ \vec{B} &= \vec{B}_0 + \vec{B}_m.\end{aligned}\quad (3)$$

де \vec{H}_0 і \vec{B}_0 , \vec{H}_m і \vec{B}_m - вектори напруженості і індукції поля від його джерела (магнітного сепаратора) і від намагніченої речовини магнетика, формулу Брауна, а також виходячи з третього закону механіки про дію та протидію стосовно системи "джерело магнітного поля - феромагнетик", у роботі показано рівність сумарних сил

$$\int_{V_T} \vec{f}_A dV = \int_{V_T} \vec{f}_n dV = \int_{V_T} \vec{f}_{zn} dV = \int_{V_T} \vec{f}_R dV.\quad (4)$$

Тут $\vec{f}_A = \text{rot} \vec{M} \times \vec{B}$, $\vec{f}_n = -\mu_0 \vec{H} \text{div} \vec{M}$, $\vec{f}_{zn} = \mu_0 (\vec{M} \text{grad}) \vec{H}$ - об'ємні густини сили, які відповідають моделям намагнічування речовини у вигляді еквівалентних струмів намагнічування, еквівалентних магнітних зарядів, еквівалентних магнітних моментів (діполів); \vec{f}_R - об'ємна густина реальної сили магнітного поля, що діє на намагнічену речовину. В формулі (4) під V_T розуміється повний об'єм намагніченого тіла, а вектори магнітного поля, включно вектор намагніченості магнетика \vec{M} , розглядаються як узагальнені функції.

Беручи до уваги, що магнітні сепаратори призначені в основному для видобування магнітом'яких феромагнетиків, які мають ізотропні магнітні властивості, намагніченість була представлена у вигляді $\vec{M} = \chi_T \vec{H}_0$, і з урахуванням того, що $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}_0$, на основі виконаних перетворень виразів із рівняння (4) виведена формула, яка повністю співпадає з формулою (1), це підтвердило можливість застосування останньої в розрахунках цих апаратів.

Оскільки теорія й практика точного об'ємного інтегрування диференційно-векторних операцій над векторами магнітного поля, що складають основу формул для питомої пондеромоторної сили, знаходиться ще у стадії

становлення, для інженерних розрахунків, коли необхідно визначити сумарну видобувну силу, яка діє з боку магнітного сепаратора на тіло, що намагнічується, подано практичні формули питомої зведеної сили, засновані на певних фізичних уявленнях використання яких, однак, не виключає необхідності розв'язання задачі розрахунку розподілу напруженості магнітного поля в міжполюсному зазорі сепаратора.

При використанні методу конформних відображень напруженість, як правило, не вдається одержати в очевидному вигляді як функцію координати вихідної області, що ускладнює обчислення питомої електромагнітної сили. В результаті відповідних аналітичних перетворень знайдено вираз для визначення питомої пондеромоторної сили магнітного поля безпосередньо

через параметри конформного перетворення (W і \dot{W} - комплексний і комплексно-спряжений потенціали поля; z і t - комплексні координати вихідної та відображеної областей):

$$\bar{f}_0 = \mu_0 \chi_T \left[\frac{dW}{dt} \frac{d^2 \dot{W}}{dz^2} \left(\frac{dt}{dz} \right)^3 + \frac{dW}{dt} \frac{d\dot{W}}{dz} \frac{dt}{dz^2} \right] \quad (5)$$

Третя глава подає дослідження щодо розрахунку необхідної видобувної сили при сепарації сипких матеріалів магнітними шківками.

Для знаходження необхідної сили видобування деякого феромагнітного тіла магнітним шківом необхідно розв'язати рівняння динаміки за другим законом Ньютона для руху цього тіла в робочій зоні шківки у процесі видобування з урахуванням відповідних граничних умов, а головне, взаємодії видобуваного тіла з частками сипкого середовища. Існуючі методики розрахунку урахування взаємодії видобуваного тіла з частками середовища в зазначеному рівнянні проводять, як правило, введенням відповідної сили опору, при визначенні якої не враховують її стохастичний характер.

Урахування в рівнянні динаміки сили $\bar{F}_{вз}$ взаємодії видобуваного тіла з частками середовища, яка має випадковий характер, обумовлене флуктуацією параметрів середовища, призводить до того, що це рівняння не має однозначного рішення і не може бути розв'язане традиційними методами. Тому для розв'язання такого рівняння необхідно використовувати статистичний підхід, заснований на розгляді руху усередненого за статистичним ансамблем видобуваного тіла, однак використання цього методу при магнітній сепарації відоме тільки для дослідження масопереносу і не розроблене стосовно до руху одиничного тіла в робочій зоні магнітних сепараційних пристроїв.

У результаті представлення руху видобуваного тіла крізь сипке середовище в робочій зоні магнітного шківів, як сукупності переносного руху разом з частками сипкого матеріалу і відносного - під дією пондеромоторної сили магнітного поля \bar{F}_m , розрахунок необхідної сили видобування зведений до розв'язання відповідних динамічних рівнянь переносного й відносного рухів, які отримуються з урахуванням того, що сила \bar{F}_m шківів і складова сили $\bar{F}_{вз}$ обумовлена силою видобування, спрямовані по лінії радіальної координати (в полярній системі координат з центром на осі обертання шківів).

Оскільки, як для підвісного, так і для вмонтованого виконань шківівних магнітних сепараторів переносна швидкість може бути визначена за відомою швидкістю в будь-якій точці потоку матеріалу без безпосереднього розв'язання рівняння переносного руху, необхідна видобувна сила $F_{мн}$ може бути знайдена із розв'язання тільки одного рівняння відносного руху при послідовному розв'язанні таких задач: визначення параметрів потоку сипкого матеріалу (форма і швидкість у будь-якій точці), опис динаміки та параметрів відносного руху видобуваного тіла (з урахуванням його стохастичного характеру), визначення траєкторії руху і, власне, розрахунок необхідної видобувної сили, що забезпечує необхідну траєкторію.

Аналіз методів розрахунку параметрів потоку сипкого матеріалу показує, що в теперешній час немає задовільної інженерної методики такого розрахунку безпосередньо для шківів (у відомих методиках не враховуються взаємодії часток між собою, вид сипкого матеріалу та його параметри), а загальні аналітичні і емпіричні методи, відповідно, або не можуть бути застосовані для дослідження потоків довільної форми (з вільною межею), або не можуть бути використані для розглядаємих досліджень через недостатню розробленість.

Розроблена повна математична модель процесу скидання сипкого матеріалу з розвантажувального шківів горизонтального стрічкового конвеєра. Показано, що реальна форма потоку зсипання та його характеристики адекватно визначаються параболою вільного падіння часток матеріалу, які починаються на площині, що проходить через лінію контакту зі шківом вітки, яка набігає, стрічки транспортера під кутом α природного укусу сипкого матеріалу (рис.2). При швидкостях обертання шківів, які мають місце на практиці, зазначені параболи мають зону перетинів, що відповідає реальному зіткненню часток потоку, але не перетинають поверхні шківів, що відповідає реальному руху часток потоку без зіткнення зі шківом.

Одержано розрахункові вирази для зменшення товщини шару матеріалу h_m у вертикальній площині, що спостерігається при експлуатації

шківів (див.рис.2):

$$\text{при } V_n > V_3 = \text{ctg}\alpha \sqrt{gh_m} \cdot h_0 = h_m - 0,5g(h_m \text{ctg}\alpha / V_n)^2, \quad (6)$$

$$\text{при } V_n \leq V_3 = \text{ctg}\alpha \sqrt{gh_m} \cdot h_0 = (R + h_n)(\text{tg}\alpha)^2 / 2. \quad (7)$$

де V_n і h_n - швидкість і товщина стрічки транспортера, g - прискорення вільного падіння, R - радіус шківа.

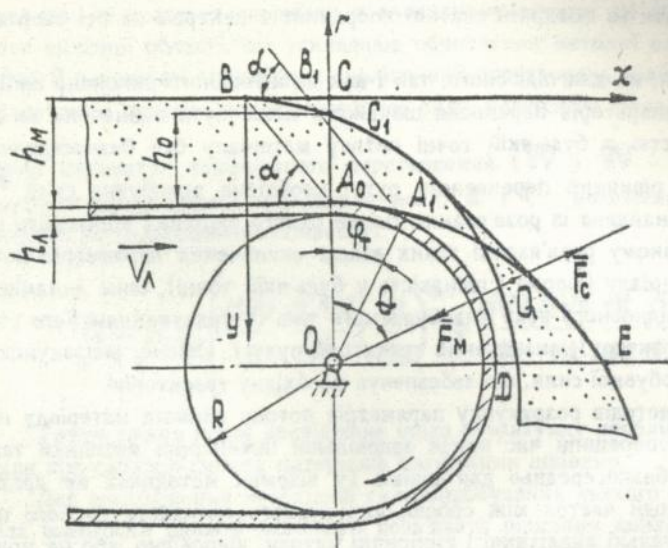


Рис. 2. Форма потоку зсипання зі шківа

Аналітично доведено, що для магнітних шківів існуючих типорозмірів (крім шківів типу Ш65-63) максимальне віддалення часток потоку від верхні шківа при переносному рухові у межах робочої зони менше, ніж вихідна товщина шару матеріалу на стрічці. Тому переносною швидкістю часток потоку по радіальній координаті можна знехтувати й описувати переносний рух тільки рівнянням по кутовій координаті:

$$V_{\text{пер}} = V_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = K_{\theta} \frac{V_n}{r}. \quad (8)$$

Тут K_{θ} - константа, одержана в наслідок малої зміни переносної швидкості при зміні координати θ (див.рис.2) від нуля до $\pi/2$ усередненням цієї швидкості у межах робочої зони:

$$K_0 = (2/\pi) \left[1 + \sqrt{2g(R + h_m + h_n)/V_n} \right]. \quad (9)$$

Для шківів типу Ш65-63 визначення необхідної сили видобування пов'язане з урахуванням відповідної швидкості дрейфу по радіальній координаті, що визначається як середня швидкість проходження тілом за час видобування відстані, яка дорівнює різниці товщини шару матеріалу та максимального віддалення часток від шківа в переносному русі.

На основі розгляду існуючих моделей передачі імпульсу від тіла, яке рухається, часткам середовища шляхом їхнього тертя об поверхню тіла (включно конус нерухомості) і з урахуванням обумовленості відносного руху силою \bar{F}_m магнітного поля шківа, показано, що сила опору відносному рухові тіла в сипкому середовищі може бути прийнята в розглядуваному випадку пропорційною швидкості відносного руху $\bar{V}_{отн}$, усередненої за статистичним ансамблем виймаємого тіла, а напрям цієї сили протилежний зазначеній відносній швидкості (тобто пондеромоторній силі шківа). Запропонована проста методика експериментального визначення зведеного коефіцієнта опору γ і знайдені його значення для руху тіл різних форм, які найбільш часто зустрічаються у відпрацьованій формовій суміші металургійних виробництв.

Заміною кінематичних параметрів відносного руху відповідними густинами ймовірностей неоднозначна задача відносного руху, що описується рівнянням Ньютона за другим законом динаміки, зведена для розглядуваного випадку до рівняння Ейнштейна-Фоккера-Планка, яке має однозначне рішення відносно густини ймовірності $\rho(\zeta, t)$ для радіальної координати:

$$\frac{d\rho(\zeta, t)}{dt} = b(\zeta) \frac{d^2\rho(\zeta, t)}{d\zeta^2} - \frac{d}{d\zeta} [a(\zeta)\rho(\zeta, t)],$$

де $a(\zeta)$ і $b(\zeta)$ - деякі коефіцієнти, які є в загальному випадку функцією координати відносного руху. На основі порівняння описаних РЕФП відносного руху по радіальній координаті й одномірного випадкового блукання показано, що середня (статистична) швидкість відносного руху пропорційна силі, яка змушує рух, і тому середнє переміщення видобуваного тіла у відносному рухові може бути розраховано кінематично:

$$-dr = \left(F_m / m \gamma \right) dt.$$

ЛНБ ім. В. Стефанишина
АН України

де Γ - радіальна координата (див. рис.2), M - маса видобуваного тіла.

З розгляду мікропереміщень видобуваного тіла одержано також співвідношення для визначення середньоквадратичного відхилення радіальної відстані, що дозволяє розрахувати флуктуації реальної відстані від середнього кінематичного в залежності від параметрів, які визначають процес відносного руху:

$$\sigma_r = \left[2m \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} \epsilon_v^3 \frac{V_{отн}^2}{F_m} d\Gamma \right]^{1/2} \quad (11)$$

де Γ_1, Γ_2 - границі інтегрування, що відповідають межах руху; ϵ_v - коефіцієнт, що характеризує флуктуацію швидкості відносного руху.

У результаті розв'язання системи рівнянь для швидкостей переносного й відносного рухів по кутовій і радіальній координатах одержані рівняння траєкторій видобування для підвісного та вмонтованного виконань шківних сепараторів, а з умов забезпечення потрапляння видобуваного тіла на поверхню шківа у межах його робочої зони одержана формула необхідної сили видобування, що враховує всі основні вихідні параметри розглядаемого процесу:

$$F_{мн} = \frac{2K_0 m \dot{\gamma} V_n}{\pi C_b} \left[1 - \left(\frac{R + h_n}{R + h_n + h_0} \right)^{C_b} \right] \quad (12)$$

де C_b - константа з апроксимації, що характеризує розподіл напруженості поля над серединою міжполюсного зазора, яка залежить від типорозміру шківа. Для шківів типу Ш65-63 формула необхідної сили видобування уточнена з урахуванням коректування переносної швидкості видобуваного тіла швидкістю дрейфу.

На основі адекватності даних промислової експлуатації та випробувань електромагнітних шківів усіх серійних типорозмірів з розрахунковою оцінкою ефективності видобування цими шківками різноманітних феромагнітних тіл при сепарації горілої формовочної землі визначена практична можливість використання одержаних формул необхідної видобувної сили для розрахунку вихідного параметра при проектуванні шківних сепараторів.

У четвертій главі подано дослідження розподілу магнітного поля в робочому міжполюсному просторі та магнітопроводі шківа.

Завдання дослідження магнітного поля електромагнітних шківів зво-

диться до розрахунку магнітних провідностей повітряних ділянок і розробці схеми заміщення магнітного кола, точність яких визначає точність розрахунку магнітної системи, а також одержанню виразів для визначення напруженості магнітного поля та її градієнта, що визначають електромагнітну силу, яка діє на феромагнітне тіло в розглядаємій точці робочого міжполюсного простору сепаратора.

Розрахунок магнітного поля в робочій зоні шківних сепараторів на постійних магнітах може бути проведений на основі методу магнітних модулів, докладний виклад методики визначення напруженості магнітного поля намагніченого модуля яким подано в цій главі дисертації. Практичне використання наведених формул полягає у застосуванні принципу суперпозиції, згідно з яким напруженість магнітного поля від системи магнітних модулів, що замінюють реальну магнітну систему сепаратора, визначається як сума напруженостей від кожного з магнітних модулів [66].

Найбільш ефективними та достовірними методами дослідження плоскомеридіанних магнітних полів у зазорах відкритих електромагнітних систем є експериментальні методи, результати яких, подані у вигляді залежностей між критеріями подібності, можуть бути розповсюджені на будь-які інші геометрично подібні магнітні системи, що мають подібну зміну параметрів середовищ у межах області поля [9]. Експериментальні дослідження проводились на розробленій узагальненій, фізичній моделі магнітної системи шківного сепаратора (див.рис.1). Зміна форми моделі здійснювалась шляхом зміни внутрішніх 1 і додаткових 2 полюсних дисків, а також котушки 3 та осердя вала 4. Всього було досліджено 82 типорозміра моделей.

У відповідності до прийнятої методики шуканими були критерії подібності для напруженості магнітного поля

$$H_{\text{отн}} = H = \frac{H}{H_B} = H \frac{L_B}{U_{\text{мб}}} \quad (13)$$

та магнітного потоку

$$\lambda = \Phi = \frac{\Phi}{\Phi_B} = \frac{\Phi}{\mu_B U_{\text{мб}} L_B} = \frac{\Lambda}{\mu_0 L_B} \quad (14)$$

У формулах (13) і (14) H_B і Φ_B - базисні значення напруженості та магнітного потоку, відповідно; L_B - базисний лінійний розмір; $U_{\text{мб}}$ - базисна різниця магнітних потенціалів; $\mu_{\text{мб}}$ - базисна магнітна проникність, яка приймається тотожною магнітній проникності повітря μ_0 ; Λ - магнітна

провідність, зведена за потоком Φ до різниці потенціалів U_{MB} .

Значення відносних безрозмірних величин $H_{отн}$ і λ є функціями критеріїв геометричної подібності (див.рис.1):

$$X_1 = D/\delta, X_2 = Z/\delta, X_3 = d_b/\delta, X_4 = l/\delta, X_5 = d/\delta, \\ X_6 = b/\delta, X_7 = a/\delta, X_8 = y/Z, X_9 = x/Z.$$

На основі узагальнення результатів експериментальних досліджень за допомогою теорії подібності та подальшої обробки даних на ЕОМ одержані залежності, що дозволяють розраховувати з достатньо високою точністю розподіл у робочому міжполюсному просторі напруженості магнітного поля H і $H \text{ grad} H$. Значення цих величин над характерними точками магнітної системи (серединами зазора Т1 і полюсу Т3, внутрішніми Т2 та зовнішніми Т4 кряями полюсів; див.рис.1) за знайденими залежностями визначаються у функції відстані досліджуємих точок над поверхністю полюсів, різниці магнітних потенціалів між останніми, а також відношень до повітряного зазора зовнішнього діаметра і сумарної ширини магнітної системи ($D/\delta, Z/\delta$). Впливом розмірів обмотувального вікна ($b/\delta, a/\delta$) і товщини полюсних наконечників (d/δ) на розподіл поля в робочому міжполюсному просторі можна знехтувати.

Для залежностей $H_{отн}$ і $(H \text{ grad} H)_{отн}$ від критеріїв геометричної подібності одержані адекватні (за критерієм Фішера) даним експериментальних досліджень апроксимаційні аналітичні вирази виду:

$$H_{отн} = H_{\infty} \left\{ 1 - A_2(X_2; X_8) \exp[-X_1 \cdot A_1(X_2; X_8)] \right\} \quad (15)$$

$$(H \text{ grad} H)_{отн i} = (H_{отн i}) \left[\frac{d(H_{\infty})_i}{dX_8} k_i + (H_{\infty})_i \frac{dk_i}{dX_8} \right] \quad (16)$$

У формулах (15), (16) величина H_{∞} , яка відповідає значенню $H_{отн}$ при $X_1 = D/\delta \rightarrow \infty$, визначалась за формулами, одержаними в результаті перетворень відомого виразу для комплексної напруженості поля двох симетричних смужок безконечної довжини; $A_1(X_2; X_8)$ і $A_2(X_2; X_8)$ - двофакторні регресійні залежності другого ступеня, визначені за допомогою ЕОМ;

$$(H \text{ grad} H)_{отн} = \frac{H \text{ grad} H}{(H \text{ grad} H)_B} = H \text{ grad} H \frac{Z^3}{U_M^2}$$

- критерій подібності для $H \text{ grad} H$; k_1 - коефіцієнт тотожний виразу у фігурних дужках у формулі (15), що визначається номером характерної точки магнітної системи (Т1, Т2, Т3, Т4, див.рис.1).

Експериментальні дослідження магнітних провідностей для кожного з умовно виділених локальних магнітних потоків (за допомогою витків В1... В8, див.рис.1) показали, що питомі магнітні провідності між боковими циліндричними λ_0 та зовнішніми торцевими λ_T поверхнями полюсів залежать практично тільки від відношень до повітряного зазора діаметра магнітної системи та сумарної ширини полюсів і повітряного зазора (D/δ , Z/δ), питомі магнітні провідності між внутрішніми торцевими λ_d та внутрішніми циліндричними λ_c поверхнями наконечників полюсних дисків - від відношень до повітряного зазора діаметра магнітної системи та ширини обмотувального вікна (D/δ , b/δ), питома магнітна провідність λ_a з торцевої поверхні обмотувального вікна - від відношень до повітряного зазора розмірів обмотувального вікна (a/δ , b/δ). Для всіх залежностей питомих провідностей від критеріїв геометричної подібності за допомогою ЕОМ були одержані адекватні даним фізичного моделювання апроксимаційні аналітичні вирази, які дозволяють проводити розрахунок магнітних провідностей повітряних проміжків в аналітичній формі:

$$\Lambda_0 = \mu_0 \lambda_0 \pi D, \quad \Lambda_d = \mu_0 \lambda_d \pi (D - d), \quad \Lambda_c = \mu_0 \lambda_c \pi (D - 2d).$$

$$\Lambda_T = \mu_0 \lambda_T \pi D, \quad \Lambda_a = \mu_0 \lambda_a \pi (D - 2d - a),$$

$$\Lambda_s = \mu_0 \lambda_s \pi (D - 2d - 2a).$$

Для одержання розрахункового виразу питомої провідності λ_s та уточнення залежностей λ_c і λ_a від геометричних факторів в умовах відсутності насичення сталі магнітопровода, що часто має місце на практиці, було проведено аналітичне дослідження плоскомеридіанного поля в обмотувальній зоні. В результаті розв'язання рівняння Пуассона для розглядаємої області з струмом густиною J

$$\frac{\partial^2 A}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial A}{\partial \rho} - \frac{A}{\rho^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\mu_0 J \quad (17)$$

при відомих граничних умовах було знайдено вираз для векторного потенціалу $A(\rho, z)$ магнітного поля, що дозволило одержати формули для зведених провідностей потоків розсіювання з поверхностей, які обмежують

обмотувальне вікно.

На основі аналізу результатів дослідження поточкорозподілу на великій кількості математичних моделей, виконаних на електропровідному папері, фізичних моделей, натурних промислових зразків електромагнітних шківів, аналітичного дослідження розподілу магнітного поля в обмотувальній зоні, а також відомого методу ділянок була розроблена схема заміщення для розрахунку магнітних систем шківних сепараторів, що відображає картину замкнення умовно виділених локальних магнітних потоків (рис.3) з урахуванням магнітного опору сталі на всіх ділянках магнітопровода.

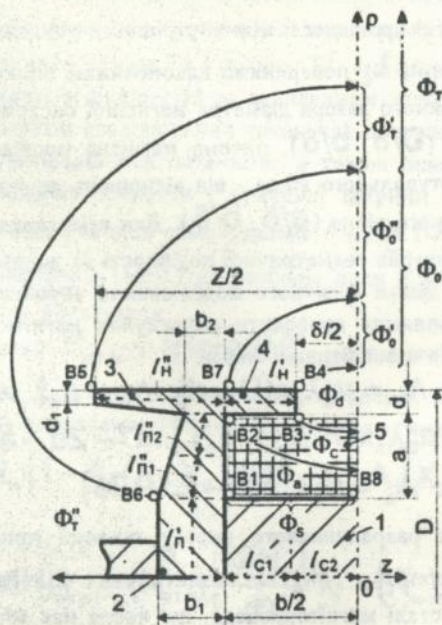


Рис. 3. Схема поточкорозподілу в електромагнітній системі шківного сепаратора:

1 - осердя; 2 - полюсний диск; 3 - зовнішня частина полюсного наконечника; 4 - внутрішня частина полюсного наконечника; 5 - котушка намагнічування

У силу симетрії магнітної системи схема заміщення складалась з урахуванням на один полюс і її загальний вигляд подано на рис.4. При цьому всі складові елементи магнітопровода розбиті на ділянки: осердя з рівномірно розподіленою МРС F - на $2p$ ділянок, полюсний диск - на три ділянки (див.рис.3), зовнішня та внутрішня частини полюсного наконечника - на m і k ділянок, відповідно; кожна ділянка, що має розподілений за довжи-

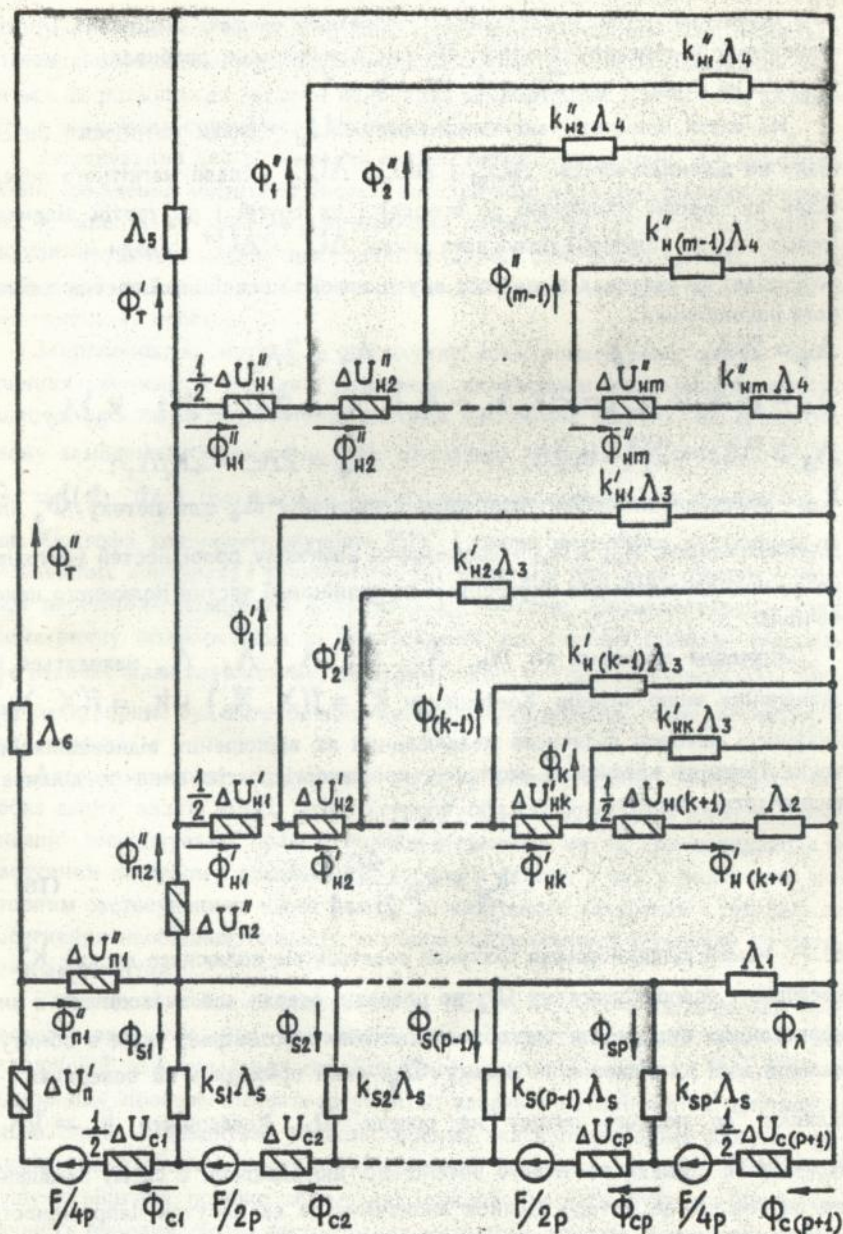


Рис. 4. Схема заміщення магнітної системи електромагнітного шківa

ною магнітний потік, представлена Т-образною схемою заміщення і потік підведений у середину ділянки. На рис.3 зображено розбивання магнітопровода на ділянки при $2p = 4$, $m = k = 1$.

На схемі прийняті такі позначення: ΔU_{ci} - спади магнітного потенціалу на ділянках осердя; $\Delta U'_{n1}$ і $\Delta U''_{n1}$, $\Delta U'_{n2}$ і $\Delta U''_{n2}$ - спади магнітного потенціалу на першій (прилеглий до осердя) і на другій і на третій ділянках (прилеглих до котушки) полюсного диска; $\Delta U'_{ni}$ і $\Delta U''_{ni}$ - спади магнітного потенціалу на ділянках відповідно внутрішньої та зовнішньої частин полюсного наконечника;

$$\Lambda_1 = 2(\Lambda_a - \Lambda_s), \quad \Lambda_2 = 2\Lambda_d.$$

$$\Lambda_3 = 2(\Lambda'_0 + \Lambda_c) = 2(k_0\Lambda_0 + \Lambda_c), \quad \Lambda_4 = 2\Lambda'_0 = 2(1 - k_0)\Lambda_0.$$

$$\Lambda_5 = 2\Lambda'_T = 2(1 - k_T)\Lambda_T, \quad \Lambda_6 = 2\Lambda''_T = 2k_T\Lambda_T;$$

k_{si} - зведений коефіцієнт розподілу провідності Λ_s для потоку Φ_s по ділянках осердя; k'_{ni} і k''_{ni} - коефіцієнти розподілу провідностей (потоків) по поверхнях відповідно внутрішньої та зовнішньої частин полюсного наконечника.

Значення провідностей Λ_0 , Λ_T , Λ_d , Λ_c , Λ_a , Λ_s знаходяться із зазначених вище виразів. Коефіцієнти $k_0 = f(X_1, X_8)$ і $k_T = f(X_1, X_2)$ визначені методом фізичного моделювання як відношення відповідних потоків. Поданий коефіцієнт розподілу провідності розсіювання по ділянках визначався з виразу

$$k_{si} = k'_{si} \frac{4p}{2i - 1} \quad (18)$$

де i - номер ділянки осердя (рахунок ведеться від полюсного диска); k'_{si} - коефіцієнт розподілу потоку Φ_s по поверхні осердя, що знаходиться з використанням виразу для векторного магнітного потенціалу поля в обмотувальній зоні як відношення потоку Φ_{si} , який приходить на поверхню i -ї ділянки, до повного потоку на осердя Φ_s . Коефіцієнти $k'_n = 1/k$, $k''_n = 1/m$. Спади магнітного потенціалу, що включені в схему заміщення, відповідно до методу ділянок визначаються як добуток напруженості магнітного поля на різних ділянках магнітопровода на довжину відповідної ділянки (див.рис.3).

Для розрахунку магнітного кола крива намагнічування сталі подається у вигляді апроксимаційної аналітичної залежності й увесь розрахунок зводиться до розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які складаються звичайним способом за законами Кірхгофа.

Застосування для розв'язання систем нелінійних рівнянь, які описують схеми заміщення магнітних систем електричних апаратів, відомих чисельних методів, заснованих на різноманітних ітераційних процесах, пов'язане з низкою труднощів. Крім того, деякі труднощі при реалізації цих методів пов'язані з поданням розв'язуваної системи рівнянь як декотрої функції в багатомірному просторі.

Запропоновано методика розрахунку електромагнітних систем електричних апаратів за схемами заміщення, складеними відповідно до методу ділянок, засновану на згортанні системи нелінійних рівнянь, які описують схему заміщення, до системи двох нелінійних рівнянь $G_1 = f(\Phi_1, \Phi_2)$ і $G_2 = f(\Phi_1, \Phi_2)$ (що являють собою рівняння, записані за другим законом Кірхгофа для непогодженості МРС і спадів магнітного потенціалу по незалежних контурах) і геометричної інтерпретації цих двох рівнянь у вигляді пересічних поверхней у тримірному просторі. Використовуючи таку геометричну інтерпретацію та припускаючи, що система рівнянь, яка описує реальну магнітну систему, на всій множині потоків-аргументів Φ_1, Φ_2 має один корінь, був розроблений метод пошуку коренів, названий методом квадросекцій.

Алгоритм методу квадросекцій містить чотири етапи (сканування, обробка даних, аналіз даних, реконфігурація області пошуку), і полягає в розбиванні досліджуваної області потоків-аргументів на чотири квадранти з наступним пошуком і локалізацією кореня в одному з них з подальшим повторним застосуванням цього методу до виділеного квадранта і так далі до досягнення необхідної точності, визначаємої величиною інтервалу по потоками-аргументам.

Значений метод реалізований на ПЕОМ РС/АТ і, як показали проведені розрахунки, має такі достоїнства: процес згортання простий (не складніший, ніж складання самої системи рівнянь за законами Кірхгофа); у двомірному просторі потоків-аргументів, завдяки візуалізації за допомогою слідів, легко знаходиться область коренів, яка в подальшому для всіх режимів навантаження сталі магнітопровода залишається єдиною; процес пошуку рішення швидко збігається; можливо досягти будь-яку необхідну точність рішення, тобто застосування методу не вносить додаткової похибки в розрахунок магнітної системи і точність розрахунку визначається лише точністю визначення елементів схеми заміщення [27,35].

Похибки розрахунку методом квадросекцій поточкорозподілу за розробленою схемою заміщення і при визначенні магнітних провідностей по одержаних кривих (або формулах) не перевищують 10% у будь-якому режимі магнітного навантаження сталі, що цілком придатне для інженерних розрахунків. При помірних значеннях індукції в сталі магнітопровода ($B \leq 1.5$ Тл), що частіше за все має місце на практиці, для розрахунку магнітних систем розглядуваного класу з похибкою не більше 10% запропонована спрощена схема заміщення (без урахування магнітного опору сталі полюсних наконечників).

Найбільші похибки розрахунку значень напруженості магнітного поля H і $H \text{ grad} H$ по одержаних кривих (або аналітичних залежностях) з використанням значень різниці магнітних потенціалів, знайдених на основі розробленої схеми заміщення, не перевищують відповідно 10% і 15% і є придатними для інженерних розрахунків, а сама методика розрахунку дає можливість проводити проектні розрахунки електромагнітних шківів.

У п'ятій главі розглядається проектування електромагнітних систем шківних сепараторів. На основі співвідношень для необхідної сили видобування шківних магнітних сепараторів одержано аналітичний вираз, що дозволяє розраховувати вихідний параметр на проектування оптимальних апаратів за даними умов експлуатації:

$$(H_0 \text{ grad} H_0)_{\text{нм}} = k_{\text{нм}} \rho_{\text{ф}} g / (\mu_0 \chi_{\text{т}}) \quad (19)$$

де $k_{\text{нм}} = F_{\text{мн}} / (mg)$ - максимальне для всіх тіл, які видобуваються, відношення, що показує в скільки разів необхідна сила видобування, розрахована за формулою (12), більша за вагу видобуваного тіла масою m , густина феромагнітного матеріалу якого дорівнює $\rho_{\text{ф}}$.

Сформульована задача синтезу електромагнітних шківів, яка полягає в спільному розгляді розподілу магнітного потоку в сталі магнітопровода і тепловиділення в обмотці намагнічування, що дають необхідні рівняння для зв'язку шуканих параметрів електромагнітної системи шківа, та через багатоваріантність рішень вимагає доповнення розв'язанням оптимізаційної задачі вибору найкращого варіанта рішення за декотрим критерієм.

У відповідності з попередніми результатами дослідження магнітного поля електромагнітних шківів і розгляду впливу міжкотушечного зазора на його розподіл у робочій зоні одержано й обґрунтовано рівняння магнітного кола. Показано, що його рішення може бути знайдено методом ітерацій, при цьому початкове значення аргументу (висота обмотувального вікна) може бути задано довільним із діапазону, що визначається геометричними

співвідношеннями між розмірами шківів.

У результаті аналізу обох частин сформульованого рівняння теплового балансу для усталеного режиму нагрівання електромагнітного шківів визначені функціональні залежності потужностей, які виділяються та відводяться, від геометричних, електричних та інших параметрів. При цьому на основі узагальнення даних теплових випробувань промислових електромагнітних шківів різних типорозмірів і кліматичних виконань одержані апроксимаційні аналітичні вирази для розрахунку питомої потужності розсіювання обмоток цих апаратів. Знайдене рівняння теплового балансу, перетворено до вигляду, зручного для визначення одного з геометричних параметрів проектуемого електромагнітного шківів.

З розглядання особливостей конструкції і технології виготовлення електромагнітних шківів показано, що двома розмірами, що найбільш зручно задавати довільно при розв'язанні задачі синтезу, є ширина полюсів Z і міжполюсний зазор δ . Два залишених невідомих розміри - висота a і ширина b обмотувального вікна знаходяться із спільного розв'язання рівнянь магнітного кола (методом ітерацій) і теплового балансу (методом половинного ділення). Розроблено алгоритм пошуку цього рішення, що складає основу розв'язання задачі синтезу електромагнітної системи шківного сепаратора.

Відповідно до існуючих рекомендацій щодо врахування виробничих факторів у якості основних критеріїв оптимізації електромагнітних шківів були прийняті маса (P_{Cu} , P_{Fe}) і вартість (C_{Cu} , C_{Fe}) активних матеріалів, електрична потужність P_s і економічний ефект \mathcal{E}_r .

Показано, що найбільш придатним методом розв'язання задачі вибору найкращого варіанта за кожним з цих критеріїв (яка характеризується як несувора однокритеріальна оптимізаційна задача) з урахуванням двовірності функцій цілі, невідомості властивостей функцій цілі і обмежень, а також необхідності знаходити рішення зразу для декількох функцій цілі, є метод послідовного перебору. При цьому область допустимих значень аргументів перебору (Z і δ) визначена як область існування рішення задачі синтезу.

Розроблено методику багатокритеріальної оптимізації електромагнітних шківів, яка дозволяє здійснювати пошук їхніх раціональних параметрів незалежно від кількості та властивостей критеріїв оптимізації і є більш зручною для розглядаємих апаратів порівняно з традиційними методами, котрі можуть призводити до неоднозначного рішення. В результаті реалізації у програмі для ЕОМ розробленого алгоритма й розв'язання за її допомогою сформульованих задач щодо проектування нових і модернізації серійних електромагнітних шківів визначено, що оптимізацію достатньо проводити за

двома критеріями, які характеризують масу активних матеріалів; одержані співвідношення геометричних параметрів оптимальних шківів усіх типорозмірів.

Для розрахункових електромагнітних шківів типорозмірів 65-63 і 100-80 це дозволило зменшити масу сталі магнітопровода відповідно на 20% і 15% порівняно із серійними шківками при незмінному видобувному зусиллі. Оскільки, при цьому для розрахункових шківів типорозмірів 65-63 і 100-80 маса обмотки намагнічування також зменшена порівняно із серійними шківками (на 10 і 19,5% відповідно у типорозмірів 65-63 і 100-80), то для зазначених типорозмірів є можливість збільшення їхньої ефективності без перебільшення показників маси серійних шківів при вихідному параметрі, що визначається за необхідною силою видобування.

При оптимізації з вихідним параметром, який визначається за даними серійного шківка, для типорозміру 140-100 серійні і оптимальні (за критерієм P_{Cu}) шківки мають значення P_{Fe} і P_{Cu} , що мало відрізняються одне від одного. Однак для розрахункових шківів у цьому випадку одержано менше значення P_z (на 5%), що досягнуто вибором оптимального значення Z рівного стандартній габаритній ширині шківка Z_r . Це ж значення оптимальної ширини полюсів має місце для типорозміру 140-100 і при оптимізації з вихідним параметром, який визначається необхідною силою видобування. Для шківів типорозмірів 65-63 і 100-80 величина $Z = Z_r$ також є оптимальною (за критерієм P_{Cu}). У результаті для оптимальних (за критерієм P_{Cu}) шківів усіх типорозмірів ширина полюсів дорівнює нормуемій ширині шківка, що дозволяє знизити собівартість виробництва шківів у результаті відмови від виконання ободів з дорогої нержавіючої сталі.

Подано рекомендації щодо модернізації серійних шківів шляхом збільшення зазора і заміни немагнітних ободів на феромагнітні. Експериментальна перевірка розподілу магнітного поля у відповідних моделях і промислового зразку підтвердила ефективність цих рекомендацій, використання яких для шківка типу Ш65-63 забезпечило підвищення видобувного зусилля на 12%.

У шостій главі проводиться дослідження удосконалених конструкцій електромагнітних шківів.

На основі аналітичного дослідження пондеромоторної сили та чисельного аналізу проведена оцінка ефективності застосування вертикальних секторних пластин-шунтів [46] у робочій зоні магнітного шківка. З урахуванням якісної ідентичності картин плоскомеридіанного та плоскопаралельного

полів при однакових граничних умовах, відносно зусилля магнітного поля шків з шунтами було знайдено з використанням у якості математичної моделі робочої зони такого шків плоскпаралельної системи (рис.5,а), що відповідає шківу з безкінечно великим діаметром.

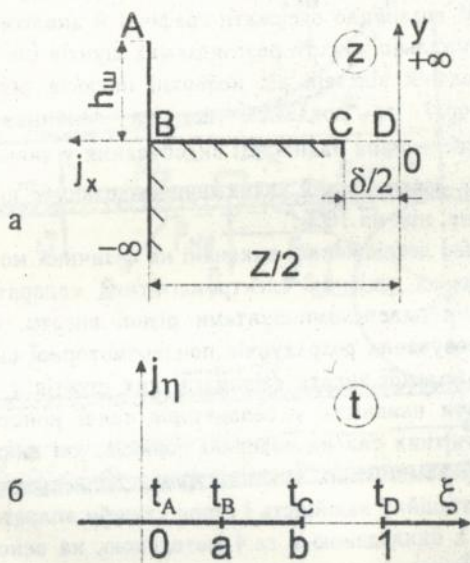


Рис.5. Математична модель магнітного шків з вертикальними феромагнітними шунтами:

а - область, де розраховується поле;

б - її конформне відображення на верхню півплощину

У результаті, після конформного перетворення плоскпаралельної моделі шків з шунтом (рис.5), для модуля питомої сили в робочому міжполюсному просторі шків було одержано

$$f_0 = \mu_0 \chi_T \pi \frac{U_0^2}{2} \left(\frac{a+1}{Z} \right)^3 \left[\frac{\sqrt{(t-1)(t-a)}}{(t^4(t-b)^2)} \right] \times \\ \times [2t^2 - (3a+b)t + 2ab], \quad (20)$$

де U_0 - різниця потенціалів між полюсами; a , b - параметри перетворення, що визначаються трансцендентними співвідношеннями, які виходять із

відповідності точок областей, котрі відображаються. При цьому вивод формули (20) базується на запису сили \vec{F}_0 безпосередньо через функцію конформного перетворення, що одержана в гл.2 з урахуванням властивостей гармонійних функцій.

Чисельне рішення отриманих трансцендентних рівнянь перетворення із застосуванням ЕОМ дозволило одержати графічні й аналітичні залежності для розрахунку оптимальної висоти розглядаємих шунтів (за критерієм максимуму сили на заданій відстані від поверхні полюсів шківів посередині міжполюсного зазора) та показало, що на глибинах видобування $u_m \geq 0,2Z$, де забезпечення надійності видобування у звичайних апаратах найбільш утруднено, застосування таких шунтів дозволяє підвищити видобувне зусилля більше, ніж на 10%.

Експериментальні дослідження, виконані на фізичних моделях і дослідно-промислових зразках шківних електромагнітних сепараторів з вертикальними секторними пластинами-шунтами різної висоти, підтверджують прийнятність застосовуваних розрахунків пондеромоторної сили та методики визначення оптимальної висоти феромагнітних шунтів у робочій зоні і дозволили встановити наявність у сепараторів такої конструкції тангенціальних електромагнітних сил на поверхні полюсів, які виключають можливість попадання феромагнітних тіл під стрічку конвеєра в робочій зоні, що збільшує експлуатаційну надійність і строк служби апарата і стрічки.

У відповідності з викладеною в гл.4 методикою, на основі аналізу досліджень потокорозподілу на математичних моделях на електропровідному папері, фізичних моделей і натурних промислових зразків, запропоновано метод розрахунку магнітних систем електромагнітних шківів з феромагнітними секторами-шунтами в робочій зоні.

На основі розглянутих сил, що діють на феромагнітне тіло при розвантаженні шківних сепараторів (рис.6), виведено співвідношення, яке повинно бути задоволене для надійного розвантаження видобутих тіл:

$$F_{Tp} \geq F_{Mg} = F_M \cos \alpha_p. \quad (21)$$

З розв'язання цього співвідношення визначено існування зони повернення, потрапляючи в яку феромагнітне тіло повертається до шківів не розвантажуючись, а також знайдені аналітичні вирази для визначення довжини зазначеної зони у шківів підвісного та вмонтованого виконань.

Для зменшення (ліквідації) зони повернення запропоновано встановити під віткою конвеєра, що збігає зі шківів, феромагнітну пластину-шунт [49,51-54]. Аналіз намагнічування цього шунта в магнітному полі шківів показав, що для зменшення сили повернення чи збільшення сили тертя між

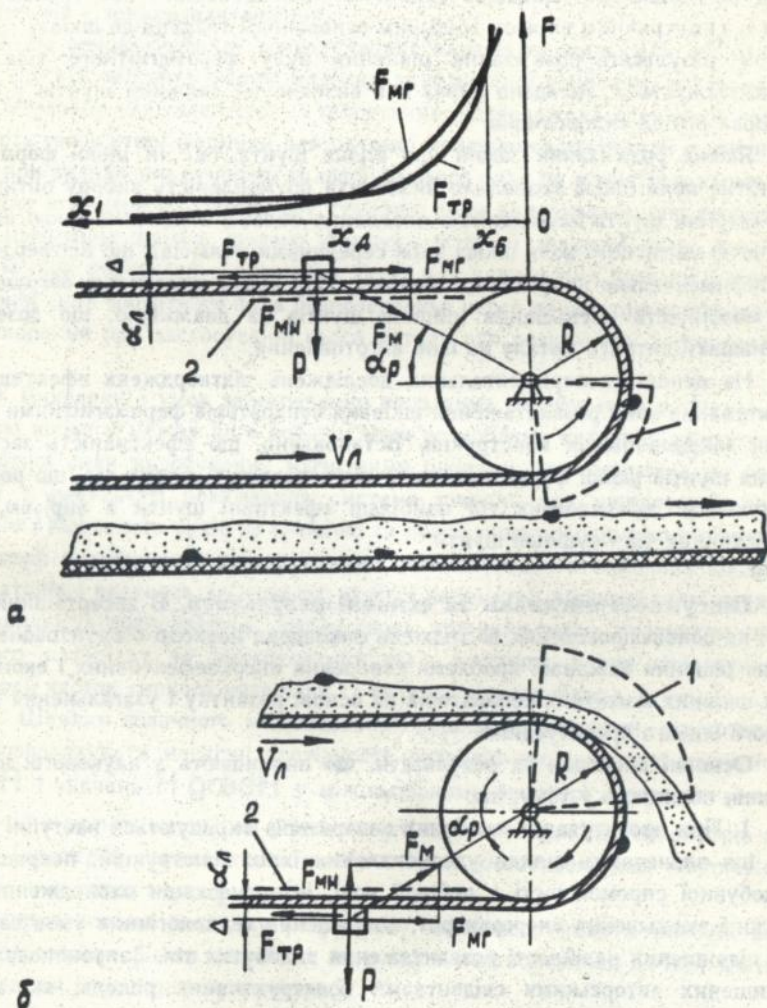


Рис.6. Схема сил, що діють на видобуте тіло в зоні розвантаження шківа, при підвісному (а) та вмонтованому (б) виконаннях:

- 1 - можливе місце розташування секторних шунтів;
 2 - можливе місце розташування трапецієвидного шунта.

тілом, що розвантажується, і стрічкою конвеєра феромагнітний шунт може бути виготовлений відповідно суцільним трапецієвидним або трапецієвидним із симетричним вирізом (більшим основанием трапеції до шківів).

У результаті розв'язання рівняння руху феромагнітного тіла, що розвантажується, знайдено вираз для визначення довжини шунтів у сепараторах різних типорозмірів.

Якісне розв'язання задачі про вплив шунта тієї чи іншої форми на магнітне поле шківів дозволило визначити обумовленість вибору оптимальної ширини шунта необхідністю охоплення області з максимальною напруженістю магнітного поля шківів (між серединами полюсів), що підтверджено експериментально на фізичних моделях. При цьому аналітично обґрунтована можливість зменшення ширини шунтів за довжиною, що дозволяє зменшити витрати металу на їхнє виготовлення.

На основі експериментальних досліджень підтверджена ефективність шунтування зони розвантаження шківних сепараторів феромагнітними шунтами запропонованої конструкції. Встановлено, що ефективність застосування шунтів різної форми залежить від переважної форми тіл, що розвантажуються: для плоских тіл найбільш ефективні шунти з вирізом, для циліндричних тіл - суцільні шунти.

Підсумкові висновки та основні результати. В дисертаційній роботі на основі проведених досліджень викладено науково обґрунтоване технічне рішення важливої проблеми створення високоефективних і економічних шківних магнітних сепараторів на основі розвитку і узагальнення методології їхнього проектування.

Основні висновки та результати, що впливають з наукового дослідження, полягають у тому, що:

1. При проектуванні магнітних сепараторів вирішуються наступні задачі, що визначають шляхи удосконалення їхніх конструкцій: покращення видобувної спроможності в робочій зоні, інтенсифікація охолодження обмотки і зменшення енерговитрат, покращення технологічних умов сепарації, підвищення надійності розвантаження видобутих тіл. Запропоновано 35 захищених авторськими свідоцтвами конструктивних рішень, які відповідають зазначеним напрямкам.

Найважливішим, незалежним від конструкції сепаратора, напрямком підвищення його техніко-економічних показників є оптимальне проектування прийнятої за основу конструкції шківів двополюсної відкритої віссиметричної магнітної системи, що включає розв'язання таких задач: розрахунок розподілу магнітного поля в робочій зоні, визначення силової дії поля на намагнічені тіла, розрахунок динаміки видобуваного у процесі

сепарції тіла, синтез магнітної системи шківного сепаратора і вибір її оптимальних за прийнятим критерієм параметрів, розрахунок переміщення видобутих тіл у зоні розвантаження.

2. На основі розгляду розрахункових виразів питомої сили магнітного поля, що відповідають різним моделям намагніченої речовини, показана їхня інтегральна еквівалентність і теоретично підтверджена практична застосовність градієнтної формули для питомої пондеромоторної сили магнітного поля при визначенні сумарної силової дії цього поля на магнетик у ньому.

Для інженерних розрахунків сумарної сили видобування, що розвивається магнітним шківом, подано формули питомої зведеної сили; шляхом аналітичних перетворень одержано вираз для визначення питомої пондеромоторної сили магнітного поля безпосередньо через параметри конформного перетворення при застосуванні цього методу для розрахунку напруженості поля.

3. Виходячи з умов забезпечення попадання видобуваного тіла на поверхню шківа у межах його робочої зони розроблено методику визначення необхідної сили видобування магнітними шківками, що заснована на одержанні в результаті розв'язання системи рівнянь для швидкостей переносного і відносного рухів за кутовою та радіальною координатами рівняння траєкторії видобування для підвісного та вмонтованого виконань шківних сепараторів і враховує всі основні вихідні параметри процесу сухої сепарції (швидкість транспортера, радіус шківа, товщину шару, параметри сепаруемого матеріалу та видобуваного тіла), а також вплив стохастичної взаємодії часток сипкого матеріалу та феромагнітного тіла.

4. Шляхом фізичного моделювання одержані залежності, що дозволяють розраховувати магнітні провідності, розподіл напруженості магнітного поля H і значень $H \text{ grad}H$ у міжполюсному просторі відкритих вісесиметричних магнітних систем у залежності від геометричних параметрів полюсів (критеріїв геометричної подібності) з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

Запропоновано методику розрахунку магнітного поля в робочій зоні шківних сепараторів на постійних магнітах із застосуванням методу магнітних модулів і принципу суперпозиції.

5. На основі аналізу результатів досліджень поточкорозподілу у відкритих вісесиметричних магнітних системах (фізичних моделях і промислових зразках електромагнітних шківів), розв'язання рівняння Пуассона для плоскомеридіанного поля усередині області, зайнятої котушкою намагнічування, та методу ділянок розроблено узагальнену схему заміщення для розрахунку магнітних систем розглядаемого класу з урахуванням магнітного опору сталі на всіх ділянках магнітопровода.

6. Запропоновано і розроблено метод розрахунку магнітних систем електричних апаратів за схемами заміщення, що складені відповідно до методу ділянок, який заснований на згортанні системи нелінійних рівнянь і геометричної інтерпретації цих рівнянь у вигляді поверхней, які перетинаються в тримірному просторі. Метод дозволяє з будь-якою точністю і достатньо просто знайти корені систем нелінійних рівнянь, які зводяться до двох рівнянь.

7. Виходячи з конструктивних і технологічних взаємозв'язків геометричних параметрів електромагнітних шківів, а також співвідношень, які встановлюються між їхніми розмірами спільним рішенням одержаних і обґрунтованих у роботі рівнянь магнітного кола та теплового балансу, визначено, що задача синтезу зводиться до двопараметричної. Розроблено алгоритм пошуку зазначеного рішення, що складає основу розв'язання задачі синтезу електромагнітної системи шківного сепаратора.

8. Розроблено методику багатокритеріальної оптимізації електромагнітних шківів, що дозволяє проводити пошук їхніх раціональних параметрів за необхідною силою видобування з урахуванням реальних умов незалежно від кількості та властивостей критеріїв оптимізації.

В результаті її реалізації в програмі для ЕОМ і проведених розрахунків одержано співвідношення геометричних параметрів оптимальних шківів усіх типорозмірів, подано рекомендації щодо модернізації серійних шківів з метою підвищення їхніх видобувних зусиль. При цьому розрахунку шківів типорозмірів 65-63 і 100-80 мають зменшені порівняно із серійними відповідно на 20 і 15% масу сталі магнітопровода і на 10 та 19,5% масу обмотки намагнічування, а шківів типорозміру 140-100 - на 5% потужність і масу обмотки намагнічування. Реалізація рекомендацій щодо модернізації на промисловому зразку шківів типорозміру Ш65-63 забезпечила підвищення видобувного зусилля на 12% і таким чином дозволила досягнути рівня сили, достатньої для використання цих шківів при сепарації горілої формовочної суміші.

9. На підставі аналітичних розрахунків, експериментальних досліджень фізичних моделей і промислових зразків магнітних шківів із запропонованими вертикальними секторами феромагнітними пластинами-шунтами в робочій зоні встановлено, що використання зазначених шунтів підвищує видобувне зусилля на граничних глибинах видобування більше, ніж на 10%, а також підвищує експлуатаційну надійність апарата за рахунок виключення попадання феромагнітних тіл під стрічку транспортера. Одержано залежності для вибору оптимальної висоти шунтів, запропоновано метод розрахунку магнітних систем електромагнітних шківів з вертикальними феромагнітними секторами-шунтами в робочій зоні.

10. У результаті розгляду сил, що діють на феромагнітне тіло в зоні розвантаження шківового сепаратора, встановлено існування та визначена довжина зони, потрапляючи у яку тіло повертається до шківів не розвантажуючись. Установлено аналітично і підтверджено експериментально ефективність застосування для зменшення (ліквідації) зони повернення запропонованого феромагнітного трапецієвидного шунта-пластини. Одержані співвідношення, що дозволяють вибрати оптимальну геометрію пластини-шунта, і подані рекомендації щодо використання шунтів різних форм.

11. Теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи були використані при розробці удосконалених шківних магнітних сепараторів і впровадженні їх на підприємствах України та Росії, а також в Державному проектно-конструкторському інституті збагачувального устаткування і Східноукраїнському державному університеті.

Положення дисертації відображені в таких основних публікаціях:

1. Загірняк М.В. Электромагнитные расчеты. - К.: ИСИО, 1995.- 204 с.
2. Загірняк М.В. Электричні машини. - К.: ІСДО, 1993. - 200 с.
3. Загірняк М.В. Зарубежные конструкции магнитных железоотделителей: Обзор. - М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1988. - 36 с. - (Горн. оборуд. Сер.2, вып.4).
4. Загірняк М.В. Устройства для магнитной очистки и регенерации смазочно-охлаждающих жидкостей. - М.: ВНИИТЭМР, 1991. - 24 с. - (Машиностроительное пр-во. Сер. Технология и оборудование обработки металлов резанием. Вып. 6.).
5. Загірняк М.В., Усатюк В.М. Магнитное оборудование для сепарации шлаков и вторичных металлов. - М.: Ин-т "Черметинформация", 1991. - 34 с. - (Сер. Обогащение руд. Вып.6).
6. Загірняк М.В., Житомирский М.Л. Технологические приспособления и грузоподъемные средства на основе магнитов.- М.: ВНИИТЭМР, 1992.- 40 с.- (Машиностроительное пр-во. Инструментальное, технологическое и метрологическое оснащение металлообрабатывающего пр-ва. Вып. 1).
7. Загірняк М.В., Кузнецов Н.И., Бухтияров И.Ю. Магнитные валковые сепараторы. - М.: Ин-т "Черметинформация", 1992. - 30 с. - (Сер. Обогащение руд. Вып. 1-2).
8. Загірняк М.В., Бранспиз Ю.А. Расчет магнитного поля в обмоточной зоне П-образного электромагнита // Электричество. - 1980. - №6. - С. 66-68.
9. Загірняк М.В. Расчет магнитных систем электромагнитных шкивных сепараторов // Электричество. - 1993. - №9. - С. 45-52.

10. Zagirnyak M.V., Nasar S.A. Fields and permeances of flat rectangular and cylindrical DC electromagnetic structures // IEEE Transactions on Magnetics. - 1985. - Vol. 21, №2. - P. 1193-1197.

11. Forces in Pulley Type Electromagnetic Separators / M.V. Zagirnyak, R.M.Pai, S.A.Nasar, Yu.A.Branspiz // IEEE Transactions on Magnetics - 1986. - Vol. 22, №1. - P. 63-67.

12. Zagirnyak M.V., Nasar S.A. Analysis of Magnetic Systems of Electromagnetic Pulley Separators // IEEE Transactions on Magnetics. - 1989. - Vol. 25, №3. - P. 2720-2725.

13. Карташян В.О., Загирняк М.В. Расчет открытых магнитных систем шкивных и барабанных электромагнитных железоотделителей // Электротехника. - 1976. - №9. - С. 59-60.

14. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Анализ результатов тепловых испытаний и расчет намагничивающих катушек электромагнитных сепараторов // Электротехника. - 1994. - №1. - С. 54-58.

15. Усовершенствование теслоамперметра Ф4354/1 для исследования постоянных магнитных полей / В.О.Карташян, А.П.Нестеренко, Е.В.Бычков, М.В.Загирняк. // Приборы и техника эксперимента. - 1976. - №1. - С. 239-240.

16. Карташян В.О., Загирняк М.В. Исследование и расчет магнитных проводимостей открытых осесимметричных магнитных систем электромагнитных шкивов // Изв.вузов. Электромеханика. - 1977. - №7. - С.765-770.

17. Карташян В.О., Загирняк М.В., Калмыков А.Н. Расчет магнитных систем электромагнитных шкивов с ферромагнитными шунтами // Изв. вузов. Электромеханика. - 1981. - №6. - С. 668-673.

18. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Определение пондеромоторной магнитной силы при расчете поля методом конформного преобразования // Изв.вузов. Электромеханика. - 1984. - №2. - С. 10-14.

19. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Расчет магнитного поля в обмоточном окне осесимметричного электромагнита // Изв.вузов. Электромеханика. - 1986. - №7. - С. 19-28.

20. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Оценка общих способов определения объемной плотности и результирующей силы взаимодействия малого ферромагнитного тела с полем электромагнита сепаратора // Изв.вузов. Электромеханика. - 1987. - №11. - С. 134-136.

21. Загирняк М.В. Анализ результатов тепловых испытаний и расчет намагничивающих катушек электромагнитных шкивов // Изв. вузов. Электромеханика. - 1991. - №3, - С. 105-109.

22. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. К расчету объемных электромагнитных сил в магнитно-нелинейных телах // Изв. вузов. Электромеханика.

1991. - №8 - С. 102-103.

23. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Алгоритм численного расчета схем замещения магнитных цепей // Изв.вузов. Электромеханика. - 1991. - №9. - С. 55-57.

24. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Приближенная формула напряженности магнитного поля над серединой зазора двухполюсного магнитного железоотделителя // Изв. вузов. Электромеханика. - 1992.- №3.- С. 62-65.

25. Загирняк М.В., Бухтияров И.Ю., Кузнецов Е.Н. Расчет магнитных систем валковых сепараторов // Изв.вузов. Электромеханика. - 1993. - №5. - С. 84-93.

26. Загирняк М.В., Пашков Я.Ю. Анализ точности формул магнитных проводимостей, полученных на основе метода Ротерса, применительно к осесимметричным электромагнитным системам // Изв.вузов. Электромеханика. - 1994. - №3. - С.80-86.

27. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Метод численного расчета магнитных систем электрических аппаратов по схемам замещения // Изв.вузов. Электромеханика. - 1994. - №4-5. - С. 48-59.

28. Расчет проводимости рабочей зоны многополюсных систем / В.О.Карташян, М.В.Загирняк и др. // Изв. вузов. Приборостроение. - 1980. - №11, - С. 26-29.

29. Уточненные схемы замещения для расчета открытых П-образных и Ш-образных магнитных систем магнитно-сепарирующих устройств / В.О.Карташян, М.В.Загирняк, Е.В.Бычков, А.П.Нестеренко. // Изв.вузов. Горный журнал. - 1978. - №2. - С. 137-143.

30. Расчет пондеромоторных сил железоотделителей с ферромагнитными шунтами / В.О.Карташян, М.В.Загирняк, Ю.А.Бранспиз, Н.Г.Воробьев // Изв.вузов. Горный журнал. - 1981. - №7. - С. 117-121.

31. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Расчет необходимой силы при сепарации электромагнитными шкивами // Изв.вузов. Горный журнал. - 1988. - №1. - С. 94-99.

32. Подвесной электромагнитный железоотделитель с автоматической разгрузкой / В.О.Карташян, М.В.Загирняк и др. // Кокс и химия. - 1978. - №1. - С.45-46.

33. Карташян В.О., Загирняк М.В., Чаплиев В.И. Электромагнитный шкив с ферромагнитными шунтами для железоотделителей // Черная металлургия: Бюл.науч.-техн.информ. - 1976. - №22. - С. 44-45.

34. Математическое моделирование и расчет потокораспределения в открытых осесимметричных магнитных системах электромагнитных шкивов / В.О.Карташян, М.В.Загирняк, Ю.А.Бранспиз, А.Н.Калмыков // Решение краевых задач средствами математического моделирования: Сб.науч.тр.

- К.: Ин-т математики АН УССР. - 1979. - С. 86-94.

35. Zagirnyak M.V., Usatyuk V.M. Method of magnetic systems numerical calculation by equivalent circuit // Proceedings of XIII-th Symposium "Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits". - Poznan, 1994. - P.101-106.

36. Карташян В.О., Загирняк М.В. К расчету электромагнитных устройств с открытыми осесимметричными системами // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Вища шк., 1977. - Вып. 9. - С. 105-109.

37. Карташян В.О. Загирняк М.В., Чаплиев В.И. К расчету электромагнитного транспортирующего устройства железоотделителя // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Вища шк., 1978. - Вып.10. - С. 100-104.

38. К расчету транспортирующей и извлекающей способности многополюсных магнитных систем / В.О.Карташян, М.В.Загирняк и др. // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Вища шк., 1980. - Вып.12. - С. 53-57.

39. Исследование усовершенствованных электромагнитных шкивов / В.О. Карташян, М.В. Загирняк, В.И. Чаплиев, и др. // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Вища шк., 1980. - Вып.12. - С. 120-124.

40. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А., Бычков Е.В. Расчет потоков в обмоточном окне тягового П-образного электромагнита // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Вища шк., 1983. - Вып.15. - С. 78-83.

41. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А., Курцевой Ю.Н. Расчет извлекающих сил электромагнитных шкивов с ферромагнитными шунтами // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Вища шк., 1985. - Вып.17. - С. 32-36.

42. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Совершенствование разгрузки электромагнитных шкивных железоотделителей // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Вища шк., 1988. - Вып.20. - С. 20-26.

43. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. К расчету разгрузочных барабанов горизонтальных ленточных транспортеров // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Харьков: Основа, 1993. - Вып. 22 - С. 129-135.

44. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А., Усатюк В.М. Исследование электромагнитных подвесных железоотделителей с арочными полюсами // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - К.: ИСИО, 1994. - Вып.24. - С. 47-55.

45. Карташян В.О., Загирияк М.В. Исследование и разработка электромагнитного железоотделителя для извлечения ферромагнитных металлических включений из отходов металлургического производства // Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. - Киев: Виша шк., 1976. - Вып.9. - С. 26-27.

46. А.с. 411904 СССР, МКИ В 03 С 1/10. Электромагнитный шкив / В.О.Карташян, Н.С.Гальченко, М.В.Загирияк и др. (СССР). - 2 с.: ил.

47. А.с. 848061 СССР, МКИ В 03 С 1/00. Способ разделения материалов / М.В.Загирияк, Б.И.Невзлин (СССР). - 2 с.: ил.

48. А.с.1039569 СССР, МКИ В 03 С 1/10. Шкив электромагнитного сепаратора / М.В.Загирияк, Б.И.Невзлин (СССР). - 3 с.: ил.

49. А.с. 1115805 СССР, МКИ В 03 С 1/10. Электромагнитный шкивной железоотделитель / В.О.Карташян, М.В.Загирияк, Б.И.Невзлин и др. (СССР). - 4 с.: ил.

50. А.с. 1424868 СССР, МКИ В 03 С 1/00. Способ магнитной сепарации сыпучих материалов / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 4 с.: ил.

51. А.с. 1493316 СССР, МКИ В 03 С 1/10. Электромагнитный шкивной железоотделитель / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 4 с.: ил.

52. А.с. 1643091 СССР, МКИ В 03 С 1/10. Электромагнитный шкивной железоотделитель / В.М.Усатюк, М.В.Загирияк, Б.И.Невзлин (СССР). - 3 с.: ил.

53. А.с. 1651967 СССР, МКИ В 03 С 1/10. Шкивной железоотделитель / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 4 с.: ил.

54. А.с. 1692653 СССР, МКИ В 03 С 1/16. Электромагнитный шкивной железоотделитель / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 4 с.: ил.

55. А.с. 1695403 СССР, МКИ Н 01 F 3/00. Обмотка электромагнита / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 3 с.: ил.

56. А.с. 1700606 СССР, МКИ Н 01 F 7/06. Обмотка электромагнита / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 3 с.: ил.

57. А.с. 1728894 СССР, МКИ Н 01 F 27/28. Обмотка электромагнита / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 3 с.: ил.

58. А.с. 1786727 СССР, МКИ В 03 С 1/10. Электромагнитный шкив железоотделителя / М.В.Загирияк и др. (СССР). - 3 с.: ил.

59. Электромагнитный шкив железоотделителя. Положительное решение ГНТЭИ СССР от 19.12.90 по заявке № 4856189/03 от 07.06.90 / М.В.Загирияк и др.

60. Электромагнитный шкив железоотделителя. Положительное решение ГНТЭИ СССР от 19.12.90 по заявке № 4840492/03 от 18.06.90 / М.В.Загирияк и др.

61. Электромагнитный шкив железоотделителя. Положительное реше-

ние ГНТЭИ СССР от 26.03.91 по заявке № 4849060/03 от 08.05.90 / М.В.Загирняк и др.

62. Zagirnyak M.V., Branspiz Yu.A. Refirement of stohastic model of gravitational Coal preparation based on Einstein-Fokker-Plunk equation // New trends in coal preparation technologies and equipment: Preprints of the XII-th International Coal Preparation Congress. - Cracow, 1994. - P. 231-241.

63. Zagirnyak M.V., Branspiz Yu.A. Creation of highly-effective electromagnetic separators for coal belt conveyers // New trends in coal preparation technologies and equipment: Preprints of the XII-th International Coal Preparation Congress. - Cracow, 1994. - P.713-721.

64. Загирняк М.В. Определение условий применимости уравнения Эйнштейна-Фоккера-Планка к описанию процессов разделения сыпучих материалов // Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1990. - Деп. в УкрНИИНТИ 11.12.90. - №2024-Ук90. - 26с.

65. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Создание высокоэффективных электромагнитных шкивных сепараторов для ленточных конвейеров // Восточноукр. гос. ун-т. - Луганск, 1994. - Деп. в ГНТБ Украины 28.08.94. - № 1730-Ук94. - 9 с.

66. Zagirnyak M.V., Branspiz Yu.A. Application of magnetic modulus for magnetic fields calculation of the electromagnetic systems // Matherialy IV Sympozjum Srodowiskowe "Zastosowania Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Technologiach". - Lancut, 1994. - P. 21-22.

Особистий внесок. Основні результати дисертації були одержані особисто автором. З усіх публікацій 11 основних виконано особисто дисертантом, а в публікаціях [5-8,10-12,14,18-20,22-27,31,35,40-44,62,63,65,66] із співавторами (аспірантами, пошукачами, стажерами), котрі працювали чи працюють під науковим керівництвом автора, йому належать поставлення завдань, розробка фізичних і розрахункових моделей, постановка експерименту, узагальнення (систематизація), аналіз результатів і формулювання висновків; у роботах [13,16,17,30,33,34,36,39,45] - фізичне моделювання, розрахунок, експериментальні дослідження, узагальнення результатів, написання; у роботах [15,28,29,32,37,38] - участь у розробці математичних моделей, розрахунків, експериментів, аналізу результатів і написанні (авторські права поділено порівну); в роботі [46] - головна визначальна ознака; у роботах [46-61] - ідея винаходу і визначальні ознаки.

М.В. Загирняк

ANNOTATION

Zaginyak M.V. Pulley magnetic separators (theory, calculation, improvement). The thesis for a Doctorate competition in Engineering on the speciality 05.09.06 - electrical apparatus, Kharkov State Politechnical University, Kharkov, 1996.

106 scientific works and 35 autor's certificates are defended. They include the problem solution of the development and generalization of the pulley magnetic separator design methodology by means of specification and development of the theory and calculation methods of their main parameters and characteristics. There proposed some improvement of the existing pulley separators and there developed new design of highly effective and economical ones. Their industrial introduction is realized. The information on effectiveness of apparatus introduction in the process of operation is given.

АННОТАЦІЯ

Загірняк М.В. Шківніе магнітніе сепараторы (теорія, расчeт, усовершенствование).

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.06 - электрические аппараты, Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1996.

Защищается 106 научных работ и 35 авторских свидетельств, которые содержат решение задачи развития и обобщения методологии проектирования шкивных магнитных сепараторов путем уточнения и разработки теории и методов расчета их главных параметров и характеристик. Предложены усовершенствования существующих и разработаны новые конструкции высокоэффективных и экономичных шкивных магнитных сепараторов. Осуществлено их промышленное внедрение. Приводятся данные об эффективности внедренных аппаратов в процессе эксплуатации.

Ключові слова:

ШКІВНИЙ МАГНІТНИЙ СЕПАРАТОР, РОЗРАХУНКИ МАГНІТНИХ ПОЛІВ І КІЛ, ВИДОБУВНА СИЛА, ДИНАМІКА РУХУ ТІЛА, ОПТИМІЗАЦІЯ.

448778

AB 34.487

AB 34.487