

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗРОБКИ РОЗСИПНИХ ТИТАН-ЦИРКОНІЄВИХ РОДОВИЩ З ПОВНИМ ЦИКЛОМ ПЕРЕРОБКИ РУД

О. Lozhnikov¹ <http://orcid.org/0000-0003-1231-0295>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DEVELOPMENT OF THEORETICAL APPROACHES TO THE CREATION OF TECHNOLOGIES FOR THE PLACER TITANIUM-ZIRCONIUM DEPOSITS MINING WITH A FULL CYCLE OF ORE PROCESSING

Мета. Визначити ефективність технологічної схеми розробки титан-цирконієвих родовищ з повним циклом переробки важкої фракції за показниками об'ємів транспортної роботи і необхідної площі хвостосховищ.

Методика. Аналітичний метод дослідження використовувався при теоретичних узагальненнях і формулюванні висновків досліджень. Графічний метод застосовувався для визначення параметрів технологічної схеми з повним циклом переробки важкої фракції титан-цирконієвих родовищ. Порівняльний метод дозволив визначити вплив продуктивності кар'єру на показники об'ємів транспортної роботи і необхідну площу хвостосховищ при технологічній схемі з повним циклом переробки руд.

Результати. Встановлено, що запропонована схема з повним циклом переробки важкої фракції титан-цирконієвих родовищ дозволяє скоротити об'єм транспортної роботи на 14 % на ділянці між стаціонарною збагачувальною фабрикою і хвостосховищем за рахунок включення в робочий цикл цеху переробки хвостів збагачення. Визначено, що при зростанні продуктивності кар'єру до 4,0 млн м³, об'єм транспортної роботи зі збагачувальної фабрики скорочується з 88 до 77 млн км · м³ протягом 10 років роботи гірничо-збагачувального комбінату.

Наукова новизна. Встановлено залежності площ хвостосховищ і гідровідвалів від продуктивності гірничого підприємства, які дозволяють визначити, що при використанні схеми з фабрикою колективного концентрату на борту кар'єру площа хвостосховища складатиме 14,4–22,9 га, у той час як запропонована схема, з додатковим цехом переробки хвостів збагачення, дозволяє скоротити площу для розміщення вмісних порід на 11–12 %.

Практична значимість. Отримані результати досліджень дозволяють встановити, що запропонована схема з повним циклом переробки важкої фракції дозволяє досягти комплексного ефекту, який полягає в отриманні додаткової товарної продукції титан-цирконієвих компонентів, підвищенні рівня ресурсозбереження за рахунок скорочення витрат на електроенергію, зменшення об'ємів споживання технічної води для транспортування гірничої маси, а також зменшення площі хвостосховища.

Ключові слова: кар'єр, титан-цирконієві родовища, критична сировина, ресурсозбереження, технології з повним циклом переробки руд, транспортна робота.

Вступ. Вдосконалення технологічних схем освоєння розсипних титан-цирконієвих родовищ є комплексним завданням від вирішення якого залежить отримання критично важливої сировини і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище [1]. Досвід роботи вітчизняних підприємств з розробки даної сировини дозволяє визначити основні недоліки, які полягають у недосконалості організації процесів збагачення [2], що призводить до потрапляння важкої фракції у хвости збагачення і необхідності повторної розробки цих хвостосховищ [3]. Це призводить до витрати значних ресурсів на повторну розробку техногенних об'єктів, переробки хвостів збагачення і розміщення вмісних порід у гідровідвалах.

Низький вміст важких мінералів у титан-цирконієвих рудах розсипних родовищ, що знаходиться у межах 4–6% в піщано-глинистій суміші, за існуючої технології збагачення не може бути отриманий у повному об'ємі [4]. Це призводить до того, що частина основних компонентів циркон, рутил, ільменіт а також супутні елементи: дистен, силіманіт, ставроліт потрапляють разом із хвостами збагачення у хвостосховища [2].

Втрата важкої фракції знаходиться в межах 1–3 % від її загального об'єму руди при річній продуктивності підприємства 2,0 млн м³ (об'єм важкої фракції може коливатися від 80 до 120 тис м³ в залежності від розподілу на ділянці). Таким чином від 20 до 30 тис м³ цінних компонентів на рік потрапляють у хвостосховища [5].

Аналіз роботи Вільногірського ГМК дозволив встановити, що через недосконалу технологію збагачення, втрачається до 3% мінеральної фракції з руди, яка разом із піщано-глинистою сумішшю потрапляє до хвостосховища. Таким чином, наявність мінеральної фракції в хвостах збагачення, призвела до формування техногенного родовища, з перспективою подальшої переробки [6]. За час існування комбінату у хвостосховищах накопичилося майже 3,0 млн т важкої фракції, які розподілені у піщано-глинистій суміші.

Сучасні підходи до розробки розсипних титан-цирконієвих родовищ дозволяють підвищити рівень ресурсозбереження за рахунок додаткового впровадження у технологічних цикл роботи підприємства пересувних фабрик колективного концентрату, що переміщуються за фронтом гірничих робіт, однак проблема втрати сировини також полягає у недосконалості роботи стаціонарної збагачувальної фабрики. Її використання призводить до втрати важкої фракції разом з доводками збагачення, які у подальшому потрапляють у хвостосховище [7].

У зв'язку з цим в роботі розглядається ефективність впровадження цеху переробки хвостів збагачення, на який потрапляють доводки збагачення одразу зі стаціонарної збагачувальної фабрики. Його використання дозволить вилучати важку фракцію з доводок, за рахунок чого може бути досягнуто скорочення об'єму транспортної роботи і формування внутрішнього відвалу з вмісних порід замість традиційного хвостосховища.

Аналіз попередніх досліджень. Дослідження, виконані в роботі [8] присвячені вивченню технології та засобів селективного вилучення багатоконпонентних титанових руд, а також збагачення мінералів зі зміненими

магнітними властивостями. В роботі наведено основні принципи підвищення ефективності збагачення титан-залізних руд шляхом цілеспрямованого селективного освоєння компонентів та зміни магнітних властивостей рудних мінералів. Запропоновані рішення дозволяють збільшити вилучення цінних компонентів з руд чим досягається ефект ресурсозбереження. Однак в роботі не розглянуто позитивний вплив глибокого очищення титан-цирконієвих руд на зменшення об'ємів утворення хвостів збагачення і пов'язане з цим зниження обсягів транспортної роботи підприємства.

Автори роботи [9] підкреслюють актуальність низької ефективності освоєння рудних родовищ України, результатом чого стало утворення десятків мільйонів тон техногенної сировини, яка може бути повторно освоєна. За укрупненою оцінкою авторів у хвостосховищах накопичено понад 500 млн тонн залізної руди, 150 млн тонн марганцевої руди, 1,2–1,3 млн тонн червоних глиноземистих шламів, що містять зерна золота, циркону та рутилу. Також особлива увага приділяється хвостосховищам, що були утворені в результаті освоєння розсипних титан-цирконієвих родовищ. За попередньою оцінкою авторів хвости титанових руд, є джерелом критичної та дорогоцінної мінеральної сировини. У той же час в роботі не розглянуто комплексний ефект від вдосконалення технологічної схеми збагачення рудної сировини, що дозволить суттєво зменшити необхідність утворення хвостосховищ.

Робота [10] спрямована на дослідження розподілу та кількості техногенних об'єктів гірничодобувної промисловості, до яких належать породні відвали, шламонакопичувачі та відстійники. В ході досліджень визначено, що в Україні виявлено 1053 техногенні об'єкти, які розташовані в різних адміністративних одиницях і мають цінний ресурс для повторного освоєння. Результати проведених досліджень підкреслюють важливість вдосконалення технологічних схем збагачення і запровадження у роботу гірничих підприємств технологічних схем з повним циклом переробки цінних мінералів.

Виконані дослідження [11] підкреслюють важливість відповідальної переробки титанової сировини для функціонування промислових ланцюгів стратегічних секторів ЄС. Особлива актуальність поставленого питання полягає у залежності від імпорту та ризиків перебоїв у ланцюжках поставок, тому видобуток та переробка титану та інших CRM з важких мінеральних пісків є викликом для України. Запропоновані рішення в роботі полягають в оптимізації поточного процесу збагачення в Україні для підвищення видобутку ільменіту (FeTiO_3) та розробка нових підходів до видобутку цінних побічних продуктів, таких як рідкісноземельні елементи, ніобій, тантал та скандій. Проте, наведені в роботі теоретичні рішення, оцінені не в повній мірі з позиції ресурсозбереження і підвищення ефективності роботи гірничого підприємства.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Аналіз існуючих науково-дослідних робіт дозволив встановити, що проблема повноти вилучення цінних мінералів при розробці розсипних титан-цирконієвих родовищ України є важливою, а в результаті використання недосконалих технологій утворилися хвостосховища з великими запасами техногенних ресурсів.

Вирішення окресленої проблеми можливе шляхом розробки технологічної схема освоєння титан-цирконієвих родовищ з повним циклом переробки важкої фракції з вилученням усіх цінних мінералів і запобігання їх потрапляння у хвостосховища. Запропоновані рішення спрямовані на досягнення комплексного ефекту, як отримання додаткової товарної продукції титан-цирконієвих компонентів так і підвищенні рівня ресурсозбереження за рахунок скорочення витрат на електроенергію, зменшення об'ємів споживання технічної води для роботи гідротранспорту, а також зменшення площ хвостосховищ [12].

Обґрунтування ефективності використання технологічної схеми освоєння титан-цирконієвих родовищ з повним циклом переробки важкої фракції досягається за рахунок вирішення наступних завдань: виявити основні причини, що спричиняють втрати важкої фракції при збагаченні титан-цирконієвих руд при розробці розсіпних родовищ; розробити технологічну схему освоєння титан-цирконієвих розсіпних родовищ з повним циклом переробки важкої фракції; встановити вплив використання цеху переробки хвостів збагачення на об'єми транспортної роботи при розробці родовища титан-цирконієвих руд; визначити вплив продуктивності кар'єру на площу хвостосховища при прямому розміщенні хвостів зі збагачувальної фабрики або відвалу вмісних порід з цеху переробки хвостів.

Вирішення поставлених задач в подальшому дозволить обґрунтувати ефективність застосування технологічної схеми освоєння титан-цирконієвих родовищ з повним циклом переробки важкої фракції та встановити ресурсозберігаючий ефект від запропонованих рішень.

Основна частина (Результати). Встановлені результати попередніх досліджень дозволили обґрунтувати ефективність розташування збагачувальної фабрики колективного концентрату на борту кар'єру при освоєнні титан-цирконієвих родовищ [2]. Основними перевагами її використання є суттєве скорочення об'ємів транспортної роботи, які присутні в класичних схемах роботи підприємства і обумовлені необхідністю переміщення усього об'єму корисної копалини у вигляді пульпи на стаціонарну збагачувальну фабрику. Однак, запропоновані рішення з вдосконалення технологічної схем залишають невирішеним одне з головних питань, пов'язаних з втратою важкої фракції та потраплянням її у хвости разом із доводками збагачення.

За існуючої на Вільногірському ГЗК схеми організації збагачувальних робіт втрати важкої фракції відбуваються на двох етапах при відділенні чорнового концентрату від вмісних порід (піщано-глинистої суміші) та під час поділу чорнового концентрату на товарні компоненти циркон, рutil, ільменіт, дистен, силіманіт, ставроліт.

Сумарні втрати цінної мінеральної сировини за існуючої схеми організації роботи збагачувальної фабрики оцінюються від 1 до 3% остаточної кількості основних компонентів. Аналіз роботи Вільногірського ГЗК дозволяє встановити, що під час розробки родовища до 25 % цінних мінералів потрапляють у хвостосховище [2]. При цьому встановлено, що на етапі отримання чорнового концентрату втрати важкої фракції складають до 1,0 %, у той час як при формуванні доводок збагачення у середньому втрачається до 2,0 % цінної сировини, що потрапляє на хвостосховище.

Розроблена у попередніх дослідженнях технологічна схема [2] з використанням напівмобільної фабрики чорного концентрату (рис. 1 а) дозволяє суттєво зменшити об'єми транспортної роботи, однак залишається невирішеним питання повноти вилучення важкої фракції та її потрапляння у хвостосховища, що також вимагає витрат на транспортну роботу.

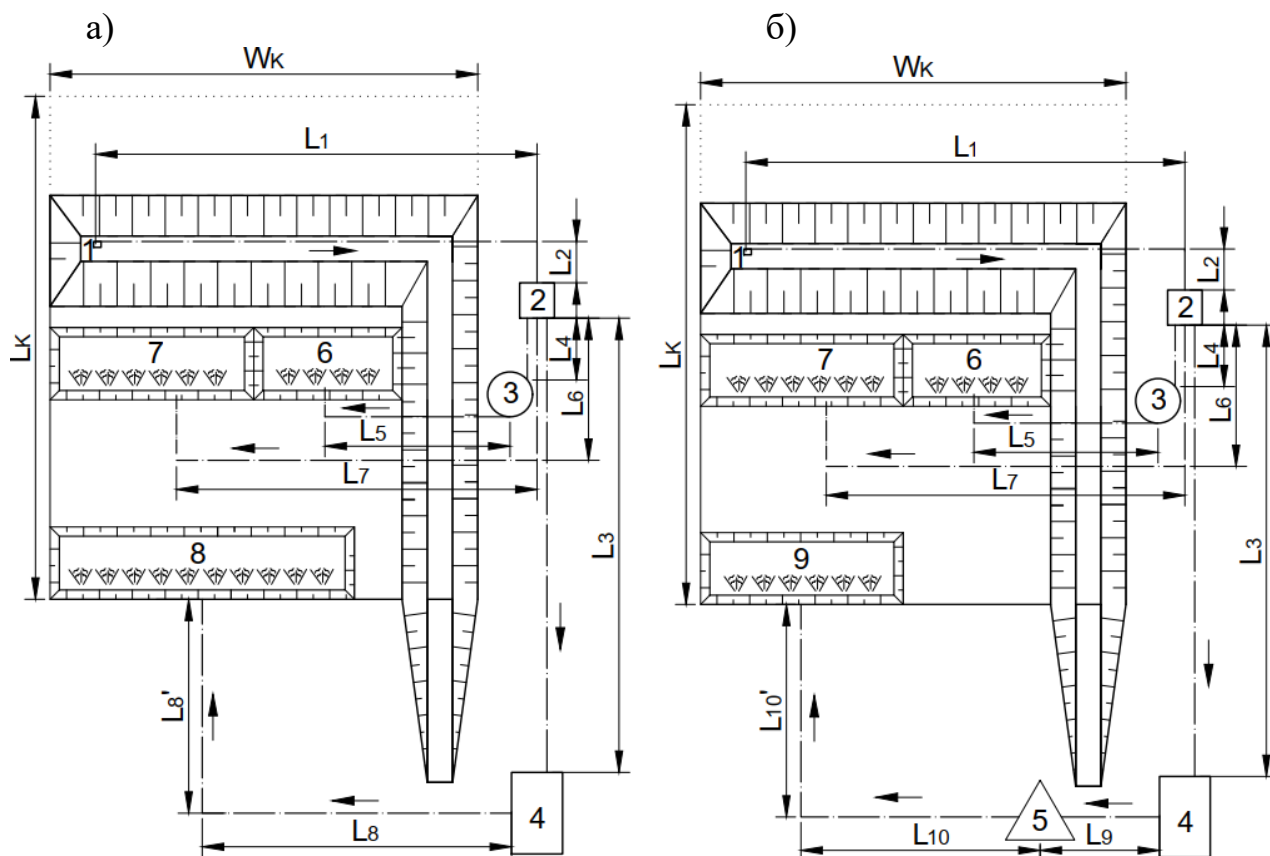


Рис. 1. Технологічні схеми організації роботи гірничо-збагачувального комбінату при розробці титан-цирконієвих родовищ: а) вдосконалена схема з розміщенням хвостів збагачення у виробленому просторі кар'єру; б) схема з повним циклом переробки важкої фракції: 1 – вибій; 2 – збагачувальна фабрика колективного концентрату (ЗФКК); 3 – згущувач глини; 4 – стаціонарна збагачувальна фабрика (СЗФ); 5 – цех переробки хвостів збагачення (ЦПХЗ); 6 – відвал глини; 7 – відвал пісків; 8 – хвостосховище з вмістом важкої фракції від доводок збагачення; 9 – відвали вмісних порід; W_k і L_k – ширина і довжина кар'єру, м; L_1 – відстань транспортування руди від вибою до поверхні кар'єру, м; L_2 – відстань від вибійного трубопроводу до ЗФКК, м; L_3 – відстань між збагачувальною фабрикою колективного концентрату і стаціонарною збагачувальною фабрикою, м; L_4 – відстань від ЗФКК до згущувача глини, м; L_5 – відстань від згущувача до відвалу глини, м; L_6 – довжина трубопроводу з піщаними породами на поверхні кар'єру, м; L_7 – довжина трубопроводу до відвалу пісків в кар'єрі; L_8 та L_8' – довжина трубопроводу з хвостами збагачення; L_9 – відстань між стаціонарною фабрикою і цехом переробки хвостів збагачення; L_{10} і L_{10}' – довжина трубопроводу з ЦПХЗ до відвалу вмісних порід

Зменшення втрат важкої фракції на фабриці колективного концентрату можливо досягнути шляхом використання сучасного устаткування, яке дозволяє вилучати титан-цирконієві елементи з піщано-глинистої суміші в повному обсязі. У той же час, вилучення важкої фракції з відходів доведення стаціонарної збагачувальної фабрики вимагає значних зусиль.

Світовий досвід застосування комбінованих схем глибокого очищення руди розсіпних титан-цирконієвих родовищ дозволяє стверджувати, що для повного циклу переробки необхідно забезпечити додаткове вилучення цінних компонентів з хвостів збагачення з використанням доводочної фабрики (цех переробки хвостів) [13]. Зазначене устаткування дозволяє вилучати важку фракцію з тонкими класами крупності (до 0,074 мм), які звичайні гвинтові сепаратори не можуть вловити. Для таких дрібних фракцій гравітація безсила, тому комплекс доведення має включати відцентрово-гравітаційні та магнітно-рідинні технології, оскільки лише відцентрове поле здатне примусово осадити важкі мінерали за їхньої низької концентрації в потоці.

Розміщення цеху переробки хвостів найбільш ефективно здійснювати на виході зі стаціонарної збагачувальної фабрики, що дозволить позбутися існуючих втрат 2,0 % важкої фракції та досягти повного циклу переробки корисної копалини. Запропонована технологічна схема з повним вилученням титан-цирконієвої сировини представлена на (рис. 1 б).

Використання цеху переробки хвостів збагачення (рис. 1 б) дозволяє окрім прогнозованої відсутності втрат важкої фракції досягти зниження експлуатаційних витрат на транспортування хвостів збагачення і утримання хвостосховища, а також отримати ресурсозберігаючий ефект у вигляді зменшення площі порушених земель для розміщення відходів з ЦПХЗ.

Розглянемо вплив впровадження цеху переробки хвостів у технологічну схему розробки родовища на формування хвостосховища при різній продуктивності гірничого підприємства. При виконанні досліджень приймаються наступні вихідні дані: продуктивність кар'єру від 2,0 до 4,0 млн м³; відстань транспортування від стаціонарної збагачувальної фабрики до хвостосховища, що розташовується у виробленому просторі кар'єру, 2,0 км. Об'єми гірничої маси, що транспортуються при використанні схеми з повним циклом переробки важкої фракції представлено в табл. 1.

Відповідно до виконаних розрахунків, застосування схеми з повним циклом переробки важкої фракції в першу чергу дозволяє зменшити об'єми транспортної роботи на ділянці від СЗФ до хвостосховища і скоротити утворення хвостів збагачення і відходів виробництва. Встановимо залежність об'ємів транспортної роботи підприємства від його продуктивності при застосовуванні схеми з повним циклом переробки важкої фракції.

При визначенні впливу від впровадження цеху переробки хвостів збагачення у технологічний процес роботи підприємства на об'єм транспортної роботи, розглядається ділянка між СЗФ і хвостосховищем. Відповідно до вихідних даних (табл. 1), об'єм твердих хвостів збагачення за класичною технологічною схемою знаходиться в діапазоні 0,2–0,4 млн м³ в залежності від продуктивності підпри-

ємства. Згідно з параметрами технологічної схеми (див. рис. 1 а), середня відстань транспортування хвостів збагачення у вироблений простір кар'єру приймається 2,0 км. Для здійснення гідротранспортування співвідношення води до твердих часток у хвостах збагачення має складати 10:1, тому в рік на хвостосховище буде спрямовано від 2,2 до 4,4 млн м³ хвостів.

Таблиця 1

Об'єми транспортування гірничої маси гідротранспортом по твердому при розробці кар'єру продуктивністю 2,0 – 4,0 млн м³

Продуктивність кар'єру, млн м ³	Об'єм перевезення гірничої маси, млн м ³								
	Чорний концентрат із ЗФКК на СЗФ	Порода із ЗФКК на відвали	Пісок із ЗФКК на відвал	Глина із ЗФКК на відвал	Продукція з СЗФ	Хвости на ЦПХЗ	Продукція з ЦПХЗ	Порода на відвали пісок-глина	Усього відвали для схеми з ЦПХЗ
2,0	0,3	1,7	1,43	0,27	0,1	0,2	0,025	0,175	1,875
3,0	0,45	2,55	2,15	0,40	0,15	0,3	0,038	0,263	2,813
4,0	0,6	3,4	2,86	0,54	0,2	0,4	0,05	0,35	3,75

При застосуванні запропонованої технологічної схеми з повним циклом переробки важкої фракції шляхом встановлення додаткового цеху переробки хвостів збагачення, з них може бути додатково вилучена важка фракція в розмірі 12,5 % від загального об'єму хвостів по твердому. З урахуванням цього фактору об'єм транспортної роботи при розміщенні відходів з цеху переробки хвостів збагачення по твердому складає 1,92–3,85 млн м³, які спрямовуються у гідровідвал у виробленому просторі кар'єру. При виконанні розрахунків об'ємів транспортної роботи приймаємо відстань від ЦПХЗ до внутрішнього відвалу, як і в попередній схемі 2,0 км. При виконанні розрахунків приймаємо термін експлуатації хвостосховища – 10 років. Результати розрахунків впливу продуктивності кар'єру на об'єм транспортної роботи на цих ділянках за десять років наведено на рис. 2.

Встановлені залежності об'єму транспортних робіт від продуктивності кар'єру (рис. 2) дозволяють стверджувати, що застосування ЦПХЗ призводить до суттєвого зменшення витрат на роботу гідротранспорту. При заданих параметрах розташування стаціонарної збагачувальної фабрики і хвостосховища, впровадження ЦПХЗ у робочий цикл дозволяє скоротити об'єм транспортної роботи на 14 % з 44 до 38,5 млн км·м³. При зростанні продуктивності кар'єру до 4,0 млн м³, об'єм транспортної роботи скорочується на 11 млн км·м³ і складає 77 млн км·м³ при застосуванні ЦПХЗ.

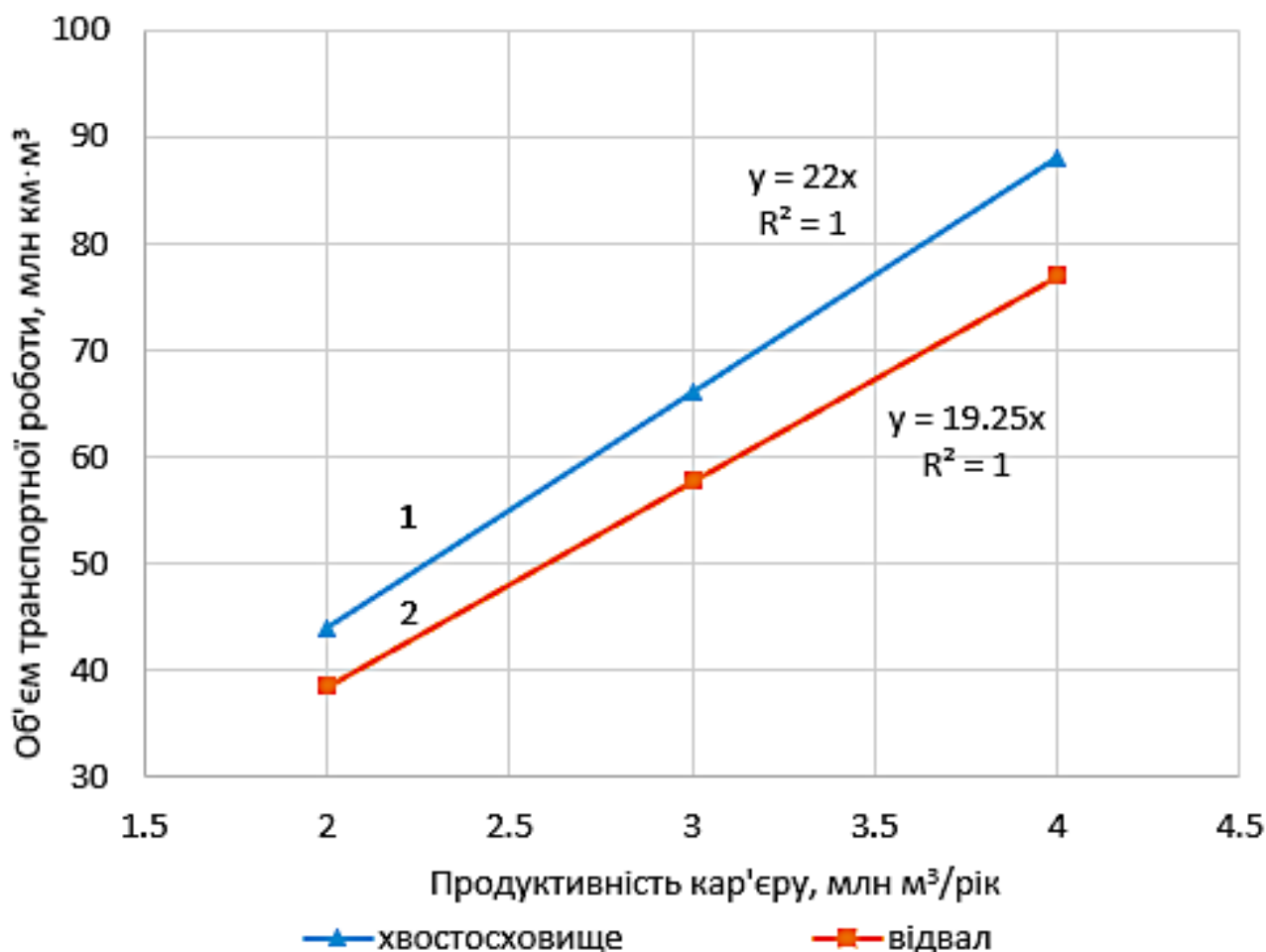


Рис. 2. Залежність об'єму транспортної роботи (за десять років) від продуктивності кар'єру на ділянці між: 1 – стаціонарною збагачувальною фабрикою та хвостосховищем; 2 – цехом переробки хвостів збагачення та внутрішнім відвалом

Отримані показники дозволяють стверджувати, що запропонована схема з повним циклом переробки важкої фракції сприяє досягненню комплексного ефекту і окрім вилучення додаткової важкої фракції титан-цирконієвих компонентів, підвищити рівень ресурсозбереження шляхом скорочення витрат на електроенергію та об'єми споживання технічної води, а також зменшити площі техногенних об'єктів, на яких розташовувалися хвости стаціонарної збагачувальної фабрики.

Розглянемо вплив застосовування схеми з повним циклом переробки важкої фракції, за рахунок розміщення цеху переробки хвостів збагачення поряд зі стаціонарною збагачувальною фабрикою, на параметри формування хвостосховищ і внутрішніх відвалів з вмісних порід.

Основними вихідними даними для розрахунку є параметри, що містяться у табл. 1. Відповідно до них відомо, що в залежності від продуктивності кар'єру щорічне утворення хвостів збагачення знаходиться у діапазоні 0,2–0,4 млн м³ по твердому. Також, відповідно до інформації, що міститься у відкритих джерелах

[2], доля важкої фракції у середньому сягає 12,5 % від об'єму хвостів збагачення. Таким чином цей показник дозволяє порівняти об'єм хвостосховища з наявністю в ньому вмісних порід і в подальшому визначити об'єм вмісних порід, які відділяються при впровадженні цеху переробки хвостів збагачення у цикл роботи гірничого підприємства.

При розрахунку площі хвостосховища і відвалу у виробленому просторі кар'єру використовувалася формула для визначення об'єму зрізаної піраміди. Вихідними даними для розрахунку приймалася висота наливного хвостосховища – 20 м і кути укосів дамби хвостосховища і гідровідвалу – 18 град.

Результати розрахунків параметрів хвостосховища і відвалу вмісних порід при існуючій та запропонованих схемах у твердому стані протягом 10 років експлуатації розсипного титан-цирконієвого родовища наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри техногенних об'єктів (хвостосховище/відвал вмісних порід), сформованих за 10 років функціонування кар'єру за існуючою і запропонованою технологічними схемами

Продуктивність кар'єру, млн м ³	Об'єм хвостосховища по твердому, млн м ³	Площа хвостосховища, га	Об'єм відвалу, млн м ³	Площа відвалу, га
2,0	2,20	14,44	1,75	12,67
3,0	3,30	20,25	2,66	17,97
4,0	4,40	26,01	3,5	22,94

Для порівняння площ техногенних об'єктів (хвостосховище/відвал) в існуючій та запропонованій технологічних схемах визначено їх залежність від продуктивності кар'єру (рис. 3).

Відповідно до встановлених залежностей (рис. 3) використання цеху переробки хвостів збагачення протягом 10 років дозволить скоротити площу порушених земель за рахунок відмови від розміщення хвостосховища до 26,1 га, в залежності від продуктивності кар'єру. У той же час, при застосуванні традиційної схеми з утворенням хвостів збагачення, зростання продуктивності кар'єру у два рази з 2,0 до 4,0 млн м³ призведе до необхідності збільшення площі землі для розміщення хвостосховища з 14,4 га на 80 %.

Використання схеми з цехом переробки хвостів збагачення потребує розміщення вмісних порід, що відділені від доводок збагачення у відвалі виробленого простору кар'єру з можливістю подальшої рекультивації порушених земель. При зростанні продуктивності кар'єру з 2,0 до 4,0 млн м³, вихід вмісних порід з цеху переробки хвостів збагачення складатиме від 187 до 375 тис м³, а площа відвалу для їх розміщення збільшиться на 81% з 12,6 до 22,9 га.

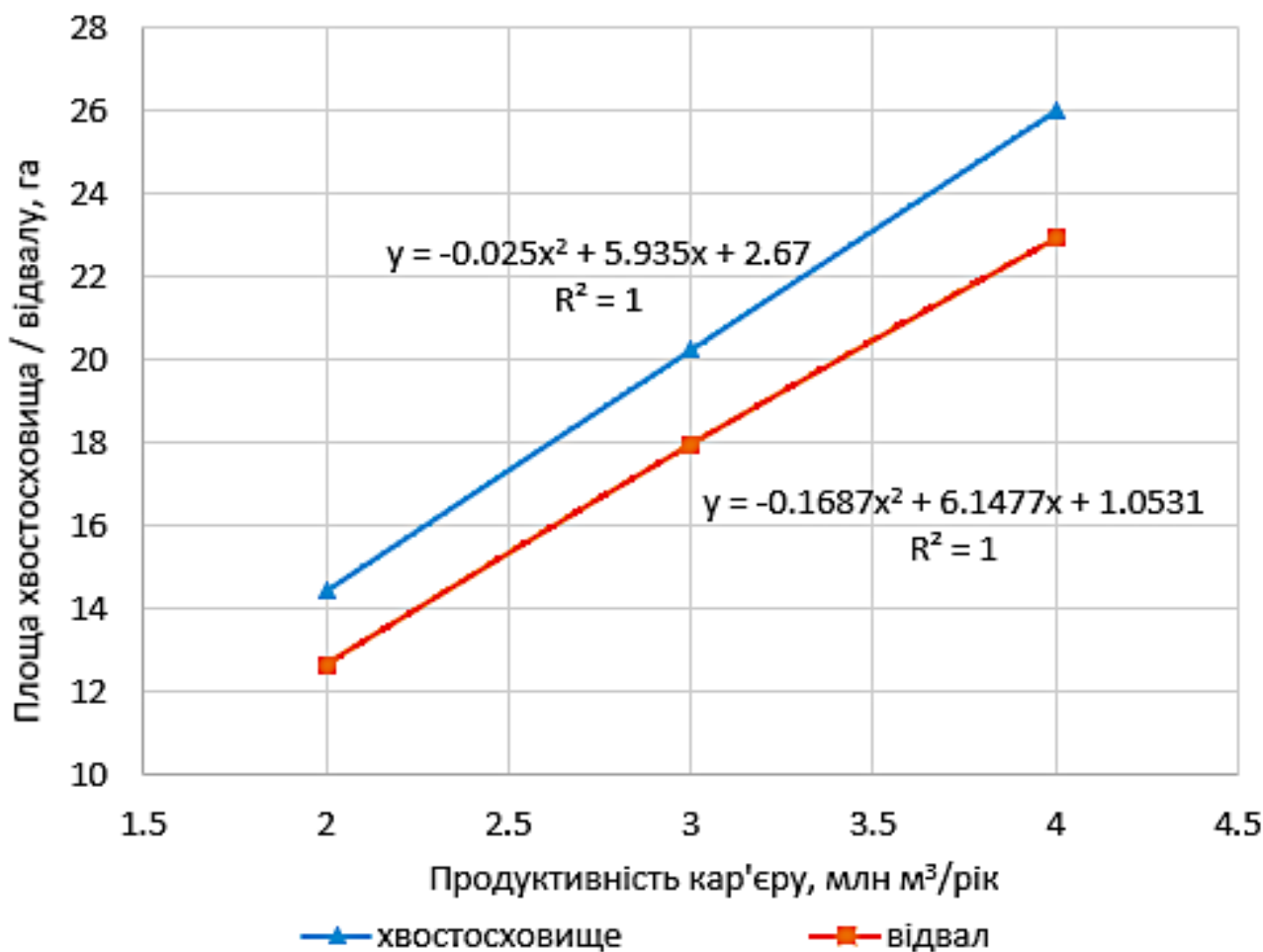


Рис. 3. Вплив продуктивності кар'єру на площу хвостосховища при прямому розміщенні хвостів зі збагачувальної фабрики або відвалу вмісних порід з цеху переробки хвостів збагачення протягом 10 років

При порівнянні площ техногенних формувань (хвостосховище/відвал), що утворюються на кінцевому етапі роботи гірничо-збагачувального комбінату (див. рис. 3), варто відзначити, що при продуктивності кар'єру 2,0 млн м³ площа необхідна для розміщення хвостів збагачення у хвостосховищі складає 14,4 га, у той час як використання цеху переробки хвостів збагачення дозволяє скоротити площу під розміщення вмісних порід до 12,6 га, що на 12 % менше за технологічну схему без ЦПХЗ. Порівняння цих показників при продуктивності кар'єру 4,0 млн м³ дозволяє визначити, що очистка доводок у цеху переробки хвостів збагачення дозволить сформувати відвал площею 22,9 га замість хвостосховища площею 26,1 га, що призведе до зменшення площі техногенного об'єкту на 11 %.

Висновки. Визначено, що запропонована схема з повним циклом переробки важкої фракції дозволяє досягти комплексного ефекту, який полягає в отриманні додаткової товарної продукції титан-цирконієвих компонентів, підвищенні рівня ресурсозбереження за рахунок скорочення витрат на електроенергію, зменшенні об'ємів споживання технічної води для транспортної роботи, а також зменшенні площі хвостосховища.

Встановлено, що схема з повним циклом переробки важкої фракції титан-цирконієвих родовищ за рахунок включення в робочий цикл цеху переробки

хвостів збагачення дозволяє скоротити об'єм транспортної роботи на 14 % у порівнянні з існуючою технологічною схемою. При зростанні продуктивності кар'єру до 4,0 млн м³, об'єм транспортної роботи скорочується з 88 до 77 млн км · м³ протягом 10 років роботи гірничо-збагачувального комбінату.

Використання схеми з повним циклом переробки передбачає вилучення з доводок збагачення важкої фракції, що перетворює хвости збагачення у відвальні вмісні породи, які розміщуються у відвалі виробленого простору кар'єру з можливістю подальшої рекультиватії. Доведено, що при продуктивності кар'єру 2,0 млн м³ площа необхідна для розміщення хвостів збагачення у хвостосховищі складає 14,4 га, у той час як запропонована схема дозволяє скоротити площу під розміщення вмісних порід на 12 % до 12,6 га. При збільшенні продуктивності кар'єру до 4,0 млн м³ запропонована схема дозволяє замість хвостосховища сформувати відвал площею 22,9 га, що на 11 % менше площі хвостосховища технологічній схемі без застосування ЦПХЗ.

Представлені результати отримано в рамках виконання Проєкту 2025.02/0048 «Обґрунтування параметрів ресурсозберігаючої технології замкнутого циклу при освоєнні критичної сировини титанових родовищ» за підтримки Національного фонду досліджень України.

Перелік посилань

1. Lozhnikov, O.V., Shustov, O.O., Chebanov, M.O. & Perkova, T (2022). Methodological principles of the selection of a resource-saving technology while developing water-bearing placer deposits. *Mining of Mineral Deposits*, (16), 115–122. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.115>
2. Lozhnikov, O., Sobko, B., Pavlychenko A. (2023). Technological Solutions for Increasing the Efficiency of Beneficiation Processes at the Mining of Titanium-Zirconium Deposits. *Inzynieria Mineralna*, 2023, (1), pp. 61–68. <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-07>
3. Hrinchenko, O., & Yushin, O. (2019). Potential of mining waste recycling in Ukraine. In *Monitoring 2019. European Association of Geoscientists & Engineers*. Vol. 2019, No. 1, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903172>
4. Singh, S., Maurya, P., Karmakar, A., Maurya (2025). Mining tailings as a frontier for sustainable nanomaterials: advancing circular economy and environmental innovation. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(7), 265. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02566-x>
5. Ложніков О.В. (2026) Фактори впливу на втрати титан-цирконієвих мінералів при розробці кар'єру з використанням збагачувальної фабрики колективного концентрату. XXIV Міжнародна науково-технічна конференція "Розвиток промисловості та суспільства". Кривий Ріг. 27-29 травня 2026. с. 84. <https://www.knu.edu.ua/konferencii/mizhnarodna-naukovo-tehnichna-konferenciya-nauka-promyslovist-suspil-stvo-2026-r>
6. Kinnunen, P. H. M., & Kaksonen, A. H. (2019). Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of cleaner production*, 228, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>
7. Sobko, B., Lozhnikov, O., & Drebenshtedt, C. (2020). Investigation of the influence of flooded bench hydraulic mining parameters on sludge pond formation in the pit residual space. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 168, p. 00037). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800037>
8. Oliynik, T., Lyashenko, V., Dudar, T., & Oliynik, M. (2024). Increasing the Efficiency of Titanium-Iron ORE Enrichment Through Using New Type Separators. *Mining Review/Revista Minelor*, 30(4). <https://doi.org/10.2478/minrv-2024-0061>
9. Hrinchenko, O., & Yushin, O. (2019). Potential of mining waste recycling in Ukraine. In *Monitoring 2019* (Vol. 2019, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903172>
10. Bubnova, O., Mishchenko, T., & Buniaieva, I. (2024). Current condition, distribution and probable reserves of mineral raw materials in technogenic objects of the mining industry of Ukraine. *Геотехнічна механіка*, (171), 59–73. <https://doi.org/10.15407/geotm2024.171.059>

11. Lechner, M., Gerold, E., & Flachberger, H. (2025). Processing of Ukrainian Ilmenite-bearing Heavy Sands as a Contribution to Improving Europe's Self-supply in Critical Raw Materials from Its Own Deposits: Presentation of a PhD-Project. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 170(6), 351–356. <https://doi.org/10.1007/s00501-025-01600-w>
12. Adamchuk, A., Pavlychenko, A., Shustov, O., & Bondarenko, A. (2024). Research of land-saving schemes of mining the horizontal sedimentary mineral deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1319(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1319/1/012012>
13. Zhai, J., Wang, H., Chen, P., Hu, Y., & Sun, W. (2020). Recycling of iron and titanium resources from early tailings: From fundamental work to industrial application. *Chemosphere*, 242, 125178. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125178>

ABSTRACT

Purpose. To determine the efficiency of the technological scheme for the development of titanium-zirconium deposits with a full cycle of heavy fraction processing in terms of the volume of hydro-haulage work and the required area of tailings storage.

The methods. The analytical research method was used for theoretical generalizations and the formulation of research conclusions. The graphical method was used to determine the parameters of the technological scheme for a full cycle of heavy-fraction processing of titanium-zirconium deposits. Comparative methods allowed us to determine the influence of pit productivity on indicators of hydrohaulage work volume and the required area for tailings storage in a technological scheme with a full-cycle ore processing.

Findings. It was established that the proposed scheme, with a full cycle of heavy-fraction processing of titanium-zirconium deposits, reduces the volume of hydrohaulage work by 14% in the area between the stationary enrichment plant and the tailings storage by including the enrichment tailings processing shop in the operating cycle. It was determined that, with an increase in the pit's productivity to 4.0 million m³, the volume of hydrohaulage work would be reduced from 88 to 77 million km·m³ over 10 years of the mining and processing plant's operation.

The originality. The dependence of the tailings storage facilities areas and hydraulic dumps on the productivity of the mining enterprise was established, which allows us to determine that when using a scheme with a collective concentrate factory on the pit slope top, the area of the tailings storage facility will be 14.4–22.9 hectares, while the proposed scheme, with an additional processing plant for enrichment tailings, allows us to reduce the area for placing host rocks by 11–12%.

Practical implementation. The obtained research results allow us to establish that the proposed scheme with a full cycle of the heavy fraction processing allows us to achieve a comprehensive effect, which consists in obtaining additional marketable products of titanium-zirconium components, increasing the level of resource conservation by reducing electricity costs, reducing the volume of technical water consumption for hydrohaulage work, and reducing the area of tailings facilities.

Keywords: *pit, titanium-zirconium deposits, critical raw materials, resource conservation, technologies with a full cycle of ore processing, hydrohaulage work.*

дата першого надходження статті до видання	09.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	15.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026