

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Румницького Дмитра Олександровича
на тему «Обґрунтування технологічних параметрів гравітаційного збагачення
магнетитових кварцитів у спіральних сепараторах»,
яка представлена на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань
18 – Виробництво та технології за спеціальністю 184 – «Гірництво»

Актуальність теми дисертації.

Сучасний вектор модернізації технологічних схем рудопідготовки на гірничо-збагачувальних підприємствах вимагає ширшого впровадження високоефективних та екологічно безпечних методів розділення мінеральних компонентів. Серед них особливе місце посідає спіральна сепарація, яка характеризується низькою енергомісткістю, високою експлуатаційною надійністю та повною відсутністю хімічних реагентів. Водночас максимальна реалізація потенціалу цього методу під час переробки тонкодисперсних магнетитових кварцитів стримується складністю прогнозування поведінки мінеральних зерен у криволінійних потоках обмеженої товщини.

Сформульовані в дисертації наукові положення створюють надійне теоретичне підґрунтя для розрахунку параметрів гравітаційного збагачення руд. Розроблені автоматизовані чисельні моделі та виявлені залежності дозволили автору обґрунтувати прикладні технологічні рішення та надати залізорудним комбінатам чіткі рекомендації для оптимізації роботи спіральних сепараторів. Завдяки цьому забезпечується стабільне підвищення якості залізорудного концентрату та зростання рівня вилучення корисного компонента при одночасному зниженні екологічного навантаження на довкілля.

Таким чином, дисертаційне дослідження, що містить вагомі теоретичні узагальнення та вирішує важливу прикладну задачу підвищення ефективності збагачення магнетитових руд, безсумнівно є актуальним і своєчасним.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Високий рівень вірогідності представлених у дисертації результатів базується на фундаментальному аналізі сучасного літературного базису та інформаційних джерел за профілем дослідження. Надійність отриманих автором даних забезпечена суворою послідовністю реалізації визначеної мети та взаємопов'язаних завдань, а також коректністю вихідних припущень і граничних умов при формулюванні математичних задач. Наукова методологія здобувача спирається на застосування класичних та передових загальноприйнятих методів дослідження.

Адекватність розроблених математичних моделей, що описують і прогнозують показники процесу сепарації, підтверджується їх високою збіжністю з експериментальними даними, які були зафіксовані під час

лабораторних експериментів та напівпромислових випробувань. Сформульовані у роботі кінцеві висновки відзначаються об'єктивністю, логічною послідовністю, повністю впливають із результатів проведених досліджень і повною мірою вирішують поставлені науково-прикладні завдання.

Новизна результатів дисертації полягає в наступному:

1. Вперше при спіральній гравітаційній сепарації магнетитової пульпи, як двофазної суміші мінеральних частинок та рідини, запропоновано новий спосіб розрахунку ефективної в'язкості пульпи, який враховує полімодальний гранулометричний склад суспензії, стисненість рідини в міжчастковому просторі та вплив форми частинок, що дозволило оцінити підвищення ефективності розділення магнетиту та кварцу на 0,18-0,21 за рахунок зменшення ефективної в'язкості пульпи у потоці на поверхні спірального сепаратору.

2. Вперше доведено, що швидкість руху частинок різної крупності магнетитової суспензії при її збагаченні у спіральному сепараторі визначається кінематичною в'язкістю суспензії і залежить від змінення температури, що дозволило визначити показники збагачення магнетитової руди й уникнути додаткових втрат цінних компонентів, а саме максимальне вилучення заліза у концентрат 74,08-82,08 % при масовій частці заліза загального 68,05-69,03 % мають місце в визначеному оптимальному діапазоні температури пульпи – 28 - 30 °С.

3 Вперше для прогнозування сегрегації частинок у спіральних сепараторах при збагаченні магнетитових руд розроблена методика моделювання спіральної сепарації, яка ґрунтується на застосуванні математичного апарата методів чисельної гідродинаміки за рахунок застосування ейлерової мультифлюїдної моделі VOF з урахуванням підйомної сили Багнольда, що дозволила визначити гідродинамічні параметри потоку суспензії, а саме зменшення кривизни профілю поперечного перерізу спірального жолоба з параболічною геометрією поперечного перерізу до слабо похилого, сприяє збільшенню ефективності сегрегації дрібних фракцій мінеральних частинок на 5,48-7,45%.

4 Вперше при гравітаційному збагаченні магнетитових руд у спіральних сепараторах на підставі чисельного моделювання потоку твердих частинок встановлені закономірності сегрегації мінеральних частинок за густиною та висотою спірального потоку малої товщини, що дозволило підвищити ефективність процесу сегрегації мінеральних частинок з 0,69 до 0,87 при збільшенні масової частки твердого в живленні з 20 % до 35 % при використанні спірального сепаратору з параболічною геометрією поперечного перерізу і з 0,73 до 0,94 у разі використання сепаратору з профілем поперечного перерізу у вигляді кривої слабо похилої.

Високий рівень вірогідності представлених у дисертації результатів базується на фундаментальному аналізі сучасного літературного базису та інформаційних джерел за профілем дослідження. Надійність отриманих автором даних забезпечена суворою послідовністю реалізації визначеної мети та взаємопов'язаних завдань, а також коректністю вихідних припущень і граничних умов при формулюванні математичних задач. Наукова методологія

здобувача спирається на застосування класичних та передових загальноприйнятих методів дослідження.

Прикладна цінність дисертаційного дослідження полягає у безпосередній можливості масштабування та впровадження розроблених наукових рішень у промислову практику збагачення магнетитових кварцитів із використанням спіральних апаратів.

До головних результатів роботи, що мають важливе прикладне значення, належать:

- Розроблено комплексну методику для кількісного оцінювання та прогнозування показників сегрегації мінеральних зерен. Створені алгоритми розрахунку ефективної в'язкості пульпи та чисельного CFD-моделювання дозволяють виконувати прецизійне налаштування гідродинамічних режимів і геометрії робочих поверхонь спіральних сепараторів. Це забезпечує мінімізацію втрат магнетиту з хвостами, підвищення кондицій концентратів та дає змогу виключити з технологічних схем капіталомісткі та екологічно навантажені операції (зокрема, доводку флотацією).

- На основі узагальнення теоретичних та експериментальних даних удосконалено технологію гравітаційного збагачення залізорудної сировини. Інтеграція спірального сепаратора у схему рудопідготовки дозволила зменшити навантаження на стадію подрібнення на 10–12%, забезпечивши отримання високоякісного продукту з масовою часткою $F_{\text{езаг}}$ понад 67% та вмістом кремнезему SiO_2 менше 2%.

- Запропоновані технічні рішення пройшли успішне випробування та впровадження на провідних підприємствах галузі (АТ «ПІВДЕННИЙ ГЗК» та ПрАТ «ЦЕНТРАЛЬНИЙ ГЗК»). Нова технологічна схема, що передбачає спільну обробку важкої фракції спіральної сепарації зі зливом гідроциклонів, дозволяє отримувати два види товарної продукції:

1. *Високоякісний концентрат (вихід 50,32%)*: із масовою часткою загального заліза 70,6% та діоксиду кремнію 1,98%.
2. *Другий товарний концентрат (вихід 49,68%)*: із масовою часткою загального заліза 69,87% та діоксиду кремнію 3,22%.

Сумарний підтверджений річний економічний ефект від реалізації розроблених у дисертації рекомендацій становить 90 355 061 грн, що переконливо свідчить про високу виробничу значущість роботи та її спрямованість на підвищення конкурентоспроможності гірничо-металургійного комплексу України.

Постановлені в дисертаційній роботі наукові завдання виконано у повному обсязі, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Румницького Д.О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 184 Гірництво та напрямкам виконання науково-дослідних робіт у Криворізькому національному університеті.

За результатами перевірки дисертаційної роботи на плагіат, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Румницького Д.О. є результатом самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, фабрикації, плагіату та запозичень.

Мова та стиль викладання результатів. Дисертаційна робота написана українською мовою. Викладення матеріалів відзначається логічною послідовністю, стиль написання є науковим з урахуванням міжнародної та вітчизняної термінології.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел зі 128 найменувань на 14 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 223 сторінок, зокрема 197 – основного тексту. Дисертація містить 42 рисунків, 36 таблиць.

У вступній частині автор обґрунтовує актуальність обраного наукового напрямку, визначає об'єкт, предмет, мету та комплекс дослідницьких завдань. Окреслено методологічну базу роботи, висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, що в сукупності дає чітке уявлення про структуру та логіку дисертаційного дослідження.

Розділ 1 роботи присвячено систематизації та критичному перегляду наявних теоретико-експериментальних здобутків у галузі гвинтової сепарації. Автор детально розглянув класичні й сучасні праці вітчизняних та закордонних учених, присвячені гідродинаміці та сегрегаційним процесам у тонкошарових потоках. Доведено, що потенціал гравітаційного розділення тонких фракцій залізних руд реалізовано не повністю через недостатнє врахування реологічних властивостей пульпи (зокрема, в'язкості) та специфіки поведінки дрібних частинок. Зроблено висновок про доцільність залучення інструментів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для моделювання та прогнозування показників сепарації, що логічно визначає подальші завдання дисертації.

Дослідження Розділу 2 спрямовано на вивчення закономірностей зміни в'язкості дисперсних систем як базового чинника, що регулює розпушення та швидкість осадження мінеральних зерен. З'ясовано, що на ефективну в'язкість магнетитових пульп суттєво впливає не лише об'ємна концентрація, а й гранулометричний склад та морфологія частинок. Встановлено інверсний зв'язок між в'язкістю суспензії та наявністю великих класів ($>0,1$ мм). Доведено, що шлами ($<0,1$ мм) викликають стрімке зростання опору течії за значно менших концентрацій. Експериментально доведено критичний вплив температури рідкої фази: зниження температури води до 5°C (характерне для зимового періоду) підвищує в'язкість майже вдвічі, погіршуючи селективність розділення. Визначено раціональний температурний інтервал ($28\text{--}50^{\circ}\text{C}$).

Розділ 3 містить теоретичне ядро дисертації - розробку та верифікацію математичних моделей руху багатофазного потоку.

На основі рівнянь Нав'є-Стокса (модифікованих під багатофазність та турбулентність) у середовищі FreeFEM++ створено тривимірну модель течії.

Особливу увагу приділено врахуванню підйомної сили Багнольда, що дозволило адекватно описати вертикальне та радіальне розшарування зерен

кварцу й магнетиту. Комп'ютерне моделювання підтверджено лабораторними тестами (розбіжність до 3,6%). Показано, що перехід від параболічного профілю жолоба (сепаратор СВШ-2-1000) до слабо похилого дозволяє знизити втрати корисного компонента з 12,5% до 3%.

У завершальному розділі 4 представлено результати перевірки теоретичних висновків у промислових умовах ЗФ ПРАТ «ЦГЗК» та оцінку їхньої ефективності. Доведено доцільність сепарації вузьких за крупністю продуктів. З пісків класифікації отримано кондиційний концентрат із масовою часткою Fezag > 68%. Використання підрешітного продукту тонкого грохочення дозволило виділити високоякісний концентрат із масовою часткою SiO₂ < 2% без флотаційного доведення. Підтверджено, що взимку через охолодження пульпи вилучення заліза падає на 11,54%, що вимагає технологічного контролю реології. Запропоновано схему роздільного формування двох товарних концентратів (із вмістом заліза 70,6% та 69,87%). Очікуваний річний економічний ефект від модернізації становить 90,36 млн грн.

У прикінцевій частині узагальнено наукові та практичні результати роботи, які повністю вирішують поставлені завдання. Додатки містять офіційні акти впровадження розробок у виробництво, програми випробувань та первинні дослідні дані, що підтверджують достовірність матеріалів дисертації.

Дисертація є цілісним науковим дослідженням, у якому вирішено важливе науково-практичне завдання щодо вдосконалення технологічних процесів гравітаційного збагачення магнетитових кварцитів. Наукова новизна роботи ґрунтується на розробці комплексних рекомендацій для впровадження гвинтової сепарації, що базуються на визначенні реологічних характеристик пульпи (з урахуванням впливу температурного режиму та гранулометричного складу на в'язкість) та результатах чисельного моделювання гідродинамічних процесів сегрегації мінеральних частинок. Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог МОН України від 12 січня 2017 року №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації»

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Повноту викладу матеріалів дисертації підтверджують 5 наукових робіт, опублікованих здобувачем. Науковий доробок містить 4 статті, які вийшли друком у затверджених МОН України фахових журналах, та 1 статтю у міжнародному виданні, що індексується базою даних Scopus (квартиль Q4), що засвідчує належний рівень апробації дослідження. Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях: на міжнародних науково-технічних конференціях «Розвиток промисловості і суспільства» (м. Кривий Ріг, 2025–2026 pp.), «І Всеукраїнська студентська науково-практична WEB конференція "Технології гірництва –виклики, перспективи, інновації"» (м. Кривий Ріг, 2026 p), «Future of science: innovations and perspectives. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference». (Stockholm, Sweden. 2025).

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Згідно матеріалу, наданого у розділі 1 необхідно уточнити, у чому полягає наукова проблема, яка залишається невирішеною, які суперечності Ви виявили в літературних джерелах.
- 2 Для опису залежності надлишкової в'язкості суспензії (розділ 2) використано модель, де в'язкість обернено пропорційна об'єму вільної рідини. Чому у роботі не були використані класичні степеневі реологічні моделі (наприклад, Оствальда-де-Віля чи Гершеля-Балклі), які стандартно застосовуються для неньютонівських рідин у гідродинаміці.
- 3 Для відстеження вільної поверхні «поверхня розділу повітря-пульпу» застосована компресійна схема другого порядку на основі обмежувачів нахилу (рівняння 3.14). Це стандартний прийом для чистих рідин. Але при збагаченні магнетитових руд на спіральних сепараторах поблизу внутрішнього борту утворюється щільний напіврухливий придонний шар з важких частинок, що осіли (так званий "ліжко" сепаратора). Потребує роз'яснення як компресійна схема VOF справляється з ситуацією, коли тверді частинки магнетиту "проривають" вільну поверхню або істотно змінюють її в'язкість. Чи не виникало чисельної нестабільності (осциляцій) інтерфейсу.
4. Моделювання тонкоплівкових течій з вільною поверхнею, обтяжених багатофазним континуумом і силами Багнольда, критично залежить від параметрів дискретизації простору. Враховуючи, що геометрія поперечного перерізу спірального сепаратора має складну форму (змінюється від параболическої до слабопохилої), а товщина потоку мінімальна, потребує роз'яснення як вирішувалася проблема сіткової незалежності результатів. Скільки елементів сітки знадобилося по висоті плівки для адекватного дозволу градієнта швидкості зсуву, від якого залежить сила Багнольда (3.19–3.20).
5. Наприкінці розділу 4 порівнюється два варіанти технологічних схем і рекомендується до впровадження варіант 2, який передбачає об'єднання важкої фракції спіральної сепарації та зливу гідроциклону з отриманням концентрату вищого сорту із виходом 50,32%. Потребує обґрунтування чому саме цей варіант визнано оптимальним, якщо за Варіантом 1 (де об'єднується легка фракція сепарації та злив гідроциклону) заявляється колосальний річний економічний ефект у розмірі понад 88 млн грн.
6. У науковій новизні доведено, що оптимальний діапазон температури становить 28–30 °С. Яка техніко-економічна доцільність підігріву води у промислових масштабах збагачувальних комбінатів (наприклад, ЦГЗК чи ПВДЗК) взимку. Чи перебиває отриманий ефект (зниження втрат заліза на 11.54%) енергетичні витрати на теплоносії?
7. Зазначено, що для матеріалу крупністю 80% класу -0,044 мм різке зростання в'язкості настає за концентрації понад 40%. Як саме змінюється характер руху

пульпи у малому шарі спірального сепаратора, якщо цей поріг у 40% буде випадково перевищено внаслідок коливань густини живлення на фабриці?

Проте, зазначені зауваження не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи. Результати роботи є новими та оригінальними.

Загальний висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота Румницького Дмитра Олександровича на тему «Обґрунтування технологічних параметрів гравітаційного збагачення магнетитових кварцитів у спіральних сепараторах» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням. Отримані в дисертаційній роботі результати є новими та належать безпосередньо автору, а результати досліджень інших авторів наведені з відповідними посиланнями на них.

Дисертаційна робота за практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи пр. присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Здобувач Румницький Дмитро Олександрович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 18 – Виробництво та технології за спеціальністю 184 «Гірництво».

Офіційний опонент

Завідувач відділом термогазодинаміки
енергетичних установок Інституту технічної
механіки Національної академії наук України
і Державного космічного агентства України

.....Наталія ПРЯДКО

Вчений секретар ІТМ НАНУ і ДКАУ, к.т.н.



Людмила ЛАПІНА