

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра
зі спеціальності 184 “Гірництво” ОПП «Відкриті гірничі роботи»

На тему: **«Дослідження параметрів процесу драгування при розробці
залізовмісних хвостосховищ»**

Виконав ст. групи ГІВ-24-1м _____

/Коломієць С.В./

Керівник _____

/Григор'єв Ю.І./

Завідувач кафедри _____

/Жуков С.О./

Кривий Ріг

2025 р.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Дослідження параметрів процесу драгування при розробці залізовмісних хвостосховищ» викладена на 52 стр., містить 8 рис., 4 таблиці, 48 джерел літератури.

Актуальність теми дослідження, зокрема, для умов Кривбасу, зумовлена сукупністю ресурсних, технологічних, екологічних і соціально-економічних чинників, що безпосередньо впливають на стійкість регіональної мінерально-сировинної бази та конкурентоспроможність гірничо-металургійного комплексу.

Хвостосховища гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу є фактично техногенними родовищами з істотними сумарними запасами тонкодисперсних залізовмісних продуктів (магнетитових і гематитових класів), акумульованих упродовж десятиліть роботи збагачувальних фабрик. У структурі комплексу рудопотоків вони формують альтернативне джерело залізорудної сировини без витрат на розкривні роботи й із використанням наявної переробної інфраструктури. В умовах волатильності світових цін на концентрат і зростання капітальних витрат на приріст видобутку у глибоких кар'єрах, повернення до техногенної сировини є економічно виправданим шляхом продовження ресурсної бази регіону.

Дражна розробка як гідромеханізований відбір підводно-осадженого матеріалу з формуванням пульпи й гідротранспортуванням технологічно узгоджується з гранулометричними та речовинними особливостями хвостів: переважанням тонких і дуже тонких класів, наявністю значної частки магнітних фракцій, підвищеною питомою поверхнею й специфічною реологією. Земснарядні комплекси дозволяють точно керувати глибиною забору, концентрацією твердої фази в пульпі, швидкістю подачі, напором і режимами перекачування, що критично для подальших операцій

класифікації, згущення та магнітної сепарації. Таким чином, коректний вибір і обґрунтування параметрів драгування – тип і параметри ґрунторіза, продуктивність насоса, діаметр і довжина пульпопроводу, критична швидкість потоку, робоча концентрація твердого – безпосередньо визначають відновлюваний вихід товарного заліза та енергоемність усього циклу.

Таким чином, дослідження, спрямоване на дослідження зв'язків параметрів драгування при розробці залізовмісних відходів є надзвичайно важливим і актуальним.

Мета й завдання роботи. Метою даного магістерського дослідження є наукове обґрунтування оптимальних параметрів процесу драгування при розробці залізовмісних хвостосховищ. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані **основні задачі дослідження:**

1. Виконати аналіз теорії і практичного досвіду дражної розробки залізовмісних хвостосховищ.
2. Визначити сучасний стан мінерально-сировинної бази, представленої залізовмісними хвостосховищами.
3. Визначити оптимальні параметри технологічного процесу драгування залізовмісних пісків для умов хвостосховищ Кривбасу.

Об'єкт дослідження – технологічний процес драгування залізовмісних пісків.

Предмет дослідження – взаємозв'язки параметрів процесу драгування залізовмісних пісків хвостосховищ.

Ідея. Підвищити ефективність процесу драгування залізовмісних пісків за рахунок вибору оптимальних параметрів роботи коронки земснаряду і гідравлічного транспорту.

Методи дослідження. Аналіз і синтез літературних джерел – для вивчення теорії і практики дражного відпрацювання хвостосховищ; метод математичного моделювання – для встановлення залежностей параметрів роботи земснаряду і насосно-трубопровідного комплексу.

Наукове значення роботи полягає у аналізі теорії і практики процесу драгування залізовмісних пісків, а також математичному моделюванні режиму роботи земснаряду в комплексі з гідравлічним транспортом.

Практичне значення роботи полягає у встановленні оптимальних розмірів коронки, швидкості її обертання, діаметру труби гідравлічного транспорту і швидкості руху суміші для умов залізовмісних хвостів Кривбасу.

ЗЕМСНАРЯД, ДРАГУВАННЯ, ГІДРОТРАНСПОРТ,
ХВОСТОСХОВИЩЕ, ЗАЛІЗОВМІСНІ ПІСКИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ І МЕТОДІВ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ХВОСТОСХОВИЩ	8
1.1 Аналіз існуючих комплексів механізації драгування при розробці родовищ	8
1.2 Аналіз теоретичного забезпечення дражної розробки родовищ	17
1.3 Аналіз досвіду розробки залізовмісних хвостосховищ	20
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННОЇ БАЗИ КРИВБАСУ, ПРЕДСТАВЛЕНОЇ ЗАЛІЗОВМІСНИМИ ХВОСТОСХОВИЩАМИ	31
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ДРАГУВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ХВОСТОСХОВИЩ	38
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	48

ВСТУП

Гірничодобувна промисловість є базовою складовою економічного відновлення України, оскільки визначає валютну виручку, завантаження металургійного ланцюга та локалізацію високопродуктивної зайнятості. У цьому контексті Кривбас виступає системоутворювальним ядром, здатним забезпечити стабільний рудопотік навіть за волатильності зовнішніх ринків.

Перспективи розвитку мінерально-сировинної бази регіону сьогодні пов'язані не лише з поглибленням діючих кар'єрів при зростаючих коефіцієнтах розкриття, а передусім із залученням техногенних родовищ — хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів, де протягом десятиліть акумульовано значні обсяги тонкодисперсних магнетитових і гематитових фракцій з потенціалом повторного вилучення заліза. Технологічна перевага цього напрямку полягає в узгодженні речовинного складу і гранулометрії хвостів із наявними збагачувальними схемами Кривбасу (низькоінтенсивна та високоградієнтна магнітна сепарація, класифікація, згущення), що знижує вхідні бар'єри й дає змогу оперативно налаштовувати шихту без додаткового розкриття. У такій парадигмі предметом дослідження стає дражна виїмка як керований гідромеханізований процес забору підводно-осажденного матеріалу з формуванням пульпи цільових параметрів та її гідротранспортуванням до фабричних вузлів.

Контрольоване вилучення та повторна переробка хвостів знижують пиління на відкритих «сухих» картах, зменшують навантаження на дамбові споруди, мінімізують ризики вторинного забруднення поверхневих і підземних вод, а також вивільняють площі для подальшої технічної й біологічної рекультивації. Гідромеханізований спосіб має нижчі показники пилогазовиділення порівняно з екскаваторно-автомобільною технологією у відкритому контурі, а також створює передумови для замкнених водооборотних циклів із поверненням оборотної води на фабрики. У

підсумку це сприяє досягненню цілей циркулярної економіки, декарбонізації та скорочення «водного сліду» продукції.

Освоєння техногенних родовищ через драгування забезпечує додаткове завантаження місцевих сервісних компаній, стимулює розвиток інжинірингу гідромеханізованих робіт, підвищує технологічну самостійність регіону, створює робочі місця з вищим рівнем доданої вартості та покращує податкову базу громад. В умовах післявоєнного відновлення України це формує «швидкі перемоги» у реіндустріалізації без довгих циклів розвідки та будівництва нових гірничих об'єктів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ І МЕТОДІВ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ХВОСТОСХОВИЩ

1.1 Аналіз існуючих комплексів механізації драгування при розробці родовищ

На сьогоднішній день під процесом драгування у гірничій термінології мають на увазі гідромеханізовану виїмку підводно-осаджених порід (піски, намули, тонкодисперсні шлами, хвости збагачення) з формуванням пульпи заданих параметрів і її гідротранспортуванням до місця складування чи переробки. Це не тільки операція зрізання ґрунту, а весь технологічний цикл: розпушення/різання, всмоктування суміші, перекачування пульпопроводом, керування концентрацією твердої фази, а за потреби – проміжна класифікація та повернення води.

Зазвичай, у сучасній практиці драгування здійснюється саме земснарядами (різцево-всмоктуючими, шнековими, інколи – з заглибними насосними головками). Історично слово «драга» позначало ковшову машину безперервної дії з підйомом твердої фази на палубу, але сьогодні в професійному вжитку термін «драгування» закріпився як родове позначення гідромеханізованих підводних робіт [1]. Тому для відпрацювання хвостосховищ, з їхньою тонкодисперсною, часто тиксотропною пульпою, під «драгуванням» зазвичай мають на увазі саме роботу земснарядних комплексів із різцевою або шнековою головкою та насосно-пульпопровідною системою. Ковшові драги застосовують рідше, у нішевих випадках (грубозернисті прошарки розсипів із потребою жорсткої селективності на борту).

Комплекси механізації драгування для залізовмісних хвостосховищ доцільно розглядати від базового рівня – типів земснарядів і їхніх робочих органів – до насосно-транспортних контурів, систем позиціонування/вимірювання та берегових вузлів згущення й повернення води.

Базовий клас – різцевий земснаряд стаціонарного типу (англ. Cutter Suction Dredger, далі – різцевий земснаряд), що поєднує механічне розпушення (різцева головка або фреза), всмоктування суміші та її гідротранспортування трубопроводом на карту наживу чи у фабричні апарати (рис. 1.1).



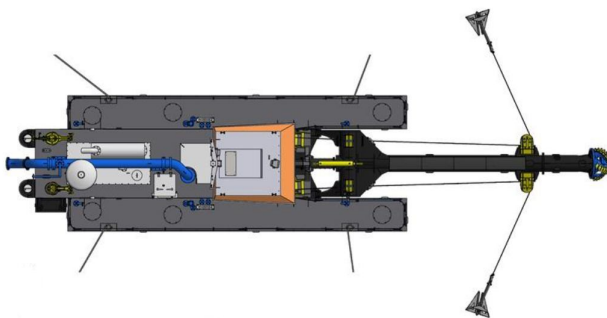
Рис. 1.1 – Найбільша драга у світі “Mashhour” [1]

Його кінематична схема – робота «навколо спуд-палі» (опорного стояка) із хитанням за бортові якорні лінії. Така схема забезпечує керовану траєкторію різання і точне дотримання проєктної поверхні [1, 2]. У промислових лінійках (наприклад, типоряди Beaver) різцеві земснаряди покривають діапазон глибин виїмки від приблизно 6 до 18–20 метрів у «кар’єрному/внутрішньому» класі; типові діаметри всмоктувальної/нагнітальної ліній – 250–650 мм; встановлена потужність – від сотень кіловат до кількох мегават залежно від типорозміру та ґрунтових

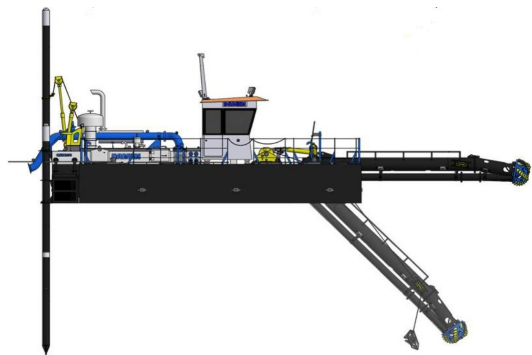
умов [3]. Для компактного класу CSD 250 (рис. 1.2), що саме характерний для хвостостосховищ, паспортні параметри становитимуть: максимальна глибина виїмки 6 м, діаметр трубопроводів 250 мм, продуктивність суміші до 1000 м³/год, різцева потужність 40 кВт, діаметр корони близько 0,95 м; конструкція секційна, придатна до транспортування контейнерним форматом і швидкого монтажу [4].



а)



б)



в)

Рис. 1.2 – Землесосна машина Cutter Suction Dredger 250: а) загальний вид; б) вид зверху; в) вид збоку

Типова класична драга, представлена багатоковшовою виймальною машиною, схематично наведена на рис. 1.3.

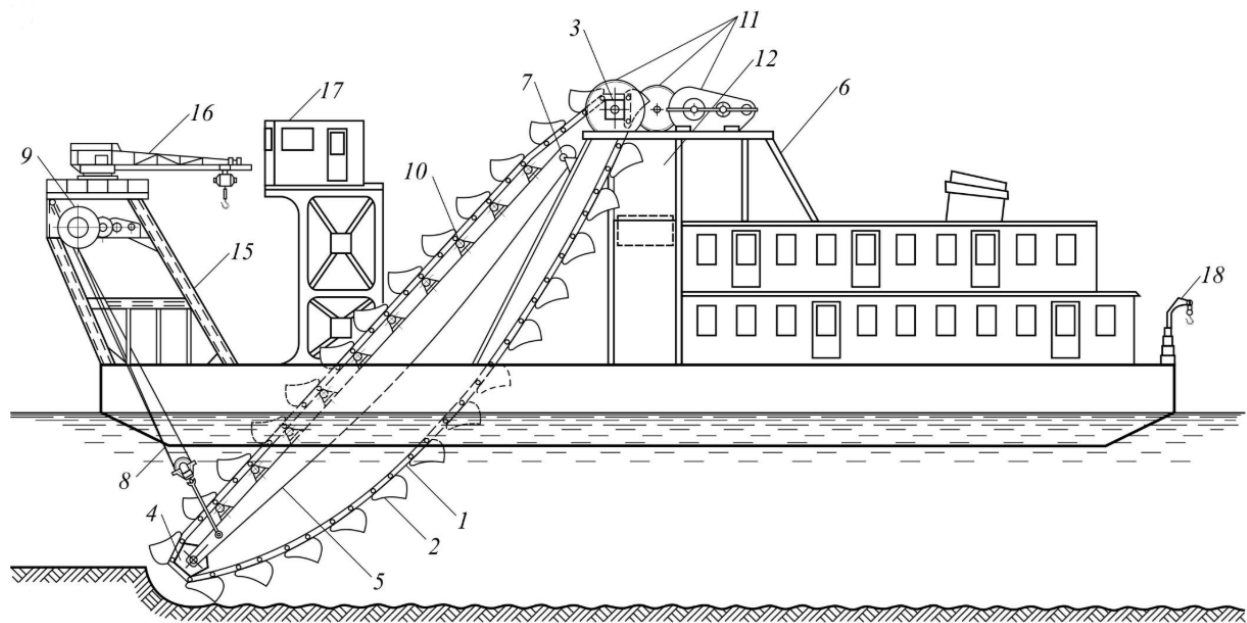


Рис. 1.3 – Схема багаточерпакового снаряда: 1 – черпаковий ланцюг; 2 – черпак; 3 – верхній барабан; 4 – нижній барабан; 5 – черпакова рама; 6 – черпакова вежа; 7 – підшипник підвісу; 8 – рамопідйомний трос; 9 – рамопідйомна лебідка; 10 – роликовий схил; 11 – черпаковий привід; 12 – ґрунтова криниця; 13 – розподільний клапан; 14 – ґрунтовий лоток; 15 – підйомна станина (копер); 16 – кран; 17 – пост управління; 18 – кран-балка.

Принцип дії багаточерпакового снаряда такий. Після постановки судна в робоче положення оператор з поста управління (17) подає команди на рамо підйомну лебідку (9), яка через рамо підйомний трос (8) плавно опускає черпакову раму (5) з установленим на ній черпаковим ланцюгом (1) у зону вибою. Поворот і кут «копра» (підйомної станини) (15) фіксують по шкалі глибин, опора здійснюється через підшипник підвісу (7) на черпаковій вежі (6), що забезпечує вільний хід рами під час коливань корпусу. Після підтвердження безпечного положення вмикають черпаковий привід (11), який через редуктор/ланцюгову передачу розкручує верхній барабан (3); ланцюг (1) набігає на верхній барабан (3), проходить по роликовому схилу (10) та обгинає нижній барабан (4), формуючи безперервну циркуляцію. Під час руху кожен черпак (2) на нижній гілці входить у ґрунт під заданим кутом

атаки, відокремлює порцію породи та підіймає її вгору по черпаковій рамі (5); роликовий схил (10) підтримує навантажену гілку, зменшуючи згинальні моменти та вібрації. На гребені, в зоні верхнього барабана (3), черпаки (2) перевертаються і самоскидаються: матеріал спрямовується в ґрунтову криницю (12) або на ґрунтовий лоток (14) залежно від положення розподільного клапана (13). При подачі в ґрунтову криницю (12) здійснюють завантаження у приймальний бункер/баржу чи вузол пульпування з подальшим транспортуванням; при подачі на лоток (14) — матеріал спрямовується на конвеєр/сортування або у відвал за проектом. Підтримання продуктивності здійснюють регулюванням швидкості черпакового приводу (11) та глибиною занурення рами (5) за допомогою лебідки (9); положення контролюють за індикаторами на посту (17). Для обслуговування й заміни черпаків (2) та секцій ланцюга (1) використовують кран-балку (18) і палубний кран (16), що дозволяє безпечно виконувати натяжку, перестановку та ремонт. Під час переходів між захватками раму (5) підіймають лебідкою (9) до транспортного положення, фіксують у підшипнику підвісу (7), а швидкість приводу (11) зменшують до мінімуму або вимикають. Аварійна зупинка передбачає негайне вимкнення приводу (11), підйом рами (5) до безпечної позначки й переведення розподільного клапана (13) у положення, що виключає засмічення ґрунтової криниці (12) і лотка (14); після зупинки перевіряють стан барабанів (3, 4), роликового схилу (10) і натяг ланцюга (1). За циклом параметри — швидкість ланцюга, глибина та кут копра (15), продуктивність і напрям відводу породи — підтримуються в межах, указаних у технологічному регламенті для забезпечення сталої якості вибою та мінімального зношення вузлів.

На рис. 1.4 наведена фотографія загального виду відповідної установки.



Рис. 1.4 – Загальний вид багаточерпакового снаряду

Робочі органи землесосних машин добираються за гранулометриєю й когезією: коронка з зубцями для щільних пісків та суглинків; колесовидні головки – для нерівномірних відкладів; допоміжні гідромоніторні форсунки – для флюїдизації тиксотропних шламів і зменшення енергії різання. Теоретичний розрахунок питомої енергії, сил різання і селективності знімання шару ґрунту виконують за узагальненою моделлю DSCRC (модель «піску–глини–скелі» Делфта) з урахуванням кута атаки, глибини врізання, швидкості різання та параметрів ущільнення середовища; це дозволяє мінімізувати надлишкову шламізацію при стабілізації крупності цільової фракції [5].

Насосно-пульпопровідна підсистема формує енергетику комплексу та обмеження по режимах. Для відцентрових ґрунтових насосів ключовими є залежності подачі–напору–потужності, кавітаційний запас (NPSH, запас проти кавітації на вході) і вплив твердої фази на ККД та зношення. У розрахунках транспортування пульп із твердою фазою застосовують перевірені підходи Вілсона–Едді–Селгрена–Кліфта (емпіричні та напівемпіричні модуляції до рівнянь втрат напору для сумішей), що задають

ефективні межі швидкостей і концентрацій з огляду на енергетику та ресурс проточної частини [6]. Для забезпечення безвідкладного руху частинок застосовують рамку DHLLDV (The Delft Head Loss & Limit Deposit Velocity): параметризація втрат і граничної швидкості осідання (LDV) як функції крупності, щільності частинок, об'ємної концентрації твердої фази та діаметра труби. Для шламових хвостів вводять реологічні поправки (в'язкопластична поведінка), що впливають на вибір робочої швидкості й напорів [7]. На довгих трасах використовують проміжні підсилювальні насосні станції контейнерного виконання. Типовий модуль зі з'єднанням на 500-мм лінію має імпелер діаметром близько 1175 мм, встановлену потужність близько 950 кВт, продуктивність до 4000 м³/год і транспортні габарити приблизно 9,1×2,44×2,90 м – це спрощує переміщення та пересування вздовж траси [8]. Альтернативні виконання підсилювачів того ж класу потужності (порядку 895 кВт) надають виробники земснарядів для уніфікації з основним флотом і сумісності автоматики [9].

Матеріали трубопроводів і арматури критично впливають на гідравліку та знос. У ставково-дамбових системах дедалі ширше застосовують поліетиленові напірні лінії (PE 100) у плавучому виконанні на поплавках: менша маса на погонний метр, краща корозійна стійкість і допустимі малі радіуси трасування поворотів за умови належного кріплення й опор – стандартизовані практики монтажу «спливання–затоплення» і надґрунтового укладання докладно описані профільними інститутами [10; 11]. В місцях інтенсивного абразиву (коліна, трійники, засувки) застосовують зносостійкі матеріали та змінні вставки; контрольні вузли – відбірні штуцери тиску, датчики температури, витрати та густини.

Для тонко керованого знімання м'яких підводних шарів у хвостоставках, коли першочерговою є стабільна концентрація твердої фази без надлишкової турбулентності, доцільні шнекові земснаряди. Такі установки працюють з поперечним шнеком, що акуратно зрізає шар заданої товщини.

Типовий робочий діапазон глибин – до 6–10 м, а продуктивність – середнього рівня з дуже рівномірними параметрами пульпи на вході в насос [13; 14]. Для локальних робіт на «кишенях» або біля дамб широко застосовують заглибні насосні головки з універсальними змінними насадками (різцева корона, гідромонітор, фреза) – вони монтуються на стрілу екскаватора або невеликий понтон і забезпечують подачі від приблизно 600 до понад 2500 м³/год за відносно невисоких напорів, дозволяючи гнучко працювати із пастоподібними лінзами шламів без постановки повнорозмірного різцевого земснаряда [12].

Системи вимірювання та керування. Для підтримання заданих значень концентрації твердої фази та гранулометрії на вході фабрик доцільні безперервні вимірювання густини й витрати суміші по нитці. Узагальнений огляд технологій (гамма-щільноміри, ультразвукові, електромагнітні витратоміри, акустичні профілеміри) показує [10-16], що без'ядерні ультразвукові щільноміри стали стандартом для пульпопроводів у видобутку: датчики зносостійкі, дають покази в одиницях густини та масової частки твердого в реальному часі, легко інтегруються у ПЛК. Це спрощує розрахунок миттєвої продуктивності по твердій фазі та оперативне керування напорами/вмиканням бустерів [15; 16]. Геометричне позиціонування і візуалізація процесу драгування реалізуються інтегрованими системами «презентації траєкторії драгування» (DTPS – Dredge Track Presentation System) на базі високоточних GNSS/інерціальних датчиків та ехолотів; оператор у реальному часі бачить положення різцевої головки відносно проєктної поверхні, карти пройдених «гойдань», показники перевищення/недобору – це напряму впливає на питому енергоємність і якість забору [17]. Програмні комплекси класу DREDGEPACK (спеціалізоване ПЗ для керування днопоглиблювальними роботами) надають 3D-відображення «зрізу», контроль глибин і зносів інструмента та інтегруються з більшістю позиційних/сенсорних систем флоту [18].

Практичні «орієнтири» для вибору комплектації під умови Кривбасу. Для ставків глибиною до 10–14 м раціональним є середній різцевий земснаряд із внутрішнім діаметром ґрунтопроводу 300–450 мм, встановленою потужністю на різці 100–300 кВт і основним насосом, здатним забезпечити робочу швидкість суміші вище граничної швидкості осідання за DHLLDV при об’ємній концентрації твердої фази 10–20 %. Якщо протяжність траси більше декількох сотень метрів або наявні геометричні втрати (коліна, перепади висот), у розрахунок вводять одну-дві підсилювальні станції контейнерного виконання класу близько 900–1000 кВт для 400–500-мм лінії; трубопровід – поліетиленовий на поплавках із регламентованими радіусами повороту й захистом колін від абразивного струменя. Для ділянок із тонкодисперсними «пролежнями» та при високих вимогах до рівності горизонтів доречний шнековий модуль; для «точкових» операцій – заглибні насосні головки з відповідною насадкою. У будь-якій конфігурації обов’язкові: безперервний контроль густини/витрати/тисків на нитці, телеметрія у SCADA, геодезичний моніторинг «до/після» проходів, а також технологічні регламенти «промивання» нитки при вимушених зупинках (щоб запобігти осіданню суміші в трубопроводі). Українські науково-інженерні напрацювання з гідромеханізації відкритих гірничих робіт систематизують номенклатуру обладнання, методики розрахунку й питання експлуатаційної надійності – їх доцільно використати як базу для локальних стандартів підприємств Кривбасу [19]. Щодо сировинної складової, то сучасні публікації по складу поточних хвостів магнетитових кварцитів Криворізького басейну підтверджують наявність тонкодисперсних магнетитових і гематитових фракцій, придатних до повторного вилучення, що робить комплекси драгування змістовним інструментом доповнення рудопотоків фабрик за умови коректного налаштування режимів різання та гідротранспорту [20].

1.2 Аналіз теоретичного забезпечення дражної розробки родовищ

Теоретичні основи дражної розробки родовищ доцільно розглядати як узгоджений контур «забір – гідротранспорт – енергетика та керування», у якому механіка різання і ерозії визначає гранулометрію та концентрацію твердої фази на виході з робочого органа, гідравліка трубопроводу задає допустимі режими течії пульпи, а насосно-пульпопровідна підсистема забезпечує необхідний напір і подачу за умови кавітаційної та зносостійкої роботи. На етапі формування притоку теорія ґрунтується на узагальненій моделі «пісок–глина–скеля» (DSCRC), яка пов'язує питому енергію різання з кутом атаки, глибиною врзання та швидкістю обертання різця і описує перехід від «чистого» зрізання до клиноподібного зминання у когезійних середовищах; з практичного погляду саме правильний добір корони/фрези, кінематика «гойдання» навколо опори та дозоване гідромоніторне флюїдизування дозволяють уникнути надмірної шламизації та зберегти селективність шару [3; 4; 5; 6]. Далі, у трубопроводі суміш «рідина – тверда фаза» має рухатися із швидкістю, що перевищує граничну швидкість осідання частинок, причому підхід DHLLDV (рамка Делфта) та класичні залежності Дюрана–Кондольйоса надають інженерні критерії для підбору робочого «коридору» швидкостей з урахуванням розміру зерен, їх густини, діаметра труби і концентрації твердої фази [21-23]. Для ставково-дамбових ниток широко використовують поліетилен високої щільності (PE100) у плавучому виконанні, що зменшує масу траси, підвищує корозійну та ерозійну стійкість і дозволяє безпечні радіуси поворотів за умови дотримання монтажних регламентів [24, 25].

Сировинні умови Кривбасу характеризуються високою часткою тонкодисперсних магнетитових і гематитових фракцій у поточних хвостах, тому реологія пульпи часто має в'язкопластичний (бінгемівський) характер. Це потребує поправок до гідравлічних розрахунків та зумовлює вимоги до стабілізації гранскладу на вході в магнітні й класифікаційні вузли [26].

Енергетика насосної частини спирається на афінні закони подібності та баланс потужності, а забезпечення «запасу проти кавітації» і правильне компонування всмоктувальних ліній визначають надійність; мінімізація локальних прискорень у колінах і дотримання рекомендованих радіусів поворотів суттєво знижують знос робочих коліс і труб [7, 15]. У стійкому керуванні процесом ключову роль відіграють безперервні вимірювання густини та витрати (без'ядерні акустичні/радіочастотні щільноміри, накладні ультразвукові витратоміри) разом із картографуванням геометрії вибою (інтегровані системи презентації траєкторії драгування та спеціалізовані комплекси морського позиціонування), що реалізують контур керування зі зворотним зв'язком за якістю пульпи й геометрією зняття шару [4, 15, 24-26]. Усе це замикається на методологію подібності (Фруда, Рейнольдса, модифікована методологія Шилдса) та локальне калібрування коефіцієнтів за натурними даними, а вітчизняна навчально-методична література систематизує практичні прийоми добору обладнання і режимів для гідромеханізованих робіт на хвостосховищах [25].

Для інженерних розрахунків доцільно використовувати кілька базових співвідношень.

Питома енергія різання становитиме:

$$E_c = \frac{P_c}{Q_s} \quad (1.1)$$

де E_c — питома енергія різання, Дж/м³ твердого;

P_c — потужність на різцевій головці, Вт;

Q_s — об'ємна подача твердого, $\text{м}^3/\text{с}$.

Гранична швидкість осідання за підходом Дюрана–Кондольйоса у зручній інженерній формі наведена формулою (1.2):

$$v_{LDV} = \Phi \cdot \sqrt{(s - 1) \cdot g \cdot d \cdot D} \quad (1.2)$$

де v_{LDV} — гранична швидкість осідання, $\text{м}/\text{с}$;

Φ — емпіричний коефіцієнт;

$s = \rho_s/\rho$ — відносна густина частинок;

g — прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$;

де d — характерний розмір частинки (наприклад d_{50}), м ;

D — внутрішній діаметр трубопроводу, м .

Втрати напору для суміші за Дарсі–Вейсбахом з концентраційною поправкою визначатимуться за (1.3):

$$i_m = \lambda \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D} \cdot \psi(C_s, d) \quad (1.3)$$

де i_m — питомі втрати напору суміші, $\text{м}/\text{м}$;

λ — коефіцієнт тертя;

v — швидкість суміші, $\text{м}/\text{с}$;

D — діаметр труби, м ;

$\psi(C_s, d)$ — поправка на тверду фазу.

Баланс потужності на перекачування становитиме:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (1.4)$$

де P — споживана потужність на перекачування, Вт ;

Q — подача, $\text{м}^3/\text{с}$;

H — потрібний напір, м;

η — загальний ККД насосної установки.

Умова кавітаційної стійкості може бути виражена формулою (1.5):

$$NPSH_a = \frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} + z_s - \frac{p_v}{\rho \cdot g} - h_f \geq NPSH_r \quad (1.5)$$

де $NPSH_a$ — наявний кавітаційний запас, м;

$NPSH_r$ — потрібний за паспортом насоса, м;

p_{atm} — атмосферний тиск, Па;

z_s — геодезичний рівень на вході, м;

p_v — тиск насиченої пари, Па;

h_f — втрати напору у всмоктуванні, м.

Матеріальний баланс твердої фази у трубопроводі визначається за (1.6):

$$(1.6)$$

де $\dot{m}_s$ — масова витрата твердого, кг/с;

ρ_s — густина твердих частинок, кг/м³;

C_s — об'ємна частка твердого.

Закони для масштабування робочого колеса насоса зведені у формулі (1.7):

$$Q \propto n \cdot D^3; \quad H \propto n^2 \cdot D^2; \quad P \propto n^3 \cdot D^5 \quad (1.7)$$

Сукупність наведених положень дозволяє виконувати параметричне обґрунтування дражних режимів для хвостосховищ: підтримувати швидкість суміші вище v_{LDV} із мінімально достатнім запасом, утримувати густину та гранулометричний склад у межах значень переробки, забезпечувати кавітаційну стійкість і мінімізувати сумарні енерговитрати, спираючись на верифіковані вимірювання і коректно підібрану трасу пульпопроводу [26].

1.3 Аналіз досвіду розробки залізовмісних хвостосховищ

Світова практика демонструє, що повторне вилучення залізовмісних хвостів стає окремим напрямом мінерально-сировинної політики, коли хвости розглядають не як відходи, а як техногенні родовища. У бразильському Каржасі реалізовано поетапну схему перетворення відкладених з 1980-х років шламів на товарний концентрат класу «окатишевий дрібняк». Технологічне рішення спирається на гідровідбір електрифікованими різцево-всмоктуючими земснарядами, стабілізацію пульпи в напірних нитках і доведення на збагачувальних ланках, при цьому декларована стартова продуктивність досягає близько п'яти мільйонів тонн на рік, а стратегічно передбачено поетапну відмову від процесної води у переробці руди в Північній системі підприємства до 2027 року. Така модель поєднує дражний гідровідбір, магнітні методи на тонких класах, сухі або комбіновані варіанти доведення та організацію водообороту з високим ступенем повернення води [27-30]. Зміщення акцентів на «сухі» або маловодні технології для тонких класів у системі Каржас додатково підтверджено оглядами й технічними повідомленнями, що описують розвиток сухої магнітної концентрації на низькосортних рудах і хвостах та інвестиції у відповідні пілоти й промислові установки [29, 17, 31].

Для африканських об'єктів показовим є багаторічний кейс Маремпа (Сьєрра-Леоне). Тут опрацьовано технологічний ланцюг перероблення історичних гематитових хвостів із застосуванням високоградієнтної магнітної сепарації у промисловому масштабі; ще на початку 2010-х років оголошувалася проєктна продуктивність на рівні мільйонів тонн річно, а технологічне ядро складали високоградієнтні магнітні сепаратори зі спеціалізованими модулями для тонкодисперсних класів. Історичні та сучасні матеріали щодо Маремпи дають змогу реконструювати еволюцію схеми від пілотів до стабільної експлуатації, що важливо для зіставлення з

техногенними об'єктами іншої природи осадження та гранскладу [32]. Додаткові документи підприємства й тематичні огляди підтверджують сталість магнітних методів як основи для вилучення заліза з тонких класів та значні сумарні відвантаження за останні роки, що вказує на відтворюваність підходу в умовах змінної якості сировини [2, 7, 6, 9].

Індійські рудні райони (передусім Джаркханд і Одіша) сформували окремий масив досліджень, у яких головну увагу приділено переробленню шламів з вмістом заліза у межах 50–56% до збагачення. На практиці використовують поєднання гідроциклонів, пульсуючих і високоградієнтних магнітних сепараторів та, за потреби, догранення. Публікації останніх років демонструють оптимізацію роботи гідроциклонів (зокрема на основі комп'ютерного моделювання перебігу потоку), що дозволяє підвищувати вибірковість відсікання алюмінвмісних і кременистих домішок; у підсумку отримують концентрати близько 64% Fe при прийнятному вилученні для тонких класів. Для промислових схем наведено типові продуктивності ліній на рівні сотень тонн за годину, що репрезентує «середній» масштаб для заводів, інтегрованих у діючі фабрики [3; 11; 19].

Китайські дослідження зосереджуються на мінералогії та геохімії хвостів із неповним розкриттям мінеральних текстур і варіативною асоціацією магнетиту та гематиту. Це обґрунтовує потребу у комбінаціях «догранення + магнітні методи/флотація» і спрямовує вибір реологічних режимів транспортування тонкодисперсної пульпи. Окремий напрям становить магнітоперетворювальне випалювання з наступною магнітною сепарацією, що підтверджено лабораторними і напівпромисловими дослідженнями для різних типів сировини (зокрема при переході гематиту у магнетит у зваженому шарі) [4; 20; 12].

На Близькому Сході питання повернення заліза з історичних хвостів також знаходить практичне втілення. Для іранського об'єкта Балестан наведено цілеспрямоване поєднання мінералогічної діагностики з

доведенням (у тім числі з урахуванням неповного розкриття магнетиту), що стало основою для добору технологічної схеми перероблення хвостів; результати вказують на досяжність промислових показників за умови корекції крупності та режимів магнітної сепарації [13; 21]. Турецькі праці 2025 року акцентують уже не лише на виборі обладнання, а й на прогнозуванні показників вилучення засобами моделювання та машинного навчання, що відповідає загальному тренду на цифровізацію технологічного проєктування [6; 22].

Скандинавський напрям показує інший кут зору: перероблення хвостів для отримання супутніх продуктів. У Швеції у промисловому пілотному форматі розгорнуто вилучення апатиту і рідкісноземельних компонентів з пісків хвостів залізорудного виробництва. Цей досвід важливий не лише для підтвердження «ресурсності» хвостів, а й для відпрацювання гідротранспортування, згущення і водообороту в межах комплексної схеми, що розглядає хвости як багатокomпонентну сировину [7; 23; 15].

Нарешті, для Австралії та інших гірничих регіонів опубліковано огляди і кейси застосування різцевих земснарядів для вибірки тонкодисперсних хвостів з дамб з подальшим перекачуванням на згущення та доведення. Хоч ці приклади часто стосуються інших металів, вони методично співвідносяться з залізовмісними хвостами, оскільки ключові функціональні обмеження задають гідравліка пульпи і селективність за тонкими класами [44]. У блоках згущення й осушення дедалі ширше застосовують пастове згущення й високощільні згущувачі. Ряд досліджень і кейс-стаді демонструють відновлення понад 95% води та суттєве зменшення потреб у класичних «мокрих» картах складування, що технічно узгоджується з вимогами стійкого водного балансу при дражному відборі [4.1; 4.2].

За цими ж критеріями досвід Кривбасу характеризується переважанням тонкодисперсних магнетитових та гематитових фракцій у хвостах збагачення комбінатів, диференційованих за підприємствами та навіть за картами в

межах одного об'єкта. Узагальнені мінералогічні та хімічні дослідження останніх років фіксують відмінності у карбонатності та вмісті глини, що впливає на перероблюваність, режим гідротранспорту та параметри магнітної сепарації. Це зумовлює необхідність стабілізації гранулометричного складу й густини пульпи в потоці з дражного відбору до фабричних ланок класифікації й магнітної сепарації та підтверджує доцільність високоградієнтних магнітних методів для тонких класів [31; 10; 3.1; 17].

Технічно регіональний досвід апелює до земснарядних комплексів з різцевими головками або зануреними насосними модулями, плавучими й береговими пульпопроводами, а також до безперервного контролю густини та витрати пульпи у зв'язці з геодезичною навігацією при відборі. Окремі тематичні праці з техногенних ресурсів Кривбасу підкреслюють значні обсяги накопичених хвостів і перспективність їх залучення у виробничий цикл за умови поетапного впровадження модернізованих ланок згущення й зневоднення. Наукометричні матеріали, присвячені зміні магнітних властивостей під час збагачення, підтверджують технологічні підстави для високоградієнтної магнітної сепарації з тонких класів; додаткові регіональні огляди фіксують геоекологічні обмеження, що вимагають дисциплінованого керування гідротехнічними режимами хвостосховищ [17; 10; 11].

У підсумку, світові кейси й публікації підтверджують надійність зв'язки «дражний гідровідбір — стабілізований гідротранспорт — магнітні ланки для тонких фракцій — згущення з високим поверненням води» для залізовмісних хвостів. Для Кривбасу окреслено аналогічну техніко-технологічну рамку, у якій успіх визначається правильним вибором виконавчих органів земснарядів, підтриманням швидкості суміші вище граничної швидкості осідання в пульпопроводах, інтеграцією з високоградієнтними магнітними процесами на фабриках та модернізацією згущення. Саме така конфігурація, засвідчена світовими прикладами й підтверджена локальними дослідженнями, забезпечує керовану якість

техногенної сировини та відтворювану продуктивність при залученні хвостів у виробничий цикл.

Світова практика засвідчує, що повторне вилучення залізовмісних хвостів набуває рис самостійного напрямку освоєння техногенних родовищ. У Бразилії реалізовано поетапний перехід від класичних «мокрих» хвостових схем до комбінацій дражного гідровідбору та сухого або комбінованого доведення тонких класів, з перспективою істотного зменшення використання процесної води у переробці руди. Зокрема, у Північній системі Каржас (проект Gelado) запроваджено електрифіковані різцево-всмоктуючі земснаряди, стабілізований гідротранспорт пульпи та доведення до концентрату «окатишевого» класу, причому заявлена стартова продуктивність сягає близько п'яти мільйонів тонн на рік з подальшим масштабуванням [27; 29–31]. Технологічна придатність таких схем методично спирається на уніфіковані підходи до проектування земснарядів і робочих органів, критерії різання за моделлю «пісок–глина–скеля», а також на надійні рамки розрахунку транспортних режимів пульп, де гранична швидкість осідання та втрати напору визначають робочий «коридор» швидкостей у трубопроводах [1; 5–7; 23–24]. На практиці це означає, що параметри розпушення і всмоктування узгоджують із можливостями насосно-пульпопровідної системи, а матеріали труб і фасонних частин добирають з урахуванням абразивності, корозійної стійкості та допустимих радіусів трасування для плавучих і берегових ділянок [10–12].

Для Африки показовим є тривалий кейс Маремпа (Сьєрра-Леоне), де історичні гематитові хвости переробляють за допомогою високоградієнтної магнітної сепарації у промисловому масштабі. Продуктивність ланок тут оцінювалася на рівні мільйонів тонн на рік, а технологічне «ядро» становлять магнітні апарати, оптимізовані під тонкі класи [32]. У той самий час теоретичні та прикладні настанови для дражних робіт, наведені в профільних посібниках і керівництвах, окреслюють інженерні межі застосовності

різцевих земснарядів і шнекових систем для тонкодисперсних суспензій, а також висувають вимоги до систем контролю густини та витрати, без яких неможливо стабілізувати живлення переробних ланок [2; 15–18; 26].

В Індії (Джаркханд, Одіша) найбільшу увагу приділено переробленню шламів зі стартовим вмістом заліза близько 50–56 відсотків. Промислова практика спирається на поєднання гідроциклонування, пульсуючої та високоградієнтної магнітної сепарації з коригуванням крупності, що дозволяє отримувати концентрати порядку 64 відсотків заліза при прийнятних вилученнях для тонких класів і продуктивностях ліній на рівні сотень тонн за годину [33–35]. Теоретично такі схеми узгоджуються з класичними залежностями гідравлічного транспорту твердих частинок і критеріями осадження, які визначають нижню межу безпечної швидкості у трубопроводах, а відтак вибір діаметрів, напорів та числа бустерних станцій [6–7; 23–24]. Для забезпечення надійності напірних ниток у ставково-дамбових умовах використовують поліетилен високої щільності у плавучому виконанні на поплавках, а монтажні регламенти «спливання–затоплення» і надґрунтового укладання узгоджують із вимогами зносостійкості та геометрії траси [10–11].

Китайські дослідження акцентують на мінералогії та геохімії хвостів з неповним розкриттям текстур і варіативною асоціацією магнетиту та гематиту; це зумовлює потребу в комбінаціях догранення з магнітним збагаченням або флотацією. Окремий напрям становить магнітоперетворювальне випалювання з наступною магнітною сепарацією, що продемонстровано у лабораторних і напівпромислових масштабах [36–37]. За таких умов особливого значення набуває стабілізація реології пульпи під час гідротранспорту та підбір режимів, які виключають осідання у трубопроводах; практичні рекомендації щодо критичних швидкостей і втрат напору наведені в узагальнюючих працях з транспортування пульп і підтверджені прикладними керівництвами з дражних робіт [6–7; 2; 21; 26].

Досвід Ірану й Туреччини доповнює світову картину прикладами перероблення історичних хвостів з урахуванням локальної мінералогії та застосуванням методів прогнозування технологічних показників. Ці кейси показують, що за належного узгодження догранення, магнітної сепарації та, за потреби, флотації забезпечується відтворюваність вилучення на дрібнозернистих класах, тоді як цифрові методи планування допомагають стабілізувати якість концентрату в умовах неоднорідної сировини [38–40].

Скандинавські підходи (Швеція, LKAB) демонструють, що хвости можуть розглядатися як багатокomпонентна сировина: промислове пілотування вилучення апатиту та рідкісноземельних елементів із пісків хвостів підтвердило технологічну здійсненність комплексних схем із гідротранспортом, згущенням і високим ступенем повернення води [41–43]. Узагальнюючи світові практики, можна констатувати стабільність зв'язки «дражний гідровідбір — керований гідротранспорт — магнітні процеси для тонких фракцій — пастове чи високощільне згущення з поверненням води», за умови безперервного контролю густини та витрати, позиціювання робочого органа й батиметрії вибою [15–18; 26; 46]. У контексті добору комплектації земснарядів для таких завдань корисними є типоряди різцевих систем і підсилювальних станцій від провідних виробників, що дають реперні діапазони глибин, діаметрів пульпопроводів, встановленої потужності та продуктивності суміші [3–4; 8–9; 12].

За тими ж критеріями досвід Кривбасу відображає потенціал залучення тонкодисперсних магнетитових і гематитових фракцій, про що свідчать мінералогічні та хімічні дослідження поточних хвостів збагачення, включно з варіативністю складу між картами одного об'єкта. Наявність тонких фракцій обґрунтовує застосування високоградієнтної магнітної сепарації та висуває вимоги до стабілізації гранулометрії й густини пульпи на вході у класифікаційні й магнітні апарати [20]. З технічного боку в регіоні застосовують різцеві земснаряди та занурювані насосні головки, плавучі та

берегові пульпопроводи, а також безперервний контроль густини й витрати з використанням неядерних щільномірів та ультразвукових витратомірів, інтегрованих у контур керування разом із геонавігаційними системами, що відображають положення робочого органа та рельєф вибою в реальному часі [15–18; 25–26; 17–18]. Придатність поліетиленових труб для плавучих ділянок, а також монтажні практики, орієнтовані на мінімізацію локальних прискорень потоку та зносу, відповідають рекомендаціям профільних інститутів [10–11]. За наявними публічними матеріалами про виробничу інфраструктуру комбінатів Кривбасу, інтеграція повторно вилучених хвостів із фабричними потужностями з виробництва концентратів та окатишів формує інженерну «нішу» для масштабування дражних робіт у міру модернізації згущення та водообороту [47-48].

Узагальнюючи, світовий досвід та методичні джерела дозволяють рекомендувати для техногенних родовищ заліза поєднання керованого дражного відбору з підтриманням швидкостей у пульпопроводах вище граничних значень осідання, застосуванням високоградієнтної магнітної сепарації для тонких фракцій і впровадженням пастового або високощільного згущення, що забезпечує повернення більшої частини води в оборот. Для Кривбасу такий підхід є технологічно сумісним за умови дисципліни вимірювань і моніторингу, коректного вибору комплектації земснарядів та поступової модернізації ланок згущення і транспорту.

Таблиця 1.1 – Аналіз світового досвіду дражного відпрацювання техногенних родовищ

Країна, регіон	Тип техногенної сировини	Ключове технологічне та вимірювальне обладнання
Бразилія, Каржас	Шлами та історичні хвости з магнетитово-гематитовою складовою	Різцево-всмоктуючі електрифіковані земснаряди; плавучі й берегові пульпопроводи з бустерними станціями; високоградієнтні магнітні сепаратори для тонких класів; сухе або комбіноване доведення; пастове/високощільне згущення; онлайн-вимірювання густини та витрати
Сьєрра-Леоне, Маремпа	гематитові хвости	Високоградієнтні магнітні сепаратори промислового класу; системи згущення та зневоднення; моніторинг параметрів пульпи по нитці
Індія, Джаркханд/Одіша	шлами після збагачення (Fe $\approx$ 50–56%)	Гідроциклонні батареї; пульсуюча/високоградієнтна магнітна сепарація; догранення за потреби; поліетиленові плавучі нитки; вимірювання густини та витрати
Китай, Єшан	тонкодисперсні хвости зі складною мінералогією	Догранення + магнітна сепарація/флотація; магнітоперетворювальне випалювання з подальшою магнітною сепарацією; високощільне згущення; моніторинг реології та швидкостей у трубопроводах
Іран, Балестан	історичні хвости з варіативним вмістом заліза	Комбінації подрібнення й магнітної сепарації (за потреби — флотація); згущення/зневоднення для повернення води; контроль параметрів пульпи
Туреччина, різні	Тонкозернисті хвости	Інтегровані схеми збагачення (гідрокласифікація + магнітні

полігони		процеси); цифрове планування/прогноз показників; згущення; системи вимірювання по нитці
Швеція	піски хвостів залізорудного виробництва (супутні продукти)	Гідротранспорт + флотація апатиту; вилучення рідкісноземельних компонентів; високий ступінь повернення води (пастові/високощільні згущувачі)
Австралія	хвости різних металів із дамб	Різцево-всмоктуючі земснаряди; бустерні станції; довгі пульпопроводи; пастове згущення; системи онлайн-контролю параметрів пульпи
ПАР	Залізорудні хвости (з високими вимогами до обороту води)	Пастове/високощільне згущення з поверненням 95–98% води; сучасні полімерні системи; моніторинг тисків і витрат
Україна, Кривбас	тонкодисперсні магнетитові та гематитові хвости	Різцеві земснаряди та занурювані насосні головки; плавучі/берегові пульпопроводи (у т. ч. PE100) з бустерами; високоградієнтні магнітні сепаратори; класифікація тонких класів; пастове/високощільне згущення; безперервний контроль густини, витрати і позиціонування робочого органа

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННОЇ БАЗИ КРИВБАСУ, ПРЕДСТАВЛЕНОЇ ЗАЛІЗОВМІСНИМИ ХВОСТОСХОВИЩАМИ

Мінерально-сировинна база техногенних родовищ Кривбасу сформована переважно хвостами збагачення магнетитових кварцитів із високою долею тонких класів та відчутною просторовою й фабричною неоднорідністю. Узагальнені дослідження показують, що вміст заліза у поточних хвостах коливається у межах приблизно 18–26 % (за сумарним Fe), із помітною роллю карбонатної та глинистої складових, що впливають на реологію пульпи й селективність магнітного вилучення [20]. Зміна структурно-текстурних і магнітних властивостей рудно-мінеральної асоціації впродовж технологічного ланцюга підтверджує необхідність таргетованих режимів класифікації та високоградієнтної магнітної сепарації саме на тонких класах [19; 24]. Для інженерного обґрунтування відпрацювання такі властивості мають бути картовані по картах і горизонтах сховищ, оскільки навіть у межах одного об'єкта фіксується суттєва варіабельність гранскладу й мінералогії [20].

Ресурсно-кількісна оцінка техногенної сировини може бути виконана двома взаємодоповнювальними підходами: «зверху вниз» (за агрегованими площами, товщинами та об'ємною масою хвостів) і «знизу вгору» (через виробничий баланс підприємств). Для першого підходу застосовують геодезичні моделі карт і типові інтервали товщин відкладень (наприклад, 8–25 м для мокрих карт техногенних сховищ), а також розрахункові значення об'ємної маси водонасичених тонкодисперсних хвостів 1,60–1,80 т/м³ залежно від гранскладу й ступеня ущільнення [2; 19]. За таких припущень ресурс на 1 км² площі карти становитиме приблизно 12,8–45,0 млн т, а відповідний метал у хвостах — порядку 2,3–11,7 млн т Fe на 1 км² за типового вмісту Fe = 18–26% [20]. Навіть при помірних геометріях окремих карт (0,2–0,5 км²) одержуємо оцінки у сотні тисяч – кілька мільйонів тонн

хвостів на карту, що безпосередньо транлюється у сотні тисяч тонн еквівалента металу Fe за умови подальшої переробки.

Другий підхід ґрунтується на виробничому балансі: знаючи випуск концентрату і типовий вихід у магнітному збагаченні магнетитових кварцитів, можна оцінити приріст хвостів і кумулятивний фонд за інтервал років. Для криворізьких комбінатів (зокрема, Північний і Центральний ГЗК) публічно фіксувалася сумарна потужність з виробництва окатишів близько 8,6 млн т/рік у 2021 р. [48]. За характерних для магнетитових кварцитів виходів концентрату 25–40 % (інтервал, що відповідає навчально-довідковим даним і практиці гідромеханізації та переробки багатокомпонентних тонкодисперсних пульп) [19; 2], маса хвостів, яка припадає на 1 т концентрату, становитиме приблизно 1,5–3,0 т. Відповідно, для 8,6 млн т/рік окатишів (за близького порядку річного випуску концентрату) орієнтовний річний приріст хвостів становить 13–26 млн т/рік. Якщо прийняти середній Fe у хвостах 22 % [20], то еквівалент заліза у такому прирості сягає близько 2,9–5,7 млн т Fe/рік. Ці оцінки є показовими для масштабу проблеми й потенціалу, а точні значення залежать від конкретних виходів, шихт, якості рудопотоків і конфігурацій фабричних ланок у різні роки.

З погляду структури й керованості гідротехнічних систем, хвостосховища Кривбасу — це багатокартні полігони з різними стадіями експлуатації та реконструкції (рис. 2.1).



Рис. 2.1 – Загальний вид (Google Maps) хвостосховища з упорними призмами (ПРАТ «Центральний ГЗК»)

Хвостосховище ПРАТ “Центральний ГЗК” належить до наливних за способом формування і до балкових за типом морфологічного розташування. Об’єкт закладено на двох відрогах балки Лозуватка. Мінімальна відмітка тальвегу становить 72,5 м. Зі східного та південного боків балка штучно замкнена упорними призмами, сформованими відвалами розкривних порід №1–№3, що забезпечує необхідну протидію фільтраційним та ґрунтовим тискам огорожувальних споруд (рис. 2.1). Середня відмітка гребеня по периметру сягає 126,0 м, а максимальна висота дамб — 53,5 м. На внутрішніх схилах упорних призм у процесі відвалоутворення було влаштовано протифільтраційний екран із перезволоженого суглинку, який укладали пошарово значної товщини, що підвищило загальну водотривкість контуру.

Конфігурація чаші, велика корисна місткість і локалізація точки скидання пульпи у вершинній частині балки створили умови для ефективної гравітаційної диференціації твердої фази. У початковій зоні течії, поблизу місця випуску, переважає акумуляція грубіших і більш щільних зерен, що формує ділянку з підвищеною залізистістю. Далі, у міру зменшення швидкості потоку на плесі сховища, осадження прогресує до дрібніших класів, і середній вміст заліза в осаді закономірно знижується. Додатковим чинником є тривале перебування суміші в мінералізованій воді: у цих умовах відбувається самодовільне розпушення зросткових агрегатів рудних і нерудних мінералів, що поліпшує розкриття рудної фази й підвищує ефективність подальшої гідрокласифікації. У результаті в межах чаші сформувалася техногенна мінеральна неоднорідність із чітко виокремленою заліозбагаченою зоною, придатною як для отримання залізорудних концентратів, так і для вилучення будівельних пісків.

В технічній літературі для земснарядних робіт у подібних умовах рекомендується поєднання різцевих всмоктуючих систем із модульними бустерними станціями, плавучими й береговими пульпопроводами, а також застосування матеріалів трубопроводу із підвищеною зносостійкістю та придатністю до криволінійних трас у ставково-дамбових нитках [1; 3–4; 8–12]. Підтримання безпечних режимів гідротранспорту – ключова вимога для повторного залучення тонкої техногенної сировини. Нижня межа швидкості визначається критеріями обмеження осідання частинок і підбирається з урахуванням розміру зерен, густини твердої фази, діаметра труби та концентрації суміші [6, 24]. Для безперервного контролю матеріального балансу застосовують штатні вимірювальні комплекси: щільноміри (зокрема неядерні) і витратоміри на напірних нитках, а також системи позиціювання й батиметрії для контролю геометрії забою і точного копіювання проєктної поверхні [15, 26].

Хімічні й мінералогічні особливості поточних хвостів у Кривбасі мають безпосередній вплив на перероблюваність і економіку повторного вилучення. Підвищена тонкодисперсність і наявність парамагнітних домішок у кварцовій матриці зумовлюють чутливість до режимів догранення та напруженості магнітного поля у високоградієнтних апаратах [20; 24]. Це, своєю чергою, впливає на оптимальні робочі концентрації пульпи й в'язкопластичні властивості суміші, що повинні бути враховані у розрахунках втрат напору та критичних швидкостей у пульпопроводах [6, 7]. Для плавучих ділянок ниток і тимчасових трас практичні настанови щодо поліетиленових труб, плавучих секцій і монтажних режимів дозволяють досягати прийняттого ресурсу за абразивного зносу, що є критичним у віддалених картах і при циклічних перестановках трас [10, 11].

З метою наочної кількісної інтерпретації наведемо сценарні оцінки запасів техногенної сировини та «металу у хвостах» для типових геометрій. Для карти площею 0,30 км² і середньої товщини 12 м за щільності 1,70 т/м³ обсяг відкладень становить $\approx 6,12$ млн м³, маса $\approx 10,4$ млн т; за Fe = 22 % це відповідає $\approx 2,29$ млн т Fe [2; 19; 20]. Для більшої карти 0,50 км² із товщиною 18 м за щільності 1,65 т/м³ одержуємо $\approx 9,0$ млн м³ і $\approx 14,9$ млн т маси; за Fe = 20–24 % це 3,0–3,6 млн т Fe. Якщо масштабувати до сукупності карт одного великого полігону (умовно 1,5–2,0 км² ефективної площі) за середньою товщиною 12–16 м і щільності 1,65–1,75 т/м³, діапазон загальних запасів хвостів складатиме близько 30–56 млн т, а «метал у хвостах» — орієнтовно 6–13 млн т Fe (за Fe = 20–24 %) [2; 19; 20]. Ці інтервали узгоджуються з виробничими оцінками через баланс: при річному прирості хвостів 13–26 млн т/рік (розрахунок вище) навіть 3–5 років експлуатації здатні сформувати прирости фонду на рівні десятків мільйонів тонн, що збігається з порядком величин сценарних обчислень [48].

Інтеграція техногенної сировини з діючими фабричними потужностями залежить від стабільності параметрів пульпи на виході земснаряда та

конфігурації магнітних і класифікаційних ланок. Практика й довідкова література з дражної розробки наголошують, що керованість процесу забезпечується на етапі забою (кінематика різання, дозоване флюїдизування), у гідротранспорті (дотримання робочого коридору швидкостей вище граничних для осідання) та у вимірювальному контурі (безперервні виміри густини/витрати і просторове позиціювання робочого органа) [1, 7, 26]. За таких умов техногенні запаси можуть бути «включені» у виробничий цикл із прогнозованою якістю напівпродукту до окатишевого класу [48].

З позиції ризиків і обмежень визначальними є: неоднорідність складу по картам, реологія тонкодисперсних пульп, зносостійкість трубно-насосного господарства, а також гідрогеологічна дисципліна експлуатації сховищ. Для їхнього нівелювання необхідні покартні геометалургічні моделі (Fe, SiO₂, Al₂O₃, карбонати, грансклад), планувальні рішення щодо трас пульпопроводів із мінімізацією локальних прискорень і раціональним застосуванням бустерів, а також підвищення частки засобів вимірювання, що не вимагають радіаційних джерел [7, 10, 25].

Основні параметри хвостосховищ Кривбасу наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри хвостосховищ Кривбасу

Хвостосховище	Площа, га	Ємність, млн. м ³	Річний обсяг хвостів, млн. м ³
«Об'єднане»	350-550	320	6,5
Войкове	250	156,5	11,5
Хвостосховище ІнГЗК	-	379	4,52
«Миролюбівка»	324	107	10,6
Хвостосховище ЦГЗК	-	290	7
Хвостосховище ПівнГЗК	1293	466	8,84

Узагальнюючи отримані кількісні та якісні результати, можна зробити висновок, що мінерально-сировинна база Кривбасу, представлена

залізовмісними хвостосховищами, є істотною за масштабом і потенціалом. Навіть за консервативних сценарних оцінок типові карти надають одиниці мільйонів тонн техногенної сировини і сотні тисяч — мільйони тонн еквівалента металу Fe, тоді як сукупні полігони сягають десятків мільйонів тонн із багатомільйонними запасами заліза в перерахунку на Fe [2; 19; 20; 48]. Така обширність ресурсної бази вимагає подальшого розвитку науково-практичного забезпечення: уточнення моделей розподілу компоненту по картах і горизонтах, модернізації ланок згущення та водообороту, підвищення інтелектуалізації вимірювальних і навігаційних систем, а також вдосконалення режимів дражного відбору й гідротранспорту з урахуванням місцевих умов. Усе це робить питання залучення залізовмісних хвостів стратегічно важливим як для регіону Кривбасу, так і для України в цілому.

РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ДРАГУВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ХВОСТОСХОВИЩ

Робота земснаряда являє собою складну інтегровану систему, у якій кожна ланка технологічного процесу повинна функціонувати узгоджено. У зоні вибою різцева коронка здійснює відокремлення гірської маси та сприяє утворенню гідросуміші (пульпи), що складається з води та твердих частинок. Далі сформована пульпа транспортується до приймального пункту за допомогою насосно-трубопровідного комплексу.

Порушення балансу між окремими ланками процесу призводить до технологічних втрат: при надмірно низькій частоті обертання корони виникає розсип — матеріал відділяється, але не потрапляє до гідротранспортної системи; при занадто високій швидкості обертання корони відбувається надмірне роздрібнення та «перешламування» пульпи, що ускладнює або навіть блокує роботу насосів.

Саме тому у практиці експлуатації поєднується теоретичне обґрунтування керуючих параметрів процесу із емпіричними спостереженнями за реальною продуктивністю земснаряда залежно від частоти обертання корони та величини подачі. Результатом такого підходу є складання так званого «паспорта режимів» — системи графіків і характеристик, які наочно визначають оптимальні зони роботи та межі, за яких експлуатація обладнання стає неефективною.

Умовно технологічний процес роботи земснаряда можна поділити на дві взаємопов'язані підсистеми, ефективність яких визначається їх узгодженістю.

Підсистема А — «забій і коронка». У цій підсистемі ключовими параметрами є частота обертання коронки n , її діаметр D_c та фактична подача через призмасмоктувальну зону Q_c . Від їх співвідношення залежить повнота вилучення матеріалу у вибої. При недостатній частоті обертання процес різання проходить повільно, і частина відокремленої гірської маси не

втягується у гідротранспорт, утворюючи розсип. При надмірно високій частоті коронка інтенсивно подрібнює матеріал, що спричиняє надлишкове утворення дрібних фракцій та підвищує щільність і в'язкість пульпи, ускладнюючи її подальший транспорт.

Підсистема Б — «насосно-трубопровідний комплекс». Тут визначальними є швидкість руху гідросуміші у трубопроводі v та концентрація твердих частинок C_s . Швидкість повинна перевищувати критичну швидкість осідання, інакше тверді частки почнуть відкладатися у трубі, що призведе до її закупорювання. Водночас занадто висока швидкість спричиняє зростання гідравлічних втрат, прискорений знос трубопроводів та збільшене енергоспоживання. Зростання концентрації твердого позитивно впливає на масову продуктивність комплексу, проте водночас підвищує навантаження на насос і зменшує гідравлічну стійкість транспорту.

Таким чином, економічно й технологічно доцільними є такі режими роботи, за яких підсистема А мінімізує втрати у вигляді розсипу, а підсистема Б забезпечує стабільний гідротранспорт із помірними питомими енерговитратами на одиницю маси видобутої сировини.

Безрозмірний параметр Φ узагальнює взаємодію геометрії та кінематики корони із подачею. Масова подача твердої фази визначається через швидкість у трубі, концентрацію та діаметр; енергетична ефективність оцінюється питомою енергією.

$$\Phi = \frac{Q_s}{\omega R^3} \quad (3.1)$$

де Q_s — подача у призмасмоктувальній зоні ($\text{м}^3/\text{с}$);

ω — кутова швидкість ($\text{рад}/\text{с}$);

Зв'язок кутової швидкості з частотою обертання:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.2)$$

де n — частота обертання ($\text{об}/\text{хв}$);

Масова подача твердої фази:

$$m'_s = \rho_s C_s v \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.3)$$

де D — внутрішній діаметр пульпопроводу (м);

v — середня швидкість суміші (м/с);

C_s — об'ємна частка твердого;

ρ_s — густина твердої фази (кг/м³);

Питома енергія процесу:

$$(3.4)$$

де $P_{ел}$ — електрична потужність насосів (кВт).

Швидкість у трубі через витрату:

$$v = \frac{Q_{pipe}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3.5)$$

Вочевидь, фізичний зміст простий: збільшення D , v і C_s підвищує масову подачу твердого, але кожен параметр має межу доцільності, зумовлену гідравлікою та зносостійкістю.

Розглянемо три сімейства графіків:

- 1) залежність параметру роботи корони Φ від швидкості обертання для при різних продуктивностях всмоктування і діаметрі трубопроводу 2,5 м
- 2) залежність параметру роботи корони Φ від швидкості обертання для при різних продуктивностях всмоктування і діаметрі трубопроводу 2,5 м
- 3) залежність витрати суміші від швидкості її руху в трубі для різних діаметрів трубопроводу.

За наведеними вище формулами були розраховані значення безрозмірного показника Φ для сімейства кривих, що характеризують режим роботи корони. Результати розрахунків наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Значення Φ для сімейства кривих, що характеризують режим роботи корони

Дс, м	Qс, м³/с	Φ (n=18)	Φ (n=22)	Φ (n=26)	Φ (n=30)	Φ (n=34)
2,5	0,25	0,0679	0,0556	0,0470	0,0407	0,0360
2,5	0,35	0,0951	0,0778	0,0658	0,0570	0,0503
2,5	0,45	0,1222	0,1000	0,0846	0,0733	0,0647
2,5	0,55	0,1494	0,1222	0,1034	0,0896	0,0791
3,0	0,25	0,0393	0,0322	0,0272	0,0236	0,0208
3,0	0,35	0,0550	0,0450	0,0381	0,0330	0,0291
3,0	0,45	0,0707	0,0579	0,0490	0,0424	0,0374
3,0	0,55	0,0865	0,0707	0,0599	0,0519	0,0458

Отримані табличні дані було візуалізовано на рисунках 3.1, 3.2 для діаметрів трубопроводу 2,5 і 3 м відповідно.

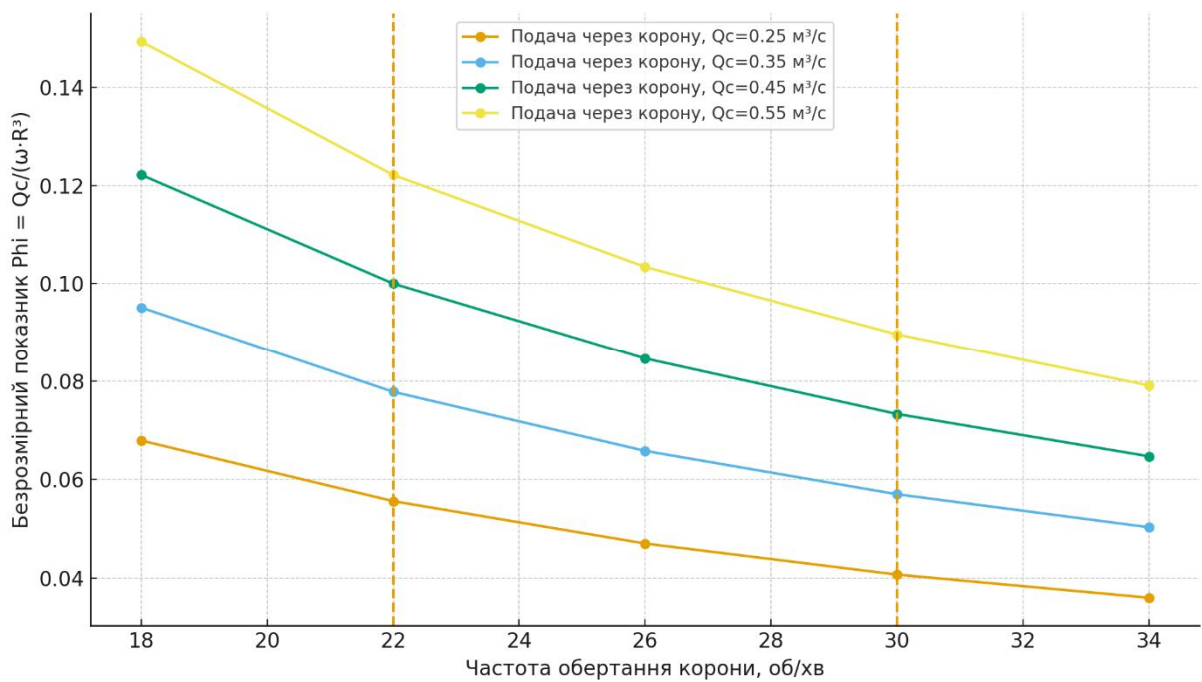


Рис. 3.1 – Залежність параметру роботи корони Φ від швидкості обертання для при різних продуктивностях всмоктування і діаметрі трубопроводу 2,5 м

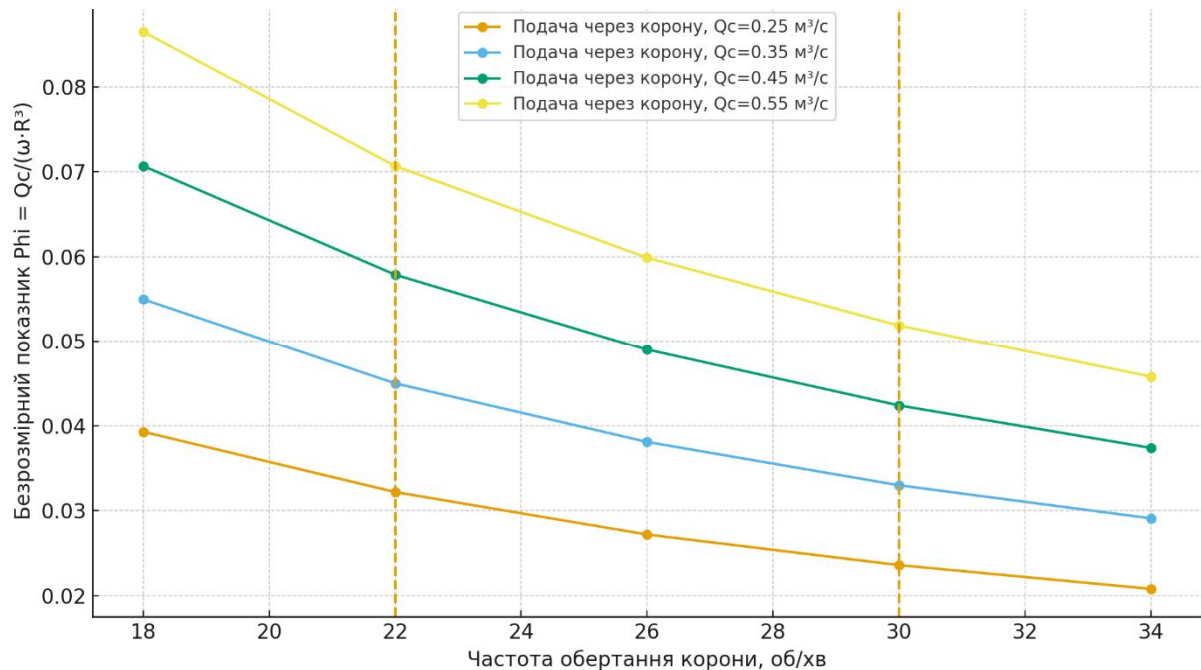


Рис. 3.2 – Залежність параметру роботи корони Φ від швидкості обертання для при різних продуктивностях всмоктування і діаметрі трубопроводу 3 м

Залежність витрати у трубопроводі від середньої швидкості суміші розрахована в таблиці 3.2 і далі наведена на рисунку 3.3.

Таблиця 2 – Залежність витрати у трубопроводі від середньої швидкості суміші

D, м	v, м/с	$Q_{\text{pipe}}, \text{ м}^3/\text{с}$	Cs (орієнтир)
0,35	2,4	0,231	0,14 0,18 0,22
0,35	2,7	0,260	0,14 0,18 0,22
0,35	3,0	0,289	0,14 0,18 0,22
0,40	2,4	0,302	0,14 0,18 0,22
0,40	2,7	0,339	0,14 0,18 0,22
0,40	3,0	0,377	0,14 0,18 0,22

0,45	2,4	0,382	0,14 0,18 0,22
0,45	2,7	0,429	0,14 0,18 0,22
0,45	3,0	0,477	0,14 0,18 0,22

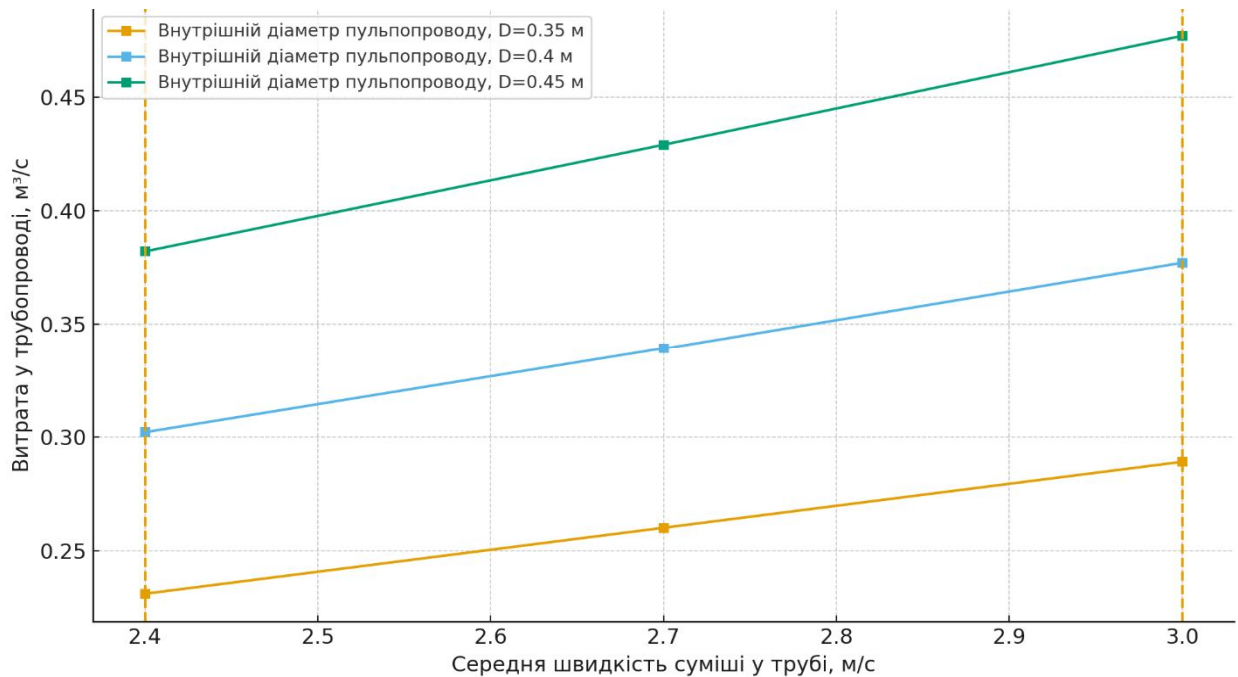


Рис. 3.3 – Залежність витрати суміші від швидкості її руху в трубі для різних діаметрів трубопроводу

Виявлені тенденції є фізично очікуваними: для фіксованого Q_c збільшення частоти обертання n зменшує безрозмірний показник Φ . Це наслідок зростання кутової швидкості $\omega = 2\pi n/60$ у знаменнику: «механічна» складова взаємодії різця з відкладом зростає, відносна «гідравлічна» частка, яку характеризує Φ – знижується.

Для фіксованого n більші Q_c зсувають криві вгору: система покладається більше на підсос і транспортування, що підвищує вимоги до гідравліки, але зменшує ризики втрати відрізаного матеріалу (розсип).

Порівняння діаметрів $D_c = 2,5$ м та 3 м показує систематично менші значення Φ для більшої корони за тих самих Q_c і n . Це природно, адже R^3 у знаменнику зростає, і механічна спроможність відрізання/знесення частинок

відносно подачі зростає. Однак практично це супроводжується збільшенням крутного моменту та зусиль різання. Отже, доцільність переходу на більшу корону має підтверджуватися енергетичними критеріями та надійністю приводу.

Для тонкодисперсних, «піщаних» хвостів характерні менші робочі Φ , адже матеріал легше підхоплюється, тому оптимальні частоти зазвичай середні. Тому робочий коридор на графіках можна прийняти середнім в інтервалі $n=22-30$ об/хв, у межах якого Φ знижується до значень, притаманних режимам з малим розсипом і без надмірної шламизації.

Третій графік демонструє лінійне зростання витрати у трубопроводі $Q_{\text{ріре}}$ із середньою швидкістю суміші v для трьох внутрішніх діаметрів трубопроводу $D=0,35; 0,40; 0,45$ м.

Для заданого коридору швидкостей (2,4–3,0 м/с), продиктованого вимогами переваги над критичною швидкістю осідання і обмеженням зносу, збільшення діаметра істотно нарощує допустиму витрату. Саме цей графік відповідає за узгодження забою і транспорту: обрані на перших двох графіках частота й подача Q_c мають потрапляти у пропускну здатність трубопроводу при допустимому v .

Пошук оптимуму базується на спільному виконанні трьох умов:

1. Мінімізація розсипу на забої індикативно забезпечуються помірними частотами в коридорі 22–30 об/хв і подачі Q_c на рівні 0,35–0,45 м³/с для $D_c=2,5$, що дає $\Phi=0,06-0,10$, тобто характерні значення для «піщаного» матеріалу.

2. Гідравлічна стійкість транспорту досягається швидкістю v у межах 2,4–3,0 м/с, підбираючи D так, щоб $Q_{\text{ріре}} \geq Q_c$ з невеликим запасом на втрати та пульсації.

3. Урахуванням цього, доцільним значенням оптимуму експлуатаційного режиму для типових хвостів Кривбасу є:

- параметри забою $D_c=2,5$ м, $n=26$ об/хв, $Q_c=0,45$ м³/с, що відповідає $\Phi=0,085$ – середині робочої зони для піщаних середовищ.

- параметри транспорту: $D=0,45$ м, $v=3,0$ м/с, що дає $Q_{\text{pipe}} \approx 0,477$ м³/с і закриває баланс витрат з необхідним запасом відносно Q_c .

Запропонований підхід забезпечує інструментарій для визначення експлуатаційного оптимуму земснарядних робіт у залізовмісних хвостосховищах Кривбасу. Поєднання аналізу роботи забою та кривих для трубопроводу дозволяє отримати паспорт режимів роботи земснаряду, що мінімізує розсип, гарантує стійкість транспорту й зменшує питомі енерговитрати в реальних виробничих умовах.

ВИСНОВКИ

В першому розділі магістерського дослідження системно обґрунтовується вибір гідромеханізованої – дражної технології як базового способу залучення тонкодисперсних залізовмісних хвостів у повторний рудопотік. Проаналізовано весь цикл операцій: розпушення/різання, всмоктування суміші, перекачування пульпопроводами, керування концентрацією твердої фази і проміжну класифікацію та оборот води. В ході аналізу класів земснарядів і робочих органів було обрано базовою машиною для хвостосховищ різцево-всмоктуючий земснаряд, що поєднує механічне розпушення з гідротранспортом пульпи. Альтернативні схеми подані для доповнюють класифікації та ілюструють межі застосовності безперервної ковшової виїмки.

Виконаний обширний аналіз світових і регіональних прикладів повторного відпрацювання залізовмісних хвостів збагачення дозволив визначити, що успіх проектів повторної розробки залежить від надійної синхронізованої роботи дражного гідровідбору, стабілізованого гідротранспорту і магнітних процесів для тонких фракцій. Це дозволило переходити до параметричного обґрунтування режимів роботи обладнання.

В другому розділі виконано аналіз мінерально-сировинної бази залізовмісних пісків збагачення на гірничо-видобувних підприємствах Кривбасу. Проведений аналіз дозволив стверджувати, що загальна заповнена ємність хвостосховищ Кривбасу становить близько 2 млрд м³. Це наочно підтверджує актуальність задачі оптимізації параметрів технологічних схем їх розробки.

В заключному розділі виконане параметричне моделювання технологічних схем драгування залізовмісних пісків збагачення. Отримані залежності врахували взаємний зв'язок діаметру коронки земснаряду,

частоти його обертання, швидкості всмоктування і діаметрів трубопроводів. Проведене моделювання дозволило встановити оптимальні параметри роботи земснаряду для умов Кривбасу: діаметр коронки $D_c=2,5$ м, частота обертання $n=26$ об/хв, продуктивність всмоктування $Q_c=0,45$ м³/с, діаметр трубопроводу $D=0,45$ м, швидкість потоку $v=3,0$ м/с, що відповідає продуктивності гідротранспорту на рівні $Q_{pipe} \approx 0,477$ м³/с.

Подальші дослідження будуть направлені на емпіричні уточнення отриманих залежностей, оцінка різних режимів з позицій витрати електроенергії та пошук нових технологічних схем розробки залізовмісних пісків збагачення.

Бібліографія.

1. Vlasblom W.J. The Cutter Suction Dredger. Delft: TU Delft OCW, 2003. 79 p. URL: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Reading-3.pdf>.
2. Bray R.N., Bates A.D., Land J.M. Dredging: A Handbook for Engineers. 2nd ed. Chichester: Wiley, 1997. 434 p. ISBN 978-0-470-23587-4.
3. Royal IHC. Beaver® cutter suction dredgers: Brochure. 2024. 16 p. URL: https://www.royalihc.com/sites/default/files/documents/IHC%20Dredging/Vessels/CSD/IHC%20Dredging%20Beaver%20brochure%20ENGLISH_0.pdf
4. Damen. Cutter Suction Dredger CSD 250: Product Sheet. 2022. 2 p. URL: <https://medialibrary.damen.com/m/2d70258c1f33b6dd/original/product-sheet-damen-csd250.pdf>.
5. Miedema S.A. The Delft Sand, Clay & Rock Cutting Model. 3rd ed. Delft: TU Delft OPEN, 2019. 732 p. URL: https://research.tudelft.nl/files/4625251/The_Delft_Sand_Clay_Rock_Cutting_Model_3rd_Edition.pdf.
6. Wilson K.C., Addie G.R., Sellgren A., Clift R. Slurry Transport Using Centrifugal Pumps. 3rd ed. New York: Springer, 2006. 432 p. DOI: 10.1007/b101079. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/b101079>.
7. Miedema S.A. Slurry Transport: Fundamentals, A Historical Overview & The Delft Head Loss & Limit Deposit Velocity Framework. 2nd ed. Delft: TU Delft Open Textbooks, 2019. URL: <https://dredging.org/media/ceda/org/documents/resources/otheronline/miedema-2016-slurry-transport.pdf>.
8. Damen. Booster Station 500 (BS500): Specifications. URL: <https://www.damen.com/vessels/dredging-and-dredging-equipment/booster-station/bs500>; product sheet: <https://medialibrary.damen.com/m/edbe8634dfc6f33/original/product-sheet-damen-bs500.pdf>.
9. Royal IHC. Booster station 895 kW: Product Sheet. 2020. URL: <https://www.royalihc.com/sites/default/files/documents/IHC%20Dredging%20Ves>

[sels/CSD/IHC%20Dredging%20Product%20sheet%20Booster%20station%20895kW.pdf](#).

10. Plastics Pipe Institute. Field Applications of Polyethylene Pipe in Dredging. 1986. 8 p. URL: <https://www.plasticpipe.org/common/Uploaded%20files/1-PPI/Divisions/Municipal%20and%20Industrial/a403256.pdf>.

11. Plastics Pipe Institute. Handbook of PE Pipe. Chapter 10: Marine Installations. 2008. URL: https://plasticpipe.org/common/Uploaded%20files/1-PPI/Manuals-Design%20Guides/Handbook%20of%20PE%20Pipe/SECOND_EDITION_HANDBOOK_OF_PE_PIPE_2008/Chapter_10_-_Marine_Installations/Chapter%2010%20-%20Marine%20Installations.pdf.

12. Damen Dredging Equipment. DOP® Submersible Dredge Pumps: Brochure. URL: <https://denialink.net/pdf/dop.pdf>; <https://www.damen.com/equipment/dredging/dop-pumps>.

13. Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR). Environmental Dredging (Technology Screening Matrix). 2020. URL: https://frtr.gov/matrix/pdf/Environmental_Dredging.pdf.

14. US EPA. Environmental Dredging Equipment, Processes, and Controls. 2006. URL: <https://clu-in.org/conf/tio/seddredging/prez/seddredgingpdf.pdf>.

15. Greenwood M.S. et al. (PNNL/USACE). Density and Flow-Velocity Measurement Technology for Dredged Material Slurry (Proof-of-Concept). PNNL-17051, 2004. URL: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-17051.pdf.

16. Rhosonics. SDM — Slurry Density Meter: Brochure. 2022. URL: <https://rhosonics.com/wp-content/uploads/2022/10/SDM-Brochure-EN-RevA.pdf>.

17. Royal IHC. Dredge Track Presentation System (DTPS): Brochure. URL: <https://www.royalihc.com/sites/default/files/documents/Dredge%20track%20presentation%20system.pdf>.

18. HYPACK (Xylem). Multibeam on a Dredge / DREDGEPACK®: Product Brochure. 2025. URL: https://www.xylem.com/siteassets/brand/hypack/resources/brochure/multibeam-on-a-dredge-product-brochure_final-v2.pdf.
19. Бойко М.Г., Моргунов В.М., Козиряцький Л.М., Федоров О.В. Гідромеханізація: навчальний посібник. Донецьк: ДонНТУ, 2011. 554 с. URL: https://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/8964/4/%D0%91%D0%BE%D0%B9%D0%BA%D0%BE_%D0%9C%D0%BE%D1%80%D0%B3%D1%83%D0%BD%D0%BE%D0%B2_%D0%9A%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%80%D1%8F%D1%86%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%93%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F.pdf.
20. Губіна В.Г., Покалюк В.В., Верховцев В.Г., Яценко В.Г., Заборовський В.С. Хімічний склад поточних хвостів збагачення магнетитових кварцитів Криворізького басейну. *Мінералогічний журнал*. 2023. Т. 45, № 1. С. 59–71. URL: https://jnas.nbu.gov.ua/j-pdf/Mineral_2023_45_1_7.pdf
21. Vlasblom W.J. *Designing Dredging Equipment*. Delft: CEDA / TU Delft, 2003. 186 p.
22. Bray R.N., Bates A.D., Land J.M. *Dredging: A Handbook for Engineers*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 1997. 434 p.
23. Durand R., Condolios E. The Hydraulic Transport of Solids in Pipes. *La Houille Blanche*. 1952;7:705–718.
24. Van Rijn L.C. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Amsterdam: Aqua Publications, 1993. 690 p.
25. Van Eeten M.J.C. *Radio-Frequency Slurry-Density Measurement for Dredging Pipelines*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2011. 98 p.
26. IADC. Optimising Real-Time Dredge Monitoring. *Terra et Aqua*. 2024;173:14–25.

27. Vale S.A. Vale begins reusing tailings at Carajás dam using equipment with zero CO₂ emissions (Gelado project). 2023. URL: <https://vale.com/w/vale-begins-reusing-tailings-at-carajas-dam-using-equipment-with-zero-co2-emissions>.
28. AT-Minerals. The safe alternative in mining: dry processing for iron ore. 2021.
29. Mining Magazine. Vale reusing tailings at Carajás dam for pellet feed. 2023.
30. Reuters. Vale to eliminate water use in Carajás iron ore processing by 2027. 2025.
31. Mining-Technology. Vale to end water use in iron ore processing at Carajás by 2027. 2025.
32. Metso (Outotec). Magnetic separation solution to the Marampa tailings project, Sierra Leone. 2011.
33. Padhi M., Behera A., Mishra B. Iron ore slimes beneficiation using optimised hydrocyclone. *Powder Technology*. 2022;397:117103.
34. IJERT. Iron ore tailing beneficiation: a potential resource for future. 2021.
35. Nageswararao K., et al. Optimization study of hydrocyclone for beneficiation of iron ore slimes. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2009;26(3).
36. Yang G., et al. Mineralogy and Geochemistry of Iron Tailings from Yeshan. *ACS Omega*. 2024.
37. Qiu G., et al. Iron recovery by suspension magnetization roasting and magnetic separation. *Journal of Environmental Management*. 2023.
38. Bahrami A., et al. Iron Recovery from the Tailings of the Balestan Iron Ore Plant. *Journal of Mining and Environment*. 2023.
39. Şimşek S., Cebeci Y., Abbaker A. Sustainable iron ore tailings reprocessing. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2025.
40. Preprint. Sustainable iron ore tailings reprocessing: machine learning and integrated strategies. 2025.
41. LKAB. Producing apatite from mine waste in pilot plant (ReeMAP). 2020.
42. LKAB Minerals. ReeMAP — turning waste into resources. 2020/2023.

43. International Mining. LKAB to process tailings for apatite concentrate (ReeMAP). 2020.
44. SCIRP Review. Tailings dam mining: dredging case references. 2024.
45. Arjmand R., et al. Improving dewatering performance of iron-ore tailings thickeners. *Int. J. Mining Sci. Technol.* 2019;29.
46. Zare S., et al. Increasing performance of tailing thickener: Gol-E-Gohar iron ore plant. *Int. J. Mining and Geo-Engineering.* 2022;56(1):41–45.
47. GMK Center. Central GOK: profile and assets.
48. Metinvest. Operational Review 2021 (pellet capacity of PivnGOK + CGOK). Режим доступа:
https://metinvestholding.com/en/ar2021/pdf/download_center/Strategic_report/08.%20Operational%20review.pdf