

2	Гладка Олександра Анатоліївна	ЗГМО-24-1м	Обґрунтування заходів зі зниження зношення пульпопроводів на гірничо- збагачувальних підприємствах	Горбачов Ю.Г. проф., канд.тех.наук
---	-------------------------------------	------------	--	--

ВСТУП

Гідротранспорт є однією з ключових технологій на гірничо-збагачувальних підприємствах рудної промисловості України, забезпечуючи ефективне та безперервне переміщення рудної пульпи від дробильно-сортувальних комплексів до збагачувальних цехів, а також транспортування відходів до шламових відстійників. Завдяки високій продуктивності, можливості автоматизації та порівняно низьким експлуатаційним витратам, гідротранспорт залишається найпоширенішим способом внутрішньозаводського транспортування твердої сировини на більшості підприємств Кривбасу, Кременчуцького та Білозерського залізорудних басейнів.

Основою системи гідротранспорту є трубопроводи — пульпопроводи, водопроводи, шламопроводи, якими здійснюється рух різних середовищ: від чистої води до висококонцентрованих рудних пульп із значним вмістом твердих фаз (до 60–70 % за масою). Особливе значення мають пульпопроводи, які працюють у надзвичайно важких умовах: під високим тиском, при значних швидкостях потоку (2,5–4,5 м/с) і постійному контакті з абразивними частинками мінералів, зокрема кварцу, що має високу твердість за шкалою Мооса. У результаті цього матеріал труб зазнає інтенсивного зношення, що призводить до зниження їх герметичності, аварійних витоків, простоїв устаткування та зростання витрат на обслуговування.

Основними формами зношення трубопроводів у системах гідротранспорту є гідроабразивне, корозійно-абразивне та в окремих випадках — кавітаційне зношення. Гідроабразивний знос виникає внаслідок постійного механічного впливу твердих частинок, які, рухаючись з високою швидкістю, відтирають матеріал стінки труби, особливо в зонах турбулентності — вигинах, трійниках, арматурі. Висн призводить до значних економічних втрат. Механізм гідроабразивного зносу визначається закономірностями пластичної деформації та різання мікрооб'ємів матеріалу і його інтенсивність значною мірою залежить від гідравліки потоку, фізико-механічних властивостей абразиву, поверхні, що

зношується, та умов їх динамічної взаємодії. Інтенсивність гідроабразивного зношування зумовлена масою, швидкістю абразивних частинок та кутом їх напрямку щодо поверхні, що зношується. Наприклад, багерні насоси, як правило, замінюються після 3000-4000 годин роботи, а ремонтуються кілька разів за цей період. Щороку значні обсяги труб (до 15 тис. тонн у період 1964-1967 рр., а наразі ця цифра збільшилася у 1,5-2 рази) витрачаються на заміну зношених елементів систем гідрозолошлаковидалення.

Окрім гідроабразивного, труби також схильні до корозійного зношення, особливо у разі транспортування хімічно активних середовищ або при перервах у роботі системи, коли труби залишаються без консервації. Корозійно-абразивне зношення проявляється в умовах одночасної дії хімічного середовища (наприклад, при збагаченні з використанням реагентів) та механічного впливу, що значно прискорює руйнування матеріалу. Корозія може бути внутрішньою, яку можна попередити додаванням інгібіторів (наприклад, гашеного вапна) для підтримки показника рН пульпи на рівні 10-11, або зовнішньою, для захисту від якої застосовується ізоляція та катодний захист.

Також у деяких випадках може виникати кавітаційне зношення, пов'язане з процесами утворення та руйнування кавітаційних порожнин в потоці рідини, особливо в насосах та на ділянках з різкою зміною швидкості або тиску. У конструкціях насосів, наприклад, передбачені заходи для захисту від кавітації, а при дослідженні центробіжних насосів вивчаються гідроабразивний знос і кавітація. Незважаючи на те, що діафрагми насосів можуть бути виготовлені з гуми, вони схильні до частих руйнувань через кавітацію, а для запобігання ерозії слід обмежувати ходи клапанів.

На сьогоднішній день проблема інтенсивного зношення пульпопроводів залишається актуальною для більшості гірничо-збагачувальних підприємств. За даними експлуатації на підприємствах ДТЕК Мінерал, "Північний ГЗК" та "АрселорМіттал Кривий Ріг", середній термін служби сталевих пульпопроводів складає 12–18 місяців, а на окремих ділянках — особливо в зонах вигинів — не перевищує 6–8 місяців. Це призводить до значних фінансових витрат на заміну

труб, ремонтні роботи, простої технологічних ліній, а також загрожує екологічній безпеці через можливі витoki шкідливих речовин у навколишнє середовище.

З огляду на інтенсивний знос трубопроводів і насосів, що використовуються в системах гідрозолошлаковидалення та гідротранспорту загалом, розрахунок і прогнозування величини зносу та своєчасна розробка способів захисту мають велике народногосподарське значення та принесуть значний економічний ефект. Втім, у вітчизняній та закордонній технічній літературі цьому питанню приділено дуже мало уваги, а нормативні документи для розрахунку величини абразивного зносу пульпопроводів і насосів практично відсутні. Це призводить до того, що при проектуванні систем гідротранспорту розрахунок абразивного зносу основних елементів, як правило, не виконується, а термін служби обладнання оцінюється лише орієнтовно.

Таким чином, розробка та впровадження комплексних заходів зі зниження зношення пульпопроводів та насосів є критично важливими для підвищення надійності, ефективності та економічності роботи гідротранспортних систем на гірничо-збагачувальних підприємствах.

Отже, обґрунтування заходів зі зниження зношення пульпопроводів на гірничо-збагачувальних підприємствах є **актуальним науково-технічним завданням**.

Мета роботи - підвищення ресурсу та економічної ефективності експлуатації трубопроводів систем гідротранспорту абразивних пульп на рудних гірничо-збагачувальних комбінатах за рахунок наукового обґрунтування комплексу методів та заходів щодо зниження інтенсивності їх зношування

Об'єкт дослідження - процес гідротранспортування рудної пульпи та зношування трубопроводів систем гідротранспорту абразивних пульп на рудних гірничо-збагачувальних фабриках.

Предмет дослідження - режимні параметри та характеристики, що визначають інтенсивність і механізм зношування.

Наукове положення.

1. Вперше запропоновано систему критеріїв для оцінювання ефективності методів захисту трубопроводів для транспортування пульпи, які враховують довговічність, надійність, гідравлічну ефективність, технологічність, економічність, екологічність і безпеку, яка ґрунтується на числових параметрах та експертних оцінках.
2. Вперше запропоновано розгорнуте дерево прийняття рішень щодо вибору методів захисту трубопроводів для транспортування пульпи, яке на основі розгорнутих вихідних даних та з урахуванням розробленої системи критеріїв, дозволяє обрати один (або кілька) метод захисту.

1. АНАЛІЗ СХЕМ ГІДРОТРАНСПОРТУ НА ГЗК

1.1. Аналіз схем гідротранспортування рудних гірничозбагачувальних фабрик

Гідротранспорт є невід’ємною складовою технологічного ланцюга гірничо-збагачувальних фабрик (ГЗФ), забезпечуючи переміщення рудної сировини у вигляді пульпи — суміші подрібненої руди з водою — між окремими переділами: від дробильно-сортувальних комплексів до збагачувальних агрегатів, а також транспортування відходів до шламових відстійників або шахт для закладання. Гідротранспортування є одним із найбільш перспективних видів переміщення руд, вугілля та інших корисних копалин. Ця технологія широко використовується у гірничо-збагачувальних підприємствах для гідровидобутку, транспортування, збагачення та складування різних матеріалів, включаючи відходи збагачення. Вона дозволяє автоматизувати весь процес переміщення сипучих вантажів, мінімізувати втрати матеріалу та зменшити використання сільськогосподарських земель. Ефективність роботи всієї фабрики значною мірою залежить від надійності, продуктивності та енергоефективності системи гідротранспорту.

Класифікація систем гідротранспортування. Системи трубопровідного транспорту класифікуються:

За технологічним призначенням:

- внутрішньофабричні (внутрішньотехнологічні): застосовуються при видобутку, збагаченні та складуванні продуктів збагачення та відходів. Вони включають:
 - безнапірне та напірне гідротранспортування при видобутку корисних копалин;
 - гідропідйом з шахт і рудників;
 - гідротранспортування від рудника та шахти до збагачувальної фабрики;
 - внутрішньофабричний гідротранспорт;
 - подача концентрату до споживача;

- подача хвостів на хвостосховище та їх розподіл;
- дальнього гідротранспортування: призначені для транспортування руди, вугілля, концентратів на десятки та сотні кілометрів.

Особливе значення мають багатоступінчасті системи подачі, які можуть бути реалізовані з розривом або без розриву потоку на перекачувальних станціях. Перевага надається схемам без розриву потоку (так звані "насос у насос") через їх економічність, відсутність втрат енергії, кращі умови для автоматизації та спокійніші умови роботи в аварійних ситуаціях.

За технологічним призначенням розрізняють такі основні види схем:

- схема транспортування сирової руди від складу/дробильного відділення до збагачувального цеху. Ця схема зазвичай передбачає переміщення крупнодрібненої (до 20-50 мм) пульпи з високою концентрацією твердого. Для неї характерні найбільш важкі умови з точки зору абразивного зношування через наявність крупних, гострих частинок;
- схема транспортування продуктів збагачення (концентратів). Ця ланка транспортує вже збагачений корисний компонент. Пульпа може мати відмінні від сировини реологічні властивості та гранулометричний склад (наприклад, тонкий помел), що змінює характер зношування.
- схема транспортування відходів (хвостів) збагачення на хвостосховище. Ця система є найбільш протяжною на ГЗФ. Вона транспортує пульпу з дуже низькою концентрацією твердого, але великим загальним обсягом. Знос тут часто має рівномірний характер, але через великі довжини магістралей питання довговічності труб також є критичним.

За тиском у системі та способом переміщення розрізняють:

- безнапірний (самопливний) гідротранспорт. Рух пульпи відбувається під дією сили тяжіння. Трубопроводи у таких схемах працюють не під тиском, але знос від абразивного діяння залишається значним, особливо в місцях поворотів і уступів. Такі схеми характерні для переміщення всередині цехів;
- напірний (примусовий) гідротранспорт. Рух пульпи забезпечується насосними станціями (гідротранспортними установками). Це основний тип

схем для магістрального транспортування на значні відстані. Саме в цих системах виникають найбільш інтенсивні види зношування: абразивний знос в поєднанні з кавітаційним (у насосах і на ділянках з різкою зміною тиску) та високим гідродинамічним навантаженням.

За способом організації потоку:

- прямоточні схеми. Пульпа транспортується від точки А до точки Б без повернення води.
- оборотні (з оборотним водокористуванням) схеми. Очищена вода з хвостосховища або згущувачів повертається назад на фабрику по окремих трубопроводах. Ця вода часто має підвищену корозійну активність через присутність хімічних реагентів, що збагачуються, що додатково посилює корозійно-ерозійний компонент зношування.

Елементи гідротранспортних систем (ГТС) та їх особливості. Усі схеми сучасних ГТС включають наступні основні елементи:

- джерела води (свіжа, зворотна, технічна);
- ємності та зумпфи: для приготування та зберігання пульпи, повинні забезпечувати надійну подачу та дозування продукту, запобігати зависанню матеріалу. Рекомендується, щоб кут нахилу бічних стінок ємностей був на 15–20° більшим за кут природного укосу матеріалу. Конічні круглі зумпфи є найбільш придатними;
- обладнання для часткового або повного згущення пульпи: включає циклони, згущувачі (радіальні, полицеві).
- насосне обладнання: залежно від призначення, використовуються різні типи насосів:
 - ґрунтові (відцентрові) насоси: типу "Гр" та рідше "ШНВ" застосовуються в системах гідрозолошлаковидалення ТЕС. Сучасні ґрунтові насоси мають високу продуктивність (наприклад, ГрТ8000/71). Їх недоліком є висока швидкість в камері робочого колеса, що призводить до стирання шламу та зношування;

- поршневі та плунжерні насоси: використовуються для подачі концентратів на великі відстані та при високих напорах. Вони вимагають амортизаторів пульсацій тиску (наприклад, посудини з еластичними мішками, заповненими азотом) для захисту від гідравлічного удару;
- ерліфтні установки: застосовуються для гідропідйому пульпи з великих глибин. Переваги: відсутність рухомих деталей у потоці, мінімальні розміри підземних виробок, самовирівнювання. Недолік: висока енергоємність.
- трубопроводи: є центральною частиною ГТС. Важливими аспектами яких є:
 - матеріали: сталеві труби, біметалічні (зносостійкість у 3-6 разів вища), футеровані кам'яним литтям (збільшують термін служби у 5-10 разів), термостійке скло (СІМ), поліуретан, поліетилен, чавунні, керамічні, полібутиленові, гумові, азбестоцементні, склопластикові, кам'яні, дерев'яні, багатошарові фанерні;
 - розрахунки на міцність та знос: товщина стінки труби розраховується за двома граничними станами, враховуючи кільцеві напружки, що досягають межі міцності або текучості;
 - з'єднання: зварні, фланцеві, швидкорознімні (БРС). Швидкорознімні з'єднання прискорюють монтажні-демонтажні роботи та знижують гідродинамічний тиск при гідравлічному ударі;
 - вигини (коліна): є місцями інтенсивного гідроабразивного зносу, що перевищує загальний знос прямолінійних ділянок;
 - захист від зносу та корозії: включає вибір оптимальних режимів транспортування, застосування зносостійких матеріалів, футерування, усунення місць підвищеного зносу, контроль стану трубопроводів;
- запірно-регулююча арматура: засувки, зворотні клапани, регулятори тиску. Зношування клапанів і засувок є частою причиною зупинок. Рекомендується використовувати арматуру зі сталевих лиття для високих тисків;

- системи контролю: безперервний та оперативний контроль стану трубопроводів здійснюється за допомогою датчиків зносу та ультразвукових товщиномірів. Гамма-промені радіоізотопні густиноміри дозволяють визначати розподіл щільності пульпи по перерізу пульпопроводу.

Спеціальні види гідротранспорту:

- гідроконтейнерний транспорт: для вугілля та руди з шахт до ЦОФ. Переваги: менша витрата води, менше подрібнення матеріалу. Використовуються спеціальні контейнери, що переміщуються потоком води;
- ерліфтний гідропідйом: ефективний для високоабразивної пульпи з великих об'ємів, особливо при підйомі на 10-20 м.

Приклади схем гідротранспортування на ГЗК. На рис. 1.1 показані схеми гідротранспортування на ГЗК, а на рис. 1.2 - схеми багатоступінчастого гідротранспортування (ГТС) корисних копалин. Ці схеми, здійснюються для подачі руд та вугілля на сотні кілометрів.

На рис. 1.2-1.4 показані схеми багатоступінчастих ГТС, що застосовуються на ГЗК чорної та кольорової металургії для подачі руд, концентратів або хвостів. Найчастіше застосовують багатоступінчасті системи без розриву потоку на станціях, що перекачують (див. рис. 1.2), звані «насос в насос». Проте є схеми із розривом подачі (див. рис. 1.4).

Принципово такими ж є схеми подачі корисних копалин при дальньому гідротранспортуванні, при якій, як правило, застосовують поршневі або плунжерні насоси.

Умови роботи пульпопроводів суттєво відрізняються за ділянками:

- на вході в млини пульпа має високу крупність частинок (до 10–15 мм) і високу абразивність;
- після класифікації в гідроциклонах — більш дрібнозерниста, але з високою швидкістю циркуляції;
- у шламопроводах — висока концентрація тонкодисперсних частинок (переважно кварц), що призводить до істотного гідроабразивного зносу.

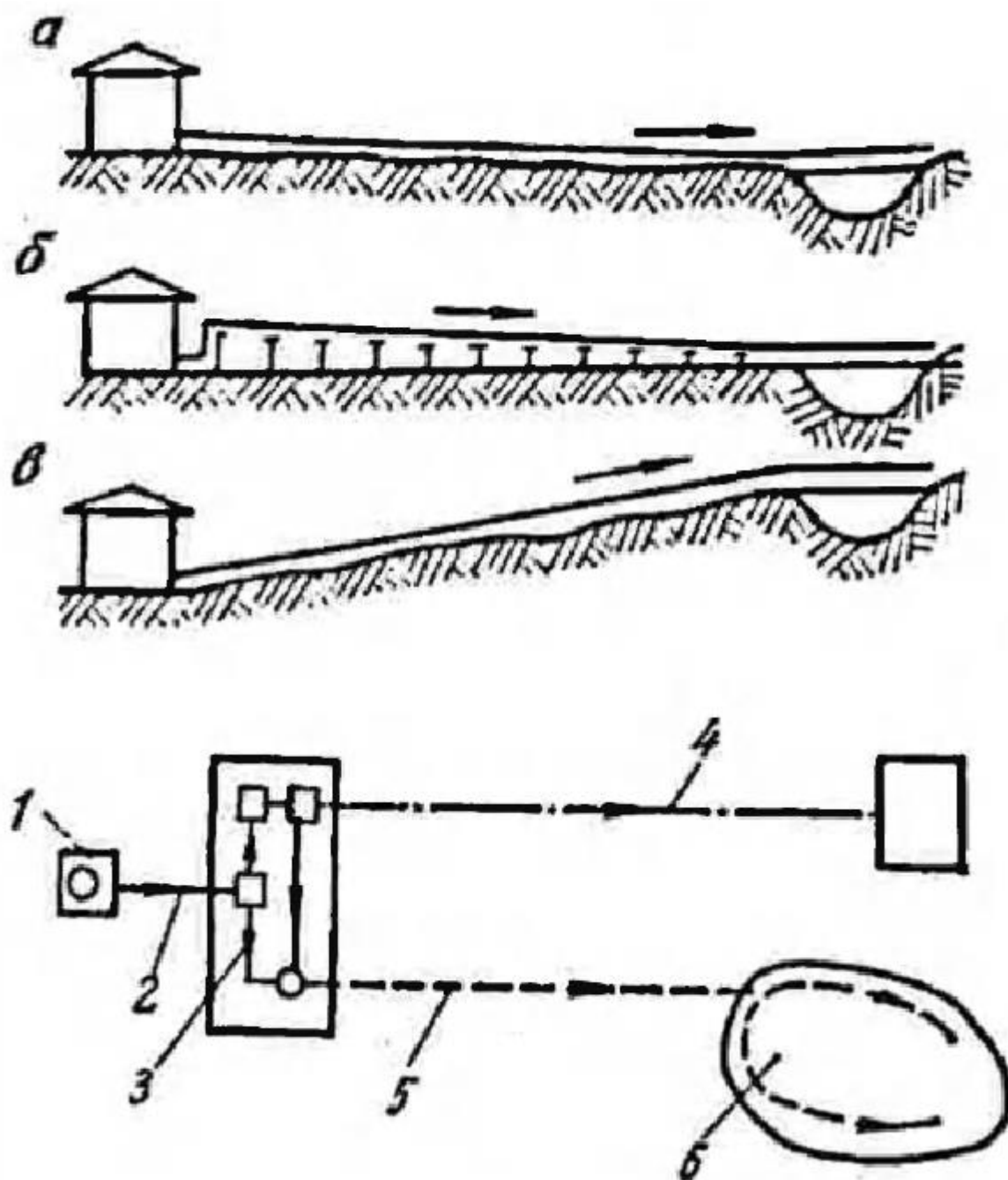


Рис 1.1 - Схеми гідротранспорту на ГЗК: а - безнапірна; б - комбінована; в - напірна; 1 - гідропідйом з копальні (шахти); 2 - подача руди (вугілля) на збагачувальну фабрику; 3 - внутрішньофабричний гідротранспорт; 4 - подача концентрату до споживача; 5 - подача хвостів па хвостосховища; 6 - розподіл хвостів

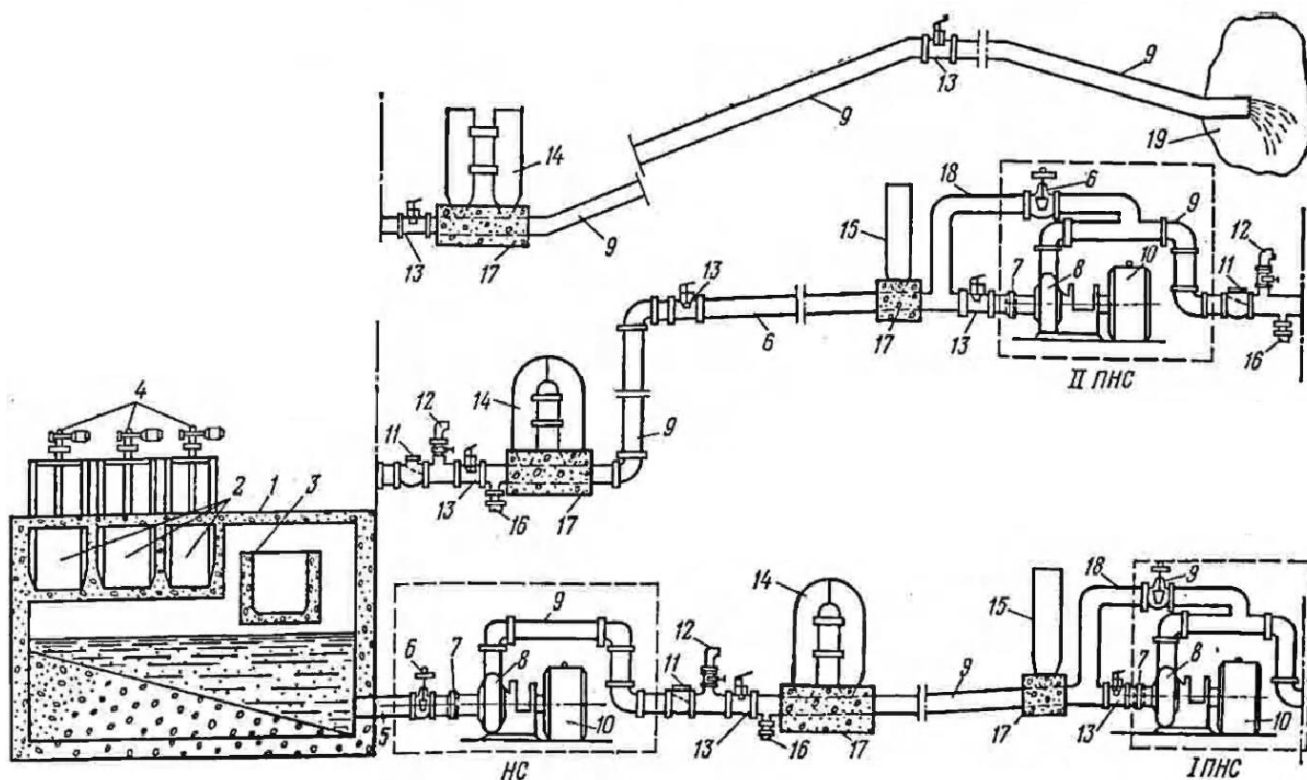


Рис. 1.2 - Схеми багатоступінчастої ГТС на ГЗК при послідовно включених насосах: НС - насосна станція; I ПНС та II ПНС перекачні насосні станції; 1 - зумпф; 2, 3 - зливний і переливний (із зумпфа) лотки; 4 - шибера; 5, 9 всмоктуючий і нагнітальний трубопроводи; 6 - електрифікована засувка; 7 - компенсатор температурних розшмрень труб; 8 - насос; 10 - електродвигун; 11 - зворотній клапан; 12 - розривна шайба; 13 - впускно-випускний клапан; 14, 15 - одинарна та подвоєна повітряні колони; 16 - скидна засувка; 17 - бетонний анкер; 18 - обводна лінія; 19 - хвостосховище

На підприємствах Кривбасу (наприклад, Північний ГЗК, АрселорМіттал Кривий Ріг) найбільш поширеними є напірні схеми з використанням центробіжних насосів типу ЦНС, ГР, КМ та сталевих труб діаметром 150–400 мм. Траси часто мають значну протяжність (1,5–4 км), велику кількість вигинів (30–60 на трасі) і зміну висотних позначок, що створює додаткові гідродинамічні навантаження.

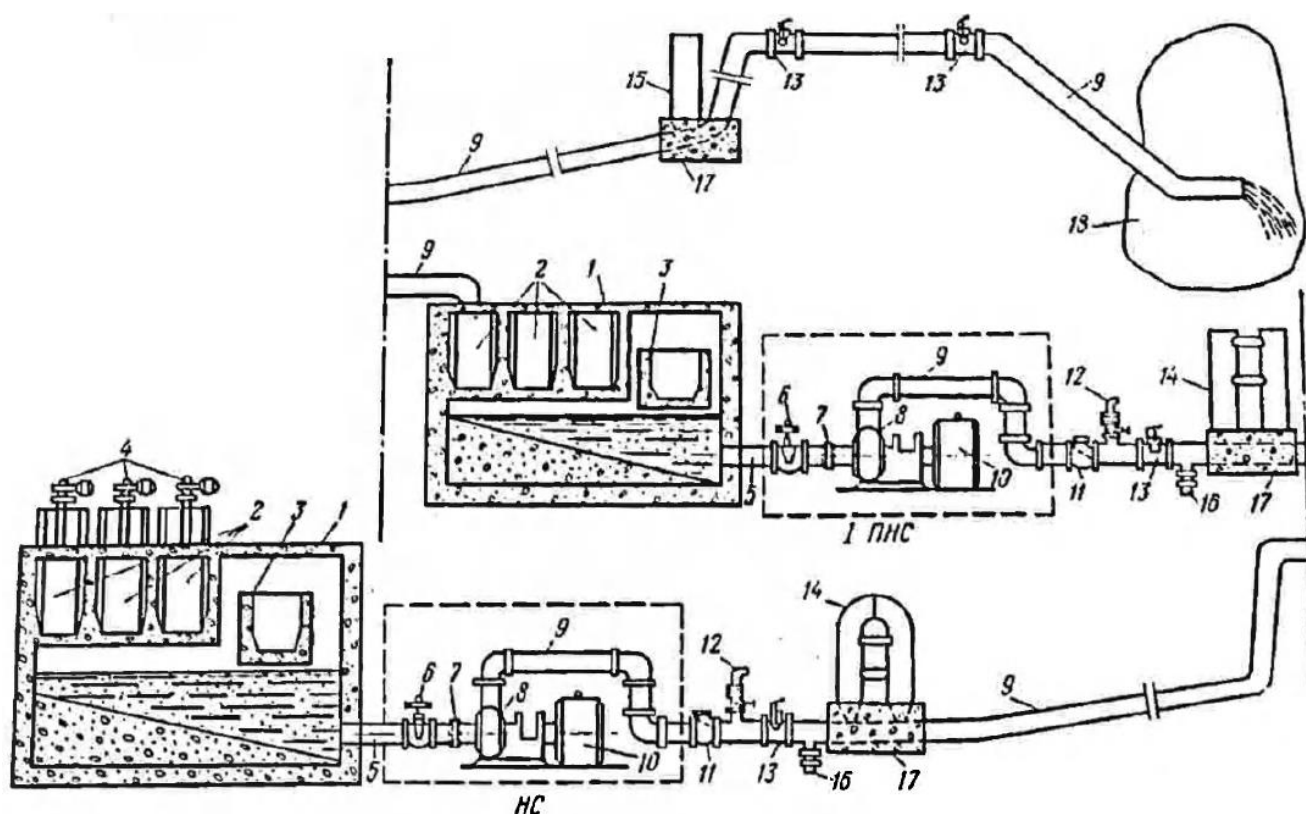


Рис. 1.3 - Схема багатоступінчастої ГТС з розривом потоку на перекачувальних насосних станціях: НС та I ПНС - основна та перекачувальна насосні станції; 1 - зумпф; 2, 3 - зливний та переливний лотки; 4 - шибера; 5, 9 - всмоктуючий та напірний трубопроводи; 6 - електрифікована засувка; 7 - температурний компенсатор; 8 - ґрунтовий насос; 10 – електродвигун; 11 - зворотній клапан; 12 – розривна шайба; 13 - впуско-випускний клапан; 14 і 15 - здвоєна та одинарна повітряні колони; 16 - скидна засувка; 17 - бетонний анкер; 18 - хвостосховище

Особливістю сучасних тенденцій є поступове впровадження висококонцентрованих схем гідротранспорту (ВКГТ), де концентрація твердої фази досягає 70–75 %, що дозволяє знизити витрати води та енергії, але суттєво збільшує абразивний вплив на стінки труб.

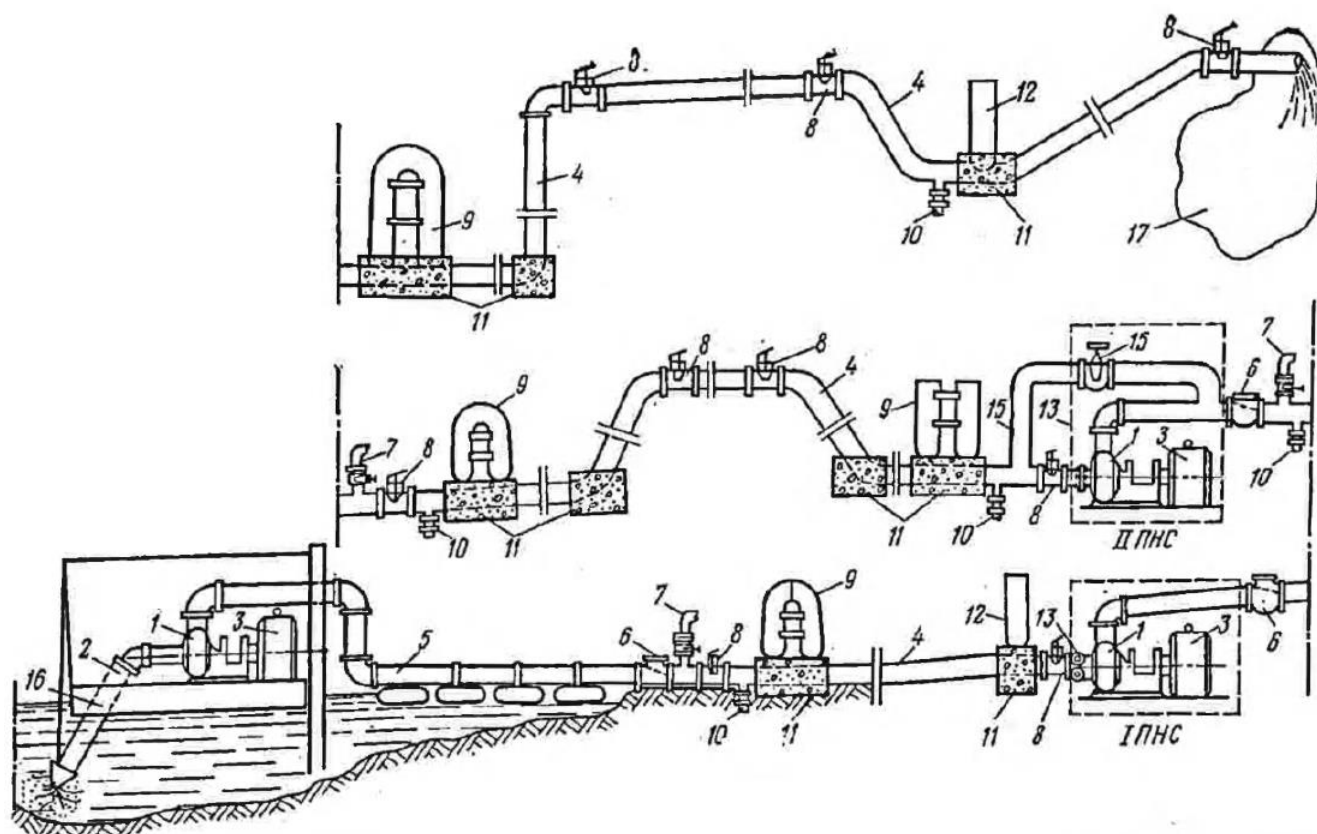


Рис. 1.4 - Схема багатоступінчастої ГТС під час роботи плавучого землесосного снаряда в накопичувачі хвостів: I ПНС та II ПНС - перекачні насоси першого і другого підйому; 1 - ґрунтовий насос; 2, 4, 5 - відповідно всмоктуючий, нагнітаючий і плавучий трубопроводи; 3 – електродвигун; 6 - зворотній клапан; 7 - розривна діафрагма; 8 - вантуз; 9 і 12 - здвоєна та одинарна повітряні колони; лінії; 10 - скидна засувка; 11 - бетонний анкер; 13 - компенсатор; 14 - обвідна лінія; 15 - електрифікована засувка; 16 - земснаряд; 17 – намив

Наведені вище схеми враховують застосування низьконапірних ґрунтових відцентрових насосів, що вимагає влаштування пульпонасосних станцій (ПНС) через кожні 2-3 км.

На рис. 1.5 показана схема гідротранспортування залізо-рудного концентрату з використанням високонапірних поршневих та плунжерних насосів. При цьому подачу важкого концентрату на відстань 26,5 км здійснює один насос, що розвиває напір (6—8) МПа.

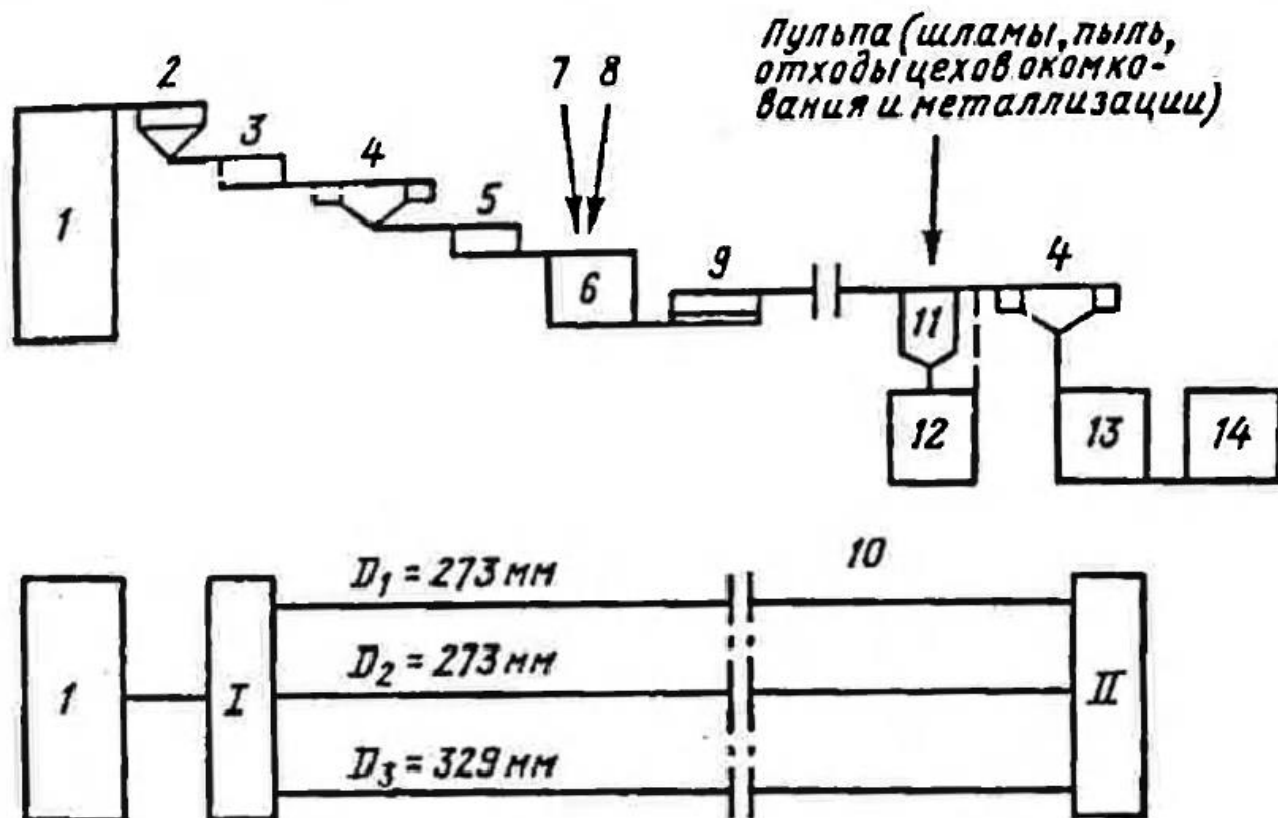


Рис. 1.5 - Схема гідротранспортування залізорудного концентрату від ГЗК до металургійного комбінату: I н II – головна і кінцева станція; 1 - збагачувальна фабрика; 2- установка відсіву руди більше 0,071 мм; 3 і 5-намагнічує і розмагнічує установки; 4 -згущувач; 6-ємність для пульпи; 7 і 8 - подача води та інгібіторів; 9- головні насоси; 10 - пульпогін довжиною 26,5 км; 11- пульпопрjemна; 12- резервуар для зберігання пульпи; 13 - обсвоживаність; 14-аварійна ємність

Кілька закордонних систем транспортування:

- рудник «Lengede Broystedt» (ФРН): гідропідйом залізної руди з глибини 130 м двоступінчастими та одноступінчастими насосами. Це дозволило значно збільшити добовий видобуток;
- японські гідропідйомники (фірма «Hitachi»): застосовуються для підйому дрібних шламів (до 2 мм) з використанням водозаповнених камер. Заявляється 30-кратне збільшення терміну служби установок порівняно з насосами;

- аргентина, Бразилія, Мексика: магістральні пульпопроводи великої довжини та діаметру для транспортування рудного концентрату (залізорудного) з використанням плунжерних та поршневих насосів, що працюють паралельно.

Оптимізація та екологічні аспекти. Оптимізація гідротранспортних систем полягає у виборі найбільш економічних параметрів транспортування (швидкість, концентрація пульпи).

Гідротранспортування також має важливе екологічне значення, забезпечуючи мінімальне забруднення навколишнього середовища порівняно із залізничними та автомобільними перевезеннями. Особлива увага приділяється:

- зменшенню втрат води та переходу ГЗК на внутрішньофабричне водопостачання;
- згущенню хвостів збагачувальних фабрик;
- рекультивації земель, що займають хвостосховища.
- пилопригніченню на хвостосховищах шляхом покриття сухих пляжів суглинковим шаром.

Аналіз показує, що технологічні схеми гідротранспорту на рудних ГЗФ відрізняються за призначенням, параметрами потоку та умовами експлуатації. Ця різноманітність обумовлює різний характер, механізм та інтенсивність зношування трубопроводів. Отже, немає універсального рішення для зниження зносу. Вибір оптимального методу захисту (матеріал, товщина стінки, конструктивні рішення) повинен ґрунтуватися на глибокому аналізі конкретної технологічної схеми, властивостей транспортуємої пульпи та режимних параметрів її руху. Це обґрунтовує необхідність комплексного підходу до дослідження, запропонованого в даній роботі.

1.2. Умови експлуатації гідротранспортних мереж рудних гірничозбагачувальних фабрик

Гідротранспортні системи (ГТС) на гірничозбагачувальних комбінатах (ГОКах) широко використовуються для переміщення руди, вугілля, концентратів, шламів та відходів збагачення. Ці системи мають великі резерви потужності та економічної ефективності, дозволяючи повністю автоматизувати процес транспортування сипучих вантажів, мінімізувати втрати матеріалу та зменшити використання сільськогосподарських угідь. Експлуатація гідротранспортних мереж на рудних гірничозбагачувальних фабриках (ГЗФ) відбувається в умовах високого навантаження, що обумовлене агресивним складом транспортуваних середовищ, значними гідродинамічними параметрами та складною конфігурацією трас. Основними факторами, що визначають інтенсивність зношення трубопроводів, є фізико-хімічні властивості рідин, їхня абразивність, швидкість руху, робочий тиск, діаметр і матеріал труб.

1.2.1. Перекачувані рідини та їхні параметри:

В ГТС рудних ГОКів перекачуються різноманітні гідросуміші, включаючи:

- рудна пульпа: Дрібнозерниста поліметалічна рудна маса;
- залізорудний концентрат: наприклад, від ГЗК до електрометалургійного комбінату;
- хвости збагачення: відходи збагачення, такі як марганцеві шлами, хвости флотації, що подаються на хвостосховища;
- вугільні шлами / водовугільні суспензії: при транспортуванні вугілля, зокрема бурого вугілля, що може самозайматися;
- цементна сировина: суміш глинистої маси з дробленим вапняком;
- зола, шлак, золошлакові суміші: відходи теплових електростанцій, які також можуть транспортуватися по пульпопроводах.

Розглянемо основні параметри перекачуваних рідин.

Концентрація пульпи:

- залізорудний концентрат: може мати 40-45% твердого вмісту, а згущений продукт — до 60-70% твердого;

- мідний концентрат: пульпа може мати 60-65% твердого вмісту;
- хвости: залежно від стадії згущення, вміст твердого може змінюватися від 1-15,5% до 30-40%.
- вугільна пульпа: співвідношення Т:Ж може бути від 1:5 до 1:20, а в процесі збагачення можуть використовуватися водовугільні суспензії з вологістю 30-70%.
- цементна сировина: густі шлами з вологістю 36-42%.
- золошлакові матеріали: концентрація твердого в пульпі може становити 5,5%.

Щільність пульпи та твердих частинок:

- залізорудний концентрат: 4900-5000 кг/м³ (пульпа), 4300 кг/м³ (концентрат);
- хвости/шлами: 1800-2300 кг/м³ (для хвостів флотації вугілля), 1200 кг/м³ (шлами), 2700 кг/м³ (шлами марганцю);
- вугілля: 1400 кг/м³;
- цементна сировина: 1500 кг/м³;
- золошлакові матеріали: середня агрегатна щільність золошлаку 2,5 г/см³; щільність золи коливається в межах 2,0-3,4 г/см³, рідкого шлаку – 2,55-3,45 г/см³, твердого шлаку – 2,13-2,81 г/см³.

Гранулометричний склад (розмір частинок):

- залізорудний концентрат: понад 95% частинок класу -0,044+0 мм;
- мідний концентрат: максимальний розмір частинок 0,23 мм;
- залізорудні частинки розміром 0,071 мм;
- хвости збагачення: середня крупність шламів становить 0,18 мм;
- хвости флотації вугілля: 0-1 мм; середньозважений розмір 0,4 мм;
- сланцеві хвости рудної флотації: крупність <0,074 мм.
- руда: при гідропідйомі руди – до 0-60 мм; дроблена руда – 0-80 мм.
- цементна сировина: вапняк класу 25-0 мм, шлам з до 50% частинок дрібніших за 5 мкм;

- золошлакові матеріали: зола в основному представлена фракціями 0,01-0,1 мм (середня крупність 0,02-0,07 мм); шлак в основному представлений фракціями 0,25-20 мм (максимальний розмір окремих частинок 40-60 мм); середня крупність рідкого шлаку 2,5-9,0 мм; середня крупність твердого шлаку без дробарок – 0,12-10 мм, при наявності дробарок – 0,25-4,0 мм.

Абразивність. Гідроабразивний знос є основною причиною виходу з ладу деталей, що експлуатуються в середовищі абразивної гідросуміші. Абразивність твердих частинок характеризує їхню здатність руйнувати поверхневий шар деталей. Коефіцієнт відносної абразивності для рідкого шлаку кузнечного вугілля може бути в 6,5 рази вищим за еталонний пісок.

Інші властивості: Вода, що використовується в оборотних системах, має контролюватися за показником рН (7,5-8,2), жорсткістю та вмістом завислих речовин. Низький рН посилює корозію та зношування. Також відзначаються неньютонівські властивості деяких суспензій, що впливають на режим руху.

Загалом транспортовані рідини мають такі параметри:

1. Рудна пульпа — двофазна суспензія, що складається з подрібненої руди та води.
 - концентрація твердої фази: 50–75 % за масою (залежно від стадії збагачення);
 - крупність частинок: від 0,074 мм (–74 мкм) до 15 мм;
 - густина пульпи: 1800–2300 кг/м³;
 - в'язкість: 1,5–3,0 мПа·с (залежно від концентрації);
 - абразивність: висока, зумовлена наявністю кварцу (твердість 7 за шкалою Мооса), силікатів та інших твердих мінералів. Пульпа є найбільш небезпечним середовищем з точки зору гідроабразивного зносу, особливо на ділянках після дроблення та мелення.
2. Шламова пульпа (відходи збагачення) — містить дрібнозернисті частинки з високим вмістом кварцу.

- концентрація твердого: 40–60 %;
- середній діаметр частинок: 0,05–0,2 мм;
- незважаючи на меншу крупність, висока швидкість циркуляції та тривалий час контакту призводять до значного зносу, особливо в шламопроводах.

3. Промивна вода та циркуляційні розчини — використовуються для відмивання концентратів, транспортування реагентів.

- може мати слабо кислу або лужну реакцію ($\text{pH} = 5\text{--}9$);
- у разі наявності хлоридів, сульфатів або реагентів (наприклад, ксантогенатів) — проявляється корозійно-абразивний ефект.

1.2.2. Параметри трубопроводів

Розглянемо параметри трубопроводів, що використовуються на ГЗК.

Базовим параметром трьохпроводу є діаметр труб, який має широкий діапазон варіювання від 100 мм до 1400 мм. Причому для транспортування хвостів частіше використовуються труби діаметром 400 мм, 500 мм, 700 мм, 1000 мм, для транспортування залізрудного концентрату: 108 мм, 210 мм, 219 мм, 273 мм, 508 мм, 1010 мм, 1270 мм; для транспортування цементної сировини: 300-400 мм; для золошлакових матеріалів: 0,5 м; для контейнерних систем: 280 мм.

Таким чином, діаметр труб 100–1300 мм (найпоширеніші: 150, 200, 300, 500 мм).

Наступним важливим параметром трубопроводу є товщина стінок труб, яка залежить від діаметра, тиску та умов експлуатації (абразивний знос). Зазвичай для пульпопроводів діаметром 0,5 м може бути 8-10 мм; при транспортуванні залізрудного концентрату товщина стінок може бути 0,7-1,2 мм для діаметра 1270 мм, або 8,7 мм для діаметра 508 мм з розрахунком на 33 роки служби; для транспортування цементної сировини: 13 мм для труб діаметром 400 мм.

Таким чином, товщина стінки труб 6–14 мм (залежно від тиску та діаметра).

Важливим параметром є матеріали труб та їх типи.

Найбільш поширеним матеріалом труб є високоманганцева сталь Ст.20, 09Г2С, 110Г13Л. Причому такі труби можуть бути суцільними (виготовленими з однієї марки сталі), так і біметалевими, тобто мати внутрішній шар із міцної сталі (наприклад, Х18, Х12, що має зносостійкість у 3-6 разів вищу, ніж у звичайних сталей.) та зовнішньою оболонкою з м'якої сталі (Ст. 2, Ст. 3).

Чавунні труби застосовуються при невисокій абразивності пульпи та підвищеній кислотності води/пульпи.

Керамічні труби використовують для безнапірних ліній з агресивними ґрунтовими водами.

Поліетиленові труби легкі, еластичні, мають на 10-15% більшу пропускну здатність через гладкість стінок.

Полібутиленові труби використовують для високоабразивних суспензій гіпсу, легкі, еластичні, стійкі до високих тисків і температур.

Гумові труби армовані сталевим дротом, для подачі пульпи на короткі відстані та маневрування.

Склопластикові труби легкі, стійкі до корозії та абразиву, термін служби у 3 рази довший, ніж у сталевих.

Дерев'яні клепані труби використовуються для хвостів рудної флотації, що містять 45% твердих частинок.

Фанерні труби багат шарові, легкі, для абразивних гідросумішей, особливо в умовах складного рельєфу.

В основному внутрішню поверхню труб футерують тим чи іншим матеріалом

Футеровані каменем (камеліті) це сталеві труби з футеровкою кам'яним литтям збільшують термін служби в 5-10 разів.

Футеровані склом (СИМ) труби типу "Скло і метал" (СИМ) стійкі до хімічних впливів, термін служби в 10-12 разів вищий, ніж у вуглецевої сталі.

Футеровані поліуретаном, який має високий опір абразивному впливу, поглинає ударні коливання, хімічно стійкий. Зносостійкість СКУПФЛ-74 близька

до "Адипрен". Футеровані поліуретаном сталеві труби працюють у 8-20 разів довше, ніж звичайні сталеві.

Футеровані поліетиленом високої щільності, захищають від корозійного зносу.

Емальовані труби для нафтової, газової, хімічної промисловості.

Отже матеріал труб сталь (Ст.20, 09Г2С, 110Г13Л), композит (HDPE, поліетилен високої густини), футеровані поліуретановим або керамічним внутрішнім покриттям та біметалеві труби.

Елементи трубопроводів, такі як коліна, що є місцями підвищеного зносу, для них розробляються спеціальні конструкції. ; запірна арматура, яка повинна бути зносостійкою, з полімерними покриттями або твердосплавними матеріалами.

Загалом реальна траса гідротранспортування має велику кількість вигинів (кут 30° – 90°), трійників, переходів; радіус вигину часто менший за оптимальний ($R < 3D$), що призводить до локалізації зносу, а її протяжність може сягати 0,5–5 км (у деяких випадках — до 7 км).

1.2.3. Параметри руху рідин

Розглянемо швидкість транспортування. Важливим фактором є підтримка швидкості потоку вище критичної швидкості, щоб уникнути утворення нерухомого шару частинок золошлаку на дні труби. Загалом для марганцевих шлаків: 2,2 м/с; для залізорудного концентрату: від 1,5 м/с при 60-65% твердого, до 2,5-3,4 м/с; для цементної сировини: 3,5 м/с; для золошлакової суміші: 1,95 м/с при критичній швидкості 1,7 м/с; для відходів флотації вугілля: 1-1,5 м/с (оптимальна швидкість стаціонарного режиму); для водовмісного шламу швидкість 1,48 м/с.

Можна навести такі загальні рекомендації: для потоків, що містять дрібні та середні частинки, швидкість пульпи зазвичай знаходиться в діапазоні

$$V_{\text{критична}} < V_{\text{середня}} < 2 V_{\text{критична}}$$

Тепер проаналізуємо тиск у мережі. Тиск для низьконапірних систем становить до 1 МПа; для систем середнього напору до 10 МПа; для високонапірних систем 15-20 МПа. Так при транспортуванні залізорудного концентрату тиск може становити 1,7 МПа, 7-14 МПа, до 21 МПа (макс. тиск нагнітання), до 15 МПа (Бразилія); при транспортування хвостів 0,5 МПа, 0,71 МПа; золошлакових матеріалів 0,5 МПа; вугільної пульпи: до 4 МПа (середньонапірні насоси); цементної сировини: до 0,6-1,6 МПа для затворів.

Отже підсумуємо гідродинамічні та експлуатаційні параметри:

- швидкість руху пульпи: 2,0–4,5 м/с; оптимальна — 2,5–3,0 м/с; понад 3,5 м/с — різке зростання зносу;
- робочий тиск: 1,0–2,5 МПа (10–25 атм); залежить від висоти подачі, довжини траси, втрат на тертя;
- температура середовища: 5–40 °С; не є критичним фактором, але впливає на в'язкість та стійкість полімерів;
- рН середовища: 6–9 (нейтральне–слабколужне); при використанні реагентів — може знижуватися до 4–5 (ризик корозії);
- час безперервної роботи; 24/7 (тризмінний режим); висока навантаженість, обмежений час на обслуговування.

1.2.4. Експлуатаційні особливості та заходи:

Розглянемо експлуатаційні особливості систем гідротранспорту збагачувальних фабрик.

Інтенсивний гідроабразивний знос є значною проблемою, що вимагає резервування обладнання (насосів до 200%). Оптимізація режимів транспортування пульпи, вибір зносостійких матеріалів і вдосконалення конструкцій є ключовими заходами.

У деяких випадках, особливо при використанні оборотних вод, виникає корозійний знос. Для запобігання внутрішньої корозії додають інгібітори (наприклад, вапно) для підтримки показника рН.

Зниження швидкості пульпи нижче допустимої або утворення донного шару твердих частинок може призвести до закупорок труб.

У суворих кліматичних умовах і вічній мерзлоті труби прокладаються над землею на опорах. Боротьба з утворенням льоду та відновлення теплоізоляції є критичними. Потрапляння теплої пульпи в переохолоджені труби може призвести до їх розриву.

Для контролю стану трубопроводів застосовуються ультразвукові товщиноміри. Датчики зносу дозволяють фіксувати наскрізне руйнування стінок труб.

Проектуються з урахуванням 100% резерву насосного обладнання, а для високоабразивних пульп – трьома насосами (робочий, ремонтний, резервний). Перекачувальні станції можуть працювати послідовно, переважно за схемою "насос в насос" без розриву потоку. Для подачі висококонцентрованих пульп застосовуються плунжерні насоси.

Додатково слід зазначити наявність гідравлічних ударів. Системи гідротранспорту схильні до гідравлічних ударів, що можуть спричинити значні динамічні зміщення труб (до 5-15 см при $\Delta P=2$ МПа) і руйнування. Для захисту застосовуються повітряні колони.

Усі ці фактори взаємопов'язані та потребують комплексного підходу при проектуванні та експлуатації гідротранспортних систем на рудних ГЗК.

Виокремимо зони підвищеного зносу. Найбільш піддані зносу ділянки трубопроводів:

- Вигини — до 60–70 % всього зносу припадає на колінчасті з'єднання;
- Трійники та переходи — через турбулізацію потоку;
- Зони навколо насосів — пульсація тиску, кавітація;
- Місця зміни діаметра — різка зміна швидкості потоку.

На підприємствах Кривбасу (наприклад, Північний ГЗК) зафіксовано, що термін служби сталевих труб діаметром 300 мм у зоні вигину складає 6–8 місяців, тоді як на прямих ділянках — 14–18 місяців. Це підкреслює важливість не лише матеріалу, а й гідродинамічного режиму та геометрії траси.

Таким чином, умови експлуатації гідротранспортних мереж на рудних ГЗФ характеризуються поєднанням високої абразивності транспортуваних середовищ, значних швидкостей потоку та тисків, що створює сприятливі умови для інтенсивного гідроабразивного, корозійно-абразивного та локального кавітаційного зносу. Ці фактори обумовлюють високу інтенсивність руйнування матеріалу трубопроводів, особливо в конструкційних вузлах зі складною гідродинамікою. Тому для зниження зношення необхідне комплексне урахування як властивостей середовища, так і конструктивних та режимних параметрів системи гідротранспорту.

1.3. Аналіз методів підвищення зносостійності трубопроводів

Інтенсивне гідроабразивне зношення трубопроводів при транспортуванні рудної пульпи є однією з головних причин скорочення терміну їхньої експлуатації та зростання витрат на обслуговування. Для подовження строку служби пульпопроводів на гірничо-збагачувальних фабриках (ГЗФ) застосовуються різні методи підвищення зносостійкості, які можна умовно поділити на матеріалознавчі, конструкційні, технологічні та комбіновані підходи.

Нижче наводиться розділ, присвячений аналізу методів підвищення зносостійкості труб у гідротранспортних системах.

Гідроабразивне зношування пульпопроводів і насосів є значною проблемою в системах гідрозоловидалення теплових електростанцій (ТЕС) та гірничо-збагачувальних підприємств, призводячи до високих витрат на заміну обладнання. У зв'язку з цим розробка та використання методів підвищення зносостійкості труб мають велике народногосподарське значення.

Існуючі методи боротьби з гідроабразивним зносом трубопроводів та насосів можна розділити на такі основні групи:

- технологічні прийоми (зміна режимів транспортування пульпи):
 - вибір оптимальних режимів транспортування, при якому рекомендується вибирати мінімальні допустимі швидкості

- транспортування гранично подрібнених твердих частинок для забезпечення максимальної довговічності пульпопроводів;
- транспортування пульпи високої щільності для збільшення продуктивності гідросистеми доцільно транспортувати пульпу високої щільності при збільшеному діаметрі трубопроводу. При подачі високоцентрованих, дрібнозернистих пульп (неньютонівських рідин) можливе досягнення ламінарного режиму руху зі значно меншими швидкостями, що знижує втрати тиску і, відповідно, знос;
 - глибоке подрібнення та обгортання частинок для рідкого шлаку рекомендується глибоке подрібнення та обгортання його частинок перед подачею в систему. Практичний приклад показав, що попереднє дроблення рідкого шлаку збільшує термін служби трубопроводів у середньому у 2,2 рази порівняно з транспортуванням недробленого шлаку.
 - періодична робота з частковим замуленням в окремих випадках, при можливості регулювання швидкості гідросуміші, допускається періодична робота системи з частково замуленим потоком з наступним розмивом шлакових завалів.
- вибір зносостійких конструкційних матеріалів (покращення властивостей труб), що є одним із найбільш дієвих заходів підвищення довговічності трубопроводів:
- біметалічні труби складаються з внутрішнього крихкого шару з броньових або загартованих сталей (наприклад, X18, X12) та зовнішньої оболонки з м'якої сталі (Ст. 2, Ст. 3). Їх зносостійкість у 3-6 разів вища, ніж у звичайних сталей. Промислові випробування показали, що зносостійкість біметалічних труб може бути у 5-15 разів вище, ніж у звичайних сталевих труб, а для вугільного штибу - у 70 разів вище. Проте їхня вартість була значно вищою (600 руб/т проти 180 руб/т для звичайної сталі 1978 року);

- труби зі зміцненим внутрішнім шаром, для яких було розроблено спосіб отримання зносостійкого шару на внутрішній поверхні труб (до 426 мм) методом високотемпературної газової цементації. Випробування показали, що зносостійкість збільшується в середньому в два рази, що дозволяє економити 13-15 тис. руб. на кожен кілометр пульпопроводу;
- футерування кам'яним литтям (базальтовим) циліндричні вкладиші з кам'яного лиття (наприклад, базальту) довжиною 0,5-1,0 м застосовуються для футерування тонкостінних сталевих труб. Термін служби таких труб збільшується в середньому в 5-10 разів;
- труби з термостійкого скла (типу СІМ) захищені металевою оболонкою, стійкі до хімічних впливів і витримують підвищений тиск. Термін служби труб СІМ у 10-12 разів вище, ніж у труб з вуглецевої сталі при транспортуванні антрацитових шлаків та магнетитових суспензій;
- поліуретанова футерівка, що має високий опір абразивному впливу, поглинає ударні коливання та хімічно стійкий. Біпластмасові труби з внутрішнім поліуретановим шаром товщиною 7 мм мають зносостійкість у 6 разів вище від гідроабразивного зносу та в 10 разів вище від гідроабразивно-корозійного зносу.
- поліетиленові труби (футерування) з поліетилену високої щільності, що захищає сталеву оболонку від зносу, в основному корозійного, і рекомендується для перекачування рідин. Поліетиленові труби (з ПВП) є найбільш зносостійкими і витримують напругу втоми серед поліетиленових і поліпропіленових труб. У певних умовах знос і корозія поліетиленових труб не спостерігаються, а гідравлічні втрати на 40% менше, ніж у сталевих. Їх термін служби складає 3-4 роки без провертання, у той час як сталеві труби в тих же умовах служать один рік із провертанням кожні 3 місяці;

- емальовані труби Використовуються в різних галузях промисловості, включаючи нафтову, газову та хімічну;
- гумові труби Посилені сталевим дротом, застосовуються для подачі пульпи на короткі відстані. Термін їх служби у 5-15 разів більше, ніж у сталевих. Наприклад, гумові труби працювали шість років, транспортуючи пісок та гравій, тоді як сталеві труби витримували 6-8 місяців.
- асбестоцементні труби у 3 рази легше за сталеві. Проте при швидкостях потоку понад 2 м/с вони зношуються за 2-3 місяці;
- склопластикові труби мають високу гладкість, що робить їх придатними для гідротранспортних систем. Прогнозований термін служби склопластикових труб для контейнерних установок в 3 рази більше, ніж сталевих.
- удосконалення конструкції фасонних частин та арматури (конструктивні зміни), спрямоване на ліквідацію місць підвищеного зносу:
 - з'єднання труб. Неприпустима наявність «ступенів» у місцях з'єднань, рекомендується наплавлення внутрішньої поверхні кінців труб порошковими сплавами для забезпечення плавного сполучення. Фланцеві з'єднання можуть призводити до збільшення зносу труб у стиків в середньому на 50% порівняно із загальним зносом. Швидкороз'ємні сполуки знижують гідродинамічний тиск при гідравлічному ударі на 15% порівняно з фланцевими;
 - коліна (повороти трубопроводу). Слід збільшувати радіус вигину колін: для високої швидкості транспортування - (10-15)D, для низької - (5-10)D. Коліна частіше виходять із ладу, ніж прямі ділянки труб. Зменшення кута зіткнення частинок зі стінками до 12° призводить до значного збільшення зносостійкості. Коліна з дифузором показують хорошу роботу під час розвантаження матеріалу в бункер;

- запірно-регулююча арматура. Повинна бути особливого виконання, повністю відкриватися і не мати мертвих кишень. Рекомендуються конічні або кульові клапани та вентиля, які добре зарекомендували себе високою абразивною стійкістю, замість вентилів із звуженими проходами.
- контроль стану трубопроводів та проведення ремонтно-профілактичних робіт (моніторинг та обслуговування):
 - безперервний та оперативний контроль дозволяє попередити раптовий вихід з ладу обладнання та своєчасно проводити профілактичні роботи;
 - датчики зношування труб (ДІТ) рекомендуються для безперервного контролю. Встановлюються в канавках на нижній, бічній та верхній стінках труби та фіксують наскрізне руйнування, дозволяючи визначати параметри нерівномірного зношування;
 - профілактичне повертання труб у системах, де спостерігається заростання верхньої та знос нижньої частини труб, обґрунтована регулярність повертання труб дозволяє продовжити термін їхньої служби більш ніж на 10-12 років. Цей захід може збільшити термін служби експлуатованих пульпопроводів в 1,5-3 рази. Оптимальний кут обертання визначається на основі даних контролю.
 - ультразвукові вимірювачі товщини для оперативного контролю стану труб.

Кожен із перерахованих методів має свою сферу застосування та ефективність, і найчастіше найкращі результати досягаються при їх комбінуванні, що має бути обґрунтовано техніко-економічними розрахунками.

Нижче у табл 1.1, 1.2 наведено аналіз найбільш поширених сучасних методів, їхня ефективність та практична реалізація.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів підвищення зносостійності трубопроводів

Метод	Сутність	Ефективність	Переваг	Недоліки	Застосування
1	2	3	4	5	6
Використання високоміцних і зносостійких сталей	До найпоширеніших матеріалів відносяться: Сталь 110Г13Л (високоманганцева сталь) — володіє високою зносостійкістю завдяки здатності до зміцнення при ударних навантаженнях. Сталі 09Г2С, 16ГС — низьколеговані сталі з підвищеною міцністю.	Термін служби: 12–18 місяців (проти 6–10 місяців у звичайних сталевих трубах). Зниження зносу: на 30–40 % порівняно зі Ст.20.	Висока міцність, доступність, можливість зварювання. Добре зарекомендувала себе на прямих ділянках.	Висока вартість; Не ефективна в зонах вигинів через обмежену пластичність; Піддається корозії в агресивних середовищах.	Північний ГЗК, АрселорМіттал Кривий Ріг — на головних напірних ділянках.
Полімерні покриття та вкладиші	Найпоширеніші матеріали: Поліуретан (PU) — еластичний, високозносостійкий матеріал. HDPE (поліетилен високої густини) — хімічно стійкий, низький коефіцієнт тертя. Епоксидні композити — для внутрішнього покриття.	Термін служби: 3–5 років; Зниження зносу: у 2,5–4 рази порівняно зі сталевими трубами	Низький коефіцієнт тертя, що зменшує гідравлічний опір; Корозійна стійкість; Гнучкість — краще сприймає вібрації.	Обмежена стійкість при температурах > 60 °С; Можливість відшарування при ударних навантаженнях; Складність монтажу та висока початкова вартість.	Використовуються на шламопроводах Південного ГЗК, а також у внутрішніх покриттях насосів.

Продовження табл 1.1

Керамічні вкладиші та покриття	Алюмокераміка (Al_2O_3 , 90–95 %) — наноситься методом випалювання або вставляється у вигляді сегментів. Цирконієва кераміка (ZrO_2) — вища ударна міцність.	Термін служби: 5–7 років; Зниження зносу: у 5–8 разів.	Найвища абразивна стійкість серед усіх матеріалів; Хімічна інертність.	Висока крихкість — ризик руйнування при ударах; Висока вартість; Ускладнений монтаж і ремонт.	У вигинах і трійниках на Кременчуцькому ГЗК, де використовуються сегментовані керамічні вкладиші.
Біметалеві та композитні труби	Сталь + поліуретан — внутрішній полімерний шар на сталевій основі. Сталь + кераміка — комбіновані труби з привареними керамічними пластинами.	Термін служби: 4–6 років; Комбінація міцності сталі та зносостійкості композиту.	Висока довговічність; Можливість використання стандартних методів з'єднання.	Висока вартість; Ризик відшарування шарів при температурних коливаннях	На дослідних ділянках Північного ГЗК та в пілотних проектах ДТЕК
Конструкційні методи зниження зносу	Заміна гострих вигинів на плавні (великий радіус — $R \geq 5D$); Використання "самозахисних" вигинів — з подвійними стінками або знімними вставками; Трійники зі збільшеним радіусом; Регулювання траси для мінімізації турбулентності.	Зниження локального зносу у вигинах на 40–60 %; Подовження терміну служби ділянки на 1,5–2 роки.	Низька вартість впровадження; Не вимагає зміни матеріалу.	Обмежена застосовність у стиснених умовах; Потребує проектування на етапі будівництва або реконструкції	На Північному ГЗК (Кривий Ріг) у 2021–2023 рр. проведено реконструкцію ключових вигинів на головному пульпопроводі шляхом заміни колін з $R = 1,5D$ на плавні з $R = 6D$. Це дозволило збільшити термін служби цих ділянок з 7 до 18 місяців. Аналогічні рішення впроваджено на Кременчуцькому ГЗК при модернізації шламопроводу.

Продовження табл 1.1

Технологічні методи	Оптимізація швидкості потоку (зниження до 2,5–3,0 м/с); Регулювання концентрації твердого (у межах технологічного регламенту); Використання пульсуючих режимів або додавання полімерних модифікаторів для зниження абразивності.	Зниження зносу на 25–35 % при зменшенні швидкості на 20 % (за законом $I \propto v^2$).	Не вимагає капітальних вкладень; Може бути реалізовано шляхом налаштування насосів.	Обмеження продуктивності; Ризик заїлування при занадто низькій швидкості.	На АрселорМіттал Кривий Ріг у 2022 році впроваджено систему частотного регулювання насосів на ділянці подачі пульпи від млина до гідроциклонів. Швидкість потоку було знижено з 3,8 до 2,9 м/с, що призвело до зменшення інтенсивності зносу на 30 % без втрати продуктивності. Подібний підхід успішно тестується на Південному ГЗК для оптимізації роботи шламопроводів.
---------------------	--	--	--	--	--

Таблиця 1.2 - Порівняльна таблиця ефективності методів

Метод захисту	Термін служби	Зниження зносу	Вартість (відносна)	Недоліки
Високоміцні сталі	1–1,5	30–40%	Низька	Обмежена стійкість у вигинах
Поліуретанові вкладиші	3–5	У 2,5–4 рази	Середня	Чутливість до температур
Керамічні вкладиші	5–7	У 5–8 разів	Висока	Крихкість, складність монтажу
Композитні труби	4–6	У 4–6 разів	Висока	Відшарування шарів
Конструкційні зміни	2–3	40–60% (локально)	Дуже низька	Обмежена застосовність
Оптимізація режиму	—	25–35%	Низька	Ризик заїлування

Аналіз показує, що найбільш ефективними з погляду довговічності є керамічні вкладиші та композитні рішення, проте їх висока вартість і складність монтажу обмежують масштабне застосування. Конструкційні та технологічні методи, хоча й менш ефективні окремо, мають високу економічну доцільність і добре поєднуються з матеріалознавчими підходами.

Отже, найперспективнішим шляхом є комбінований підхід, що поєднує:

- використання зносостійких матеріалів у критичних зонах (вигини, трійники);
- оптимізацію гідродинамічних режимів;
- раціональне проектування траси.

Такий підхід дозволяє досягти максимального ефекту при мінімальних експлуатаційних витратах, що є ключовим для підвищення ефективності гідротранспортних систем на рудних ГЗФ.

1.4. Мета, об'єкт, предмет, завдання та методи дослідження

Мета роботи - підвищення ресурсу та економічної ефективності експлуатації трубопроводів систем гідротранспорту абразивних пульп на рудних гірничо-збагачувальних комбінатах за рахунок наукового обґрунтування комплексу методів та заходів щодо зниження інтенсивності їх зношування

Об'єкт дослідження - процес гідротранспортування рудної пульпи та зношування трубопроводів систем гідротранспорту абразивних пульп на рудних гірничо-збагачувальних фабриках.

Предмет дослідження - режимні параметри та характеристики, що визначають інтенсивність і механізм зношування.

Завдання дослідження:

1. Аналіз та обґрунтування критеріїв оцінки ефективності методів захисту пульпопровідної системи ГЗК;
2. Аналіз відомих методів захисту гідротранспортної системи ГЗК;
3. Виокремлення найсучасніших методів захисту та аналіз їх з точки зору розроблених критеріїв;
4. Розробка практичних рекомендацій щодо впровадження комплексу методів зниження зношування трубопроводів на гірничо-збагачувальних підприємствах.

2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ПУЛЬПОПРОВІДІВ ГЗК

2.1. Загальна методика досліджень

Подальші дослідження спрямовані на формування науково обґрунтованих підходів до вибору та впровадження ефективних методів захисту трубопровідних систем гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) від зношування в умовах гідротранспорту пульпи. Для досягнення поставлених цілей передбачається послідовне виконання наступних етапів.

На першому етапі планується провести аналіз та обґрунтування критеріїв оцінки ефективності методів захисту пульпопровідної системи ГЗК. Буде проведено вивчення існуючих підходів до визначення ефективності методів протидії абразивному та корозійному зношуванню. На основі відомих досліджень будуть сформована система критеріїв, що охоплює техніко-економічні, експлуатаційні, екологічні та надійнісні показники. І остаточно будуть використані методи експертного оцінювання та багатокритеріальної оптимізації для узгодження вагових коефіцієнтів критеріїв.

На другому етапі буде проведено аналіз відомих методів захисту гідротранспортної системи ГЗК. Спочатку планується огляд науково-технічної літератури, патентної бази та практичного досвіду підприємств, побудова класифікації методів захисту за принципами дії: конструктивні, технологічні, матеріалознавчі, комбіновані. І, наприкінці, визначення сильних та слабких сторін кожного методу з урахуванням умов експлуатації ГЗК.

На наступному етапі планується виокремлення найсучасніших методів захисту та аналіз їх з точки зору розроблених критеріїв. Буде сформувано перелік методів захисту, що відповідають сучасним вимогам до ефективності та екологічності. Проведено порівняльний аналіз обраних методів на основі розробленої системи критеріїв, та застосовано методи багатокритеріального аналізу для визначення найбільш перспективних рішень.

На останньому етапі планується розробка практичних рекомендацій щодо впровадження комплексу методів зниження зношування трубопроводів на гірничо-збагачувальних підприємствах. Буде проведено узагальнення отриманих результатів у вигляді алгоритму вибору оптимального комплексу заходів залежно від гідротранспортних параметрів. Розроблено типові схеми комбінованого захисту (наприклад, поєднання конструктивного та матеріалознавчого підходів). Та сформувано рекомендації для промислового впровадження з урахуванням техніко-економічних та організаційних аспектів.

Запропонована методика дозволить систематизувати існуючі знання, провести комплексне оцінювання ефективності сучасних методів захисту трубопроводів та розробити практичні рекомендації, орієнтовані на умови експлуатації гірничо-збагачувальних підприємств.

2.2. Формування критеріїв для оцінки методів захисту пульпропровідної системи на ГЗК

На основі аналізу літературних джерел (див Розділ 1), оцінювання ефективності методів захисту трубопроводів для транспортування пульпи є комплексним завданням, яке вимагає врахування як технічних, так і економічних факторів. Остаточне рішення щодо вибору того чи іншого заходу має ґрунтуватися на техніко-економічному зіставленні варіантів.

Критерії оцінювання можна розділити на дві основні групи: технічні та економічні.

1. Технічні критерії - оцінюють, наскільки добре метод виконує свою основну функцію — захист трубопроводу від зносу та забезпечення його надійної роботи.

1.1. Термін служби (довговічність) є ключовим технічним показником ефективності. Оцінюється прогнозоване збільшення терміну служби трубопроводу в результаті застосування захисного заходу.

Кількісна оцінка. Існуючі методики дозволяють розрахувати прогнозований термін служби (в роках) або час роботи до зносу стінки

труби на 1 мм. Ефективність методу може виражатися в кратності збільшення терміну служби (наприклад, профілактичне повертання труб дозволяє збільшити термін служби в 1,5–3 рази) або в додаткових роках експлуатації (наприклад, продовжити термін служби більш ніж на 10–12 років).

Порівняння матеріалів. Для оцінки зносостійких матеріалів використовується коефіцієнт відносної зносостійкості (кВ), який показує, у скільки разів даний матеріал стійкіший до зносу порівняно з еталонним (сталь Ст 3). Чим вищий цей коефіцієнт, тим ефективніший матеріал.

1.2. Надійність та коефіцієнт використання. Ефективний метод захисту повинен забезпечувати не тільки довговічність, але й високу надійність роботи системи, що виражається у відсутності раптових виходів з ладу та мінімізації простоїв. Одним з показників є коефіцієнт використання системи у часі, який для надійних систем може досягати 95%.

1.3. Гідравлічна ефективність. Деякі методи захисту, наприклад футерування кам'яним литтям, можуть збільшувати шорсткість внутрішньої поверхні труб, що призводить до збільшення гідравлічних опорів (в 1,7–2,0 рази) та, як наслідок, до зростання витрат енергії на перекачування пульпи. Ефективний метод не повинен суттєво погіршувати гідравлічні характеристики трубопроводу.

1.4. Технологічність та конструктивна реалізованість. Цей критерій оцінює практичність застосування методу. Враховується складність монтажу, можливість ремонту та сумісність з іншими елементами трубопроводу. Наприклад, метод не повинен створювати уступів у з'єднаннях або вимагати занадто складного обладнання для реалізації.

2. Економічні критерії - дозволяють визначити економічну доцільність застосування того чи іншого методу захисту. Ефективним вважається той варіант, який забезпечує надійне транспортування із найменшими сумарними капітальними та експлуатаційними витратами.

- 2.1. Приведені річні витрати. Це головний інтегральний показник економічної ефективності, що дозволяє порівнювати варіанти з різними капітальними та експлуатаційними витратами. Розраховуються за формулою:

$$З = E + E_n \cdot K \quad (2.1)$$

де $З$ — приведені витрати, E (або C) — собівартість або експлуатаційні витрати, K — капітальні вкладення, E_n — нормативний коефіцієнт ефективності. Найбільш ефективним є варіант з найменшими приведеними витратами.

- 2.2. Річний економічний ефект. Цей показник дозволяє безпосередньо порівняти два варіанти (наприклад, існуючий та новий) і розраховується за формулою:

$$E = [(C_1 - C_2) - E_n \cdot (K_2 - K_1)] \cdot A_2 \quad (2.2),$$

де C_1 і C_2 — собівартість одиниці продукції (роботи) до і після впровадження заходу; K_1 і K_2 — питомі капітальні вкладення до і після заходу; A_2 — річний обсяг продукції. Позитивне значення E вказує на економічну ефективність нового методу.

- 2.3. **Складові витрат** Для проведення розрахунків необхідно оцінити всі складові витрат:

Капітальні витрати (K) - вартість труб, захисних матеріалів (футеровки, покриттів), насосного обладнання, монтажних робіт, будівництва насосних станцій та інших споруд.

Експлуатаційні витрати (E або C) - вартість електроенергії (з урахуванням можливого зростання через підвищення гідравлічного опору), витрати на поточний ремонт та амортизацію, заробітна плата обслуговуючого персоналу, вартість профілактичних робіт (наприклад, повертання труб), вартість інгібіторів корозії.

Таким чином, для всебічної оцінки ефективності методу захисту необхідно провести технічний аналіз, який визначає, наскільки метод подовжує термін служби та забезпечує надійність системи, та економічний розрахунок, який показує його фінансову доцільність у довгостроковій перспективі.

Однак, на сьогоднішній день наведена вище система критеріїв для обґрунтування методів захисту пульпопроводів на гірничозбагачувальних підприємствах є не актуальною через відсутності урахування додаткових важливих параметрів, таких як екологічність та безпека.

Наведені критерії більш формалізовані й дозволяють робити економічні розрахунки (формули приведених витрат, економічний ефект).

Проведемо детальний аналіз наведених вище критеріїв.

1. Довговічність – базовий критерій достатньо деталізований через показник кВ та розрахунок у роках чи мм зносу. Має залишитися в оновленому списку критеріїв.
2. Стійкість до зносу – включено в довговічність через коефіцієнт зносостійкості.
3. Надійність та коефіцієнт використання – в наведених критеріях присутній. Може бути визначений у вигляді “ремонтпридатності”.
4. Гідравлічна ефективність - чітко описана у наведених критеріях (1,7–2 рази підвищення опорів).
5. Ремонтпридатність і технологічність - в наведених критеріях зроблено акцент на сумісність із іншими елементами та конструктивні особливості.
6. Вартість / економіка – подано розгорнуто через приведені витрати та річний економічний ефект. Це суттєво підсилює економічну частину.
7. Екологічність і безпека - у наведеній системі критеріїв не немає. Потрібно додати, як окремий критерій. Це сучасний і актуальний аспект (відповідність нормам, безпека працівників).

На основі проведеного аналізу, розробимо інтегрована система критеріїв вибору методу захисту трубопроводів пульпотransпортних систем

Технічний блок

1. Довговічність і зносостійкість

1.1. Швидкість зносу (інструментальна величина)

Нехай за час Δt товщина стінки труби зменшилася на Δh (мм). Тоді середня швидкість зносу:

$$\omega = \frac{\Delta h}{\Delta t}, \text{ мм/рік або мм/год} \quad (2.3)$$

Якщо вимірюють масу, тоді швидкість масового зносу:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t}, \text{ кг/год чи кг/рік} \quad (2.4)$$

Якщо відомі густина матеріалу ρ_M , то з масового зносу можна перейти в товщинний:

$$\omega = \frac{\dot{m}}{\rho_M \cdot A_{\text{дот}}} \quad (2.5)$$

де $A_{\text{впл}}$ — площа впливу (м^2).

1.2. Прогнозований термін служби (до втрати товщини $\Delta h_{\text{доп}}$)

Якщо допустиме зменшення товщини до заміни — $\Delta h_{\text{доп}}$ (мм), то:

$$T_{\text{service}} = \frac{\Delta h_{\text{доп}}}{\omega}, \text{ роки} \quad (2.6)$$

1.3. Коефіцієнт відносної зносостійкості k_B

Порівняння матеріалу M з еталоном (сталь Ст3). Якщо ω_{ref} — швидкість зносу еталону, а ω_M — швидкість зносу для матеріалу M , то:

$$k_B = \frac{\omega_{\text{ref}}}{\omega_M} \quad (2.7)$$

(величина $k_B > 1$ — означає кращу зносостійкість). Зауваження: тут важливо мати однакові умови випробувань (швидкість, кут удару, концентрація).

2. Надійність і коефіцієнт використання

2.1. Коефіцієнт доступності (Availability) A

Класична формула через середній час безвідмовної роботи ($MTBF$) і середній час відновлення ($MTTR$):

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8)$$

Відсотково: $A \cdot 100\%$. Наприклад, $A = 0,95$ — цільовий коефіцієнт використання 95%.

2.2. Ймовірність безвідмовної роботи за час t (експоненційна модель)

Якщо інтервал між відмовами експоненційно розподілений з інтенсивністю λ , то:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad \text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.9)$$

2.3. Оцінка втрат через простої

Середні щорічні втрати продуктивності через простої:

$$DL = PR \cdot UP \cdot \frac{DH}{yr} \quad (2.10)$$

де $PR = \frac{Q_{pulp} \cdot \gamma_{solid} \cdot C_{solid}}{t}$ - продуктивність системи, як швидкість транспортування пульпи гідросистемою в нормальному робочому режимі. Вимірюється, як правило, у т/год (тонни за годину) або м³/год (кубічні метри пульпи за годину). Фактично, PR показує, скільки корисного продукту (руди у пульпі) система транспортує за одиницю часу. Q_{pulp} - витрата пульпи, м³/год; γ_{solid} - щільність твердих частинок, т/м³; C_{solid} - об'ємна частка твердого у пульпі; $UP = P_{sell} - C_{process}$ - прибуток з одиниці продукції або чистий прибуток від транспортування та переробки одиниці продукту (наприклад, 1 тонни концентрату або руди); P_{sell} - ринкова ціна одиниці продукції (наприклад, \$/т концентрату); $C_{process}$ - витрати на видобуток, транспортування, збагачення та енергію (\$/т); $\frac{DH}{yr} = \frac{(1-A) \cdot 8760}{A}$.

Перепишемо залежність (2.10) у розгорнутому виді:

$$DL = \frac{Q_{pulp} \cdot \gamma_{solid} \cdot C_{solid}}{t} \cdot (P_{sell} - C_{process}) \cdot \frac{(1-A) \cdot 8760}{A} \quad (2.11)$$

3. Гідравлічна ефективність

Важливість урахування цього критерію обумовлена тим, що захисне покриття може змінювати як шорсткість ϵ , так і ефективний діаметр D_e трубопроводу.

3.1. Зв'язок швидкості, витрати та діаметра

Об'ємна витрата Q і середня швидкість v_{cp} :

$$Q = A_c v_{cp} = \frac{\pi D_e^2}{4} v_{cp}. \quad (2.12)$$

Якщо футерування має товщину t з кожного боку, то $D_e = D_{nom} - 2t$

3.2. Різниця втрати напору по Darcy–Weisbach

Головна формула втрати тиску на довжині L :

$$\Delta p = f \frac{L}{D_e} \cdot \frac{\rho \cdot v_{cp}^2}{2}, \quad (2.13)$$

де f — коефіцієнт гідравлічного опору (фактор тертя).

3.3. Вплив шорсткості на f

Коефіцієнт гідравлічного опору f визначається з рівняння Colebrook (для турбулентного) або Blasius (наближено для гладких труб при великих значеннях числа Рейнольдса Re):

- за Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon / D_e}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.14)$$

- за Blasius (при гладких трубах і $4000 < Re < 10^5$):

$$f \approx 0,3164 Re^{-0,25}. \quad (2.15)$$

де $Re = \frac{\rho \cdot v_{cp} \cdot D_e}{\mu}$, ε — абсолютна шорсткість поверхні.

3.4. Зміна напору і енергії

Зміна втрати напору при переході від варіанту 1 до варіанту 2 футерування, Па:

$$\Delta(\Delta p) = \Delta p_2 - \Delta p_1. \quad (2.16)$$

Витрати потужності насоса, Вт

$$P = Q \cdot \Delta p \quad (2.17)$$

Річне додаткове енергоспоживання через підвищення опорів, кВт/год:

$$\Delta E = \frac{Q \cdot \Delta(\Delta p) \cdot T_{op}}{3,6 \times 10^6}. \quad (2.18)$$

де T_{op} — час роботи за рік, с; Q — м³/с

Якщо футерування зменшує ефективний діаметр труби D_e (товщина футерування t значна), середні швидкість потоку v_{cp} зростає при сталому $Q \rightarrow Re$ змінюється $\rightarrow f$ зміниться.

Якщо матеріал має більшу шорсткість ε , то f зросте $\rightarrow$ зросте Δp і енергоспоживання.

4. Технологічність і конструктивна реалізованість (квантифікація)

Цей критерій є більше якісним, але можна ввести кількісні оцінки для порівняння

4.1. Індекс технологічності T_{tech} (0...1)

Критерій дозволяє порівнювати методи за «легкістю впровадження». Можна, наприклад, визначати через нормовану суму трьох показників:

$$T_{tech} = \omega_1 \cdot S_{mont} + \omega_2 \cdot S_{repair} + \omega_3 \cdot S_{compat} \quad (2.19)$$

де $S_{mont}, S_{repair}, S_{compat} \in [0,1]$ — нормовані оцінки (1 — дуже легко; 0 — дуже важко); $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — вага кожної оцінки, визначувана експетами, причому $\sum \omega_i = 1$.

Приклади для визначення нормованих оцінок:

$$S_{mont} = 1 - \frac{T_{mont}}{T_{mont,max}}; \quad (2.20)$$

$$S_{repair} = 1 - \frac{CostRepair}{CostRepair_{max}} \quad (2.21)$$

$$S_{compat} = \text{бінарна/ступенева оцінка (1 — сумісний, 0 — потребує переробок)}. \quad (2.22)$$

де $T_{mont}, CostRepair$ — час монтажу та собівартість пропонованого засобу зниження зношення; $T_{mont,max}, CostRepair_{max}$ — максимально можливі час монтажу та собівартість засобу зниження зношення.

5. Оцінка екології та безпеки (квантифікація)

Для оцінки впливу на екологію та загальну безпеку можна ввести індекс екологічності $E_{env} \in [0,1]$, як нормовану суму важливих субпоказників (токсичність процесу нанесення, утилізація, ризик витоків):

$$E_{env} = \alpha_1 S_{tox} + \alpha_2 S_{waste} + \alpha_3 S_{installation\ safety} \quad (2.23)$$

де $S_{tox}, S_{waste}, S_{installation\ safety}$ - нормовані оцінки відповідно токсичності процесу нанесення, утилізації, ризику витоків; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - вага кожної оцінки, визначувана експетами, причому $\sum \alpha_i = 1$.

Для використання пропонованої системи критеріїв, потрібно розглянути типові параметри пульпопроводів сучасних підприємств.

Об'ємна витрата ($Q, м^3/год$)

Витрата пульпи безпосередньо пов'язана з продуктивністю системи. На сучасних підприємствах вона наступна:

- рудні ГЗК: подача насосів від 311 до 415 м³/год (що еквівалентно приблизно 0,086–0,115 м³/с).
- модернізовані рудні ГЗК: насоси з витратою 1600 м³/год (0,44 м³/с), 4000 м³/год (1,11 м³/с) та сумарна витрата до 10800 м³/год (3,0 м³/с).
- цементні заводи: витрата шламу 900 м³/год (0,25 м³/с).
- вуглепровід: 778 м³/год (0,216 м³/с) влітку та 915 м³/год (0,254 м³/с) взимку.

Ефективний діаметр трубопроводів (D_e , м)

Діаметр трубопроводу є одним з ключових параметрів, який визначається на основі гідравлічного розрахунку та техніко-економічного зіставлення варіантів.

Для систем золошлаковидалення ТЕС: діаметри 0,3 м, 0,35 м, 0,4 м, 0,45 м та 0,5 м.

Для рудних ГЗК: труби діаметром 273 мм (0,273 м) та 329 мм (0,329 м), для транспортування хвостів застосовуються трубопроводи діаметром 400 мм (0,4 м) та 700 мм (0,7 м).

Для гідротранспортування цементної сировини використовуються труби діаметром 400 мм (0,4 м) кожна.

Для вуглепроводів: труби діаметром 426 мм (0,426 м), 450 мм (0,45 м).

Для спеціалізованих та перспективних труб: біметалеві труби діаметром 219, 325 та 400-550 мм, труби, футеровані кам'яним литтям, мають умовний прохід від 150 до 400 мм.

Середня швидкість транспортування пульпи (v_{cp} , м/с)

Швидкість потоку є критичним параметром, що впливає на інтенсивність гідроабразивного зносу. Рекомендується обирати мінімально допустимі швидкості, які трохи перевищують критичну, щоб уникнути утворення донного шару твердих частинок.

Типові швидкості для систем золошлаковидалення:

- для золи: ~1,2 м/с;
- для твердого шлаку: ~1,5-1,6 м/с;

- для рідкого шлаку: $\sim 1,8$ м/с;
- загалом швидкості варіюються від 1,2 м/с до 2,45 м/с.

Приклади швидкостей на ГЗК та вуглепроводах:

- гідротранспорт залізної руди: від 1,35 до 1,74 м/с;
- гідротранспорт мідного концентрату: не більше 1,5 м/с, мінімальна – 1,2
- гідротранспорт вугілля: розрахункова швидкість 1,67 м/с, робочі швидкості 1,57 м/с (влітку) та 1,81 м/с (взимку).

Щільність твердого у пульпі (ρ , кг/м³)

Цей параметр характеризує сам транспортований матеріал і суттєво впливає на розрахунки.

Для золошлакових матеріалів ТЕС:

- Рідкий шлак: 2500–2700 кг/м³ (2,5–2,7 г/см³).
- Твердий шлак: 2200 кг/м³ (2,2 г/см³).
- Зола та золошлакові суміші: 2500–2600 кг/м³ (2,5–2,6 г/см³).

Для матеріалів ГЗК:

- Залізорудний концентрат (Лебединський ГЗК): 4900–5000 кг/м³.
- Хвости збагачення (Абагурська ЗФ): 3000 кг/м³.
- Марганцеві шлами (Чиатурський ГЗК): 2700 кг/м³.
- Цементна сировина (суміш глини та вапняку): 1500 кг/м³.

Концентрація пульпи.

Це відношення маси або об'єму твердого до загальної маси або об'єму пульпи.

Для систем золошлаковидалення вагова концентрація зазвичай становить 5–10%, з перспективою збільшення до 30%. У розрахунках використовуються масові концентрації (кг/кг) від 0,038 до 0,075.

Для ГЗК та вуглепроводів застосовуються значно вищі концентрації:

- вихідна пульпа 40–45% твердого, після згущення для транспортування – до 58–62%.
- Залізна руда 60% твердого.
- Мідний концентрат 65–70% твердого.

Крупність (гранулометричний склад) твердих частинок.

Цей параметр суттєво впливає на знос та критичну швидкість. Для гідротранспорту матеріал зазвичай подрібнюють.

- Зола є тонкодисперсним матеріалом (середня крупність $\sim 0,073$ мм).
- Шлак (середня крупність від 0,5 до 8,2 мм).
- Залізорудний концентрат: понад 95% частинок мають розмір менше 0,044 мм.
- Мідний концентрат має крупність менше 0,3 мм.

Довжина та ухил траси.

Довжина магістральних трубопроводів може сягати десятків і сотень кілометрів: 26,5 км (ЛГЗК), 85,3 км, 473 км (вуглепровід «Блек Меса»).

Ухил траси є важливим фактором, що впливає на знос. Рекомендується уникати ухилів від 20° до 80° .

Пряма швидкість зношення (мм/рік).

Для вуглепроводу, виготовленого зі сталі X52, швидкість зношення становить 0,05 мм/рік

Для проєктного, виготовленого зі сталі 09Г2С, швидкість зношення складає 0,13 мм/рік

Питомий час роботи пульпопроводу до зносу стінки в середньому на 1 мм, що вимірюється в рік/мм, є зворотною величиною до середньорічної швидкості зношення.

Для системи золошлаковидалення з рідким шлаком та золою, що транспортуються по трубі зі сталі 20, розрахункове значення становить 0,47 рік/мм, що відповідає швидкості зносу: $1 / 0,47 \approx 2,13$ мм/рік.

На відміну від трубопроводів, для швидкозношуваних деталей насосів загальний термін служби в годинах до повної заміни, а не швидкість зносу в мм/год.

Для багерних (грунтових) насосів (повна заміна 3000–4000 годин роботи):

- ° Робоче колесо: 360–720 год
- ° Равлик (корпус): 720–1200 год

- ° Броня: 720–1200 год
- ° Патрубки: 720–960 год

Для поршневих та плунжерних насосів високого тиску:

- Плунжери та сальникової набивки становить до 2000 годин
- Сідло клапана: 2000 годин
- Ущільнення клапана: 1000 годин

Ресурс роботи насосів типу У8-6М до капітального ремонту складає 4000 годин, а загальний ресурс — 10 000 годин

2.3. Аналіз методів захисту пульпропровідної системи на ГЗК

Для початку розглянемо найбільш зношувані елементи трубопроводів пульпопроводів

1. Коліна, відводи, трійники. У цих місцях пульпа змінює напрямок → частинки ударяються об стінки, виникає локальна ерозія. Це зони найінтенсивнішого зносу.
2. Місця входу/виходу пульпи (патрубки насосів, засувки, вузли приєднання труб). Виникають турбулентні потоки → підвищений абразивний знос.
3. Прямі ділянки з високою швидкістю потоку. При концентрації твердих частинок > 40% навіть на прямолінійних відрізках з'являється знос. Особливо критично на довгих магістралях.
4. Днища та нижні частини труб (при неповному заповненні пульпою). Частинки осідають і рухаються в нижній частині труби, створюючи нерівномірний знос.

Враховуючи вище сказане, почнемо розгляд відомих методів.

1. Вибір оптимальних режимів транспортування

Вибір раціонального режиму транспортування пульпи дозволяє значно знизити витрати на будівництво та експлуатацію трубопровідних систем. Для досягнення максимальної довговічності обладнання рекомендується:

- Використовувати мінімально допустимі швидкості транспортування, щоб зменшити інтенсивність гідроабразивного зносу. Швидкість потоку повинна бути рівною або трохи перевищувати критичну, щоб уникнути утворення донного шару твердих частинок.
- Транспортувати максимально подрібнені тверді частинки. Для рідкого шлаку особливо рекомендується глибоке подрібнення та окатування частинок перед подачею в систему.
- Перекачувати пульпу високої щільності при збільшеному діаметрі трубопроводу, якщо необхідно збільшити продуктивність гідросистеми. Це дозволяє знизити знос обладнання та трубопроводів.

2. Використання зносостійких матеріалів

Це один з найбільш дієвих заходів для підвищення довговічності трубопроводів. Він включає застосування труб, виготовлених із сучасних високоміцних матеріалів або футерованих (облицьованих) ними.

- Зносостійкі сталі та чавуни: Використання легованих сталей (наприклад, 40X, 3X13) та хромистих або хромомолібденових чавунів може значно підвищити стійкість до зносу.
- Біметалеві труби: Складаються з внутрішньої труби із загартованих сталей та зовнішньої оболонки з м'якої сталі. Їхня зносостійкість у 3–6 разів вища, ніж у звичайних сталевих труб.
- Футерування кам'яним литтям: Облицьовання внутрішньої поверхні сталевих труб вкладишами з базальту або діабазу збільшує термін їхньої служби в 5–10 разів.
- Полімерні покриття: Футерування поліуретаном забезпечує високий опір абразивному впливу. Поліетилен ефективний для захисту від корозійного зносу.
- Інші матеріали: Високу зносостійкість демонструють також кераміка, шлакоситал, технічний фарфор.

- Зміцнення поверхні: Зміцнення внутрішньої поверхні труб методом високотемпературної газової цементації може збільшити їхню зносостійкість вдвічі.

3. Удосконалення конструкції трубопроводів та їх елементів

Метою конструктивних удосконалень є ліквідація місць підвищеного локального зносу.

- З'єднання труб: Не допускається наявність сходинок у з'єднаннях. Рекомендується наплавка внутрішньої поверхні кінців металевих труб порошковими сплавами та зносостійкими електродами.
- Поворотні коліна (відводи): Це елементи, що піддаються найбільш інтенсивному зносу. Для зниження зносу рекомендується збільшувати радіус вигину повороту колін: $(10-15)D$ для високих швидкостей та $(5-10)D$ для низьких (де D – діаметр труби). Оптимізація геометрії колін, наприклад, шляхом створення еліптичного поперечного перерізу, також сприяє зменшенню зносу.
- Похилі ділянки: Слід по можливості уникати експлуатації похилих трубопроводів. Якщо це необхідно, кут нахилу повинен бути або менше 20° , або більше 80° .
- Запірно-регулююча арматура: Слід використовувати конічні або кульові клапани та вентилі, які повністю відкриваються і не мають "мертвих кишень", де може накопичуватися твердий матеріал, створюючи високошвидкісний абразивний потік.

4. Контроль стану та своєчасне обслуговування

Цей метод дозволяє запобігти раптовому виходу трубопроводів з ладу та своєчасно проводити профілактичні роботи.

- Профілактичне повертання труб: Регулярне обертання труб навколо поздовжньої осі забезпечує більш рівномірний знос стінок і дозволяє збільшити термін служби пульпопроводів у 1,5–3 рази. В умовах, коли верхня частина труби заростає, а нижня зношується, обґрунтоване повертання може продовжити термін служби більш ніж на 10–12 років.

- Захист від корозії: Внутрішня корозія попереджається додаванням у пульпу інгібіторів (наприклад, гашеного вапна) для підвищення показника рН до 10–11. Зовнішня поверхня захищається ізоляцією (поліетиленовою або з клейких стрічок) та катодним захистом від блукаючих струмів.
- Очищення від відкладень: Для видалення відкладень твердих частинок із внутрішніх стінок, які збільшують шорсткість та енерговитрати, можуть застосовуватися спеціальні скребки.

Адаптований до сучасних реалій методи щодо зменшення зносу трубопроводів наведено у табл 2.1

Таблиця 2.1 - Аналіз методів захисту труб при транспортуванні пульпи

Метод захисту	Характеристика пульпи (оптимально)	Режим транспортування	Конструктивні параметри	Експлуатаційні вимоги	Економіка	Технологічні можливості	Екологія та безпека
Гумування (натуральна або синтетична гума всередині труб)	Середня абразивність, невеликі й середні фракції, відсутність високої температури	Тиск – середній, швидкість – до 3 м/с	Діаметри від 50 до 800 мм; довжина – будь-яка; складнощі на колінах	Легко замінювані вставки, середній ресурс (2–5 років)	Невисока вартість, доступність	Потрібні цехи гумування, але технологія поширена	Нетоксичні матеріали, безпечний метод
Поліуретанові вкладиші	Висока абразивність, крупні фракції, невелика агресивність середовища	Витримують високий тиск і турбулентний рух	Підходять для довгих ділянок і колін	Ресурс вищий за гуму (3–8 років), легка заміна секцій	Вартість вища за гуму, але нижча за кераміку	Необхідна точна підгонка вкладишів	Екологічно безпечні, зносостійкі
Керамічні вкладиші (плитки, сегменти)	Дуже висока абразивність, тверді та гострі фракції	Турбулентний і високошвидкісний потік, високий тиск	Використовуються на колінах, вузлах найбільшого зносу	Дуже високий ресурс (10–15 років)	Дуже висока початкова вартість	Монтаж складний, потрібне обладнання	Хімічно нейтральні, безпечні
Базальтові/композитні труби	Середня й висока абразивність	Витримують високу швидкість	Використовуються для магістральних	Високий ресурс (8–12 років)	Дорожче за сталь + гуму, але	Потрібне спеціалізоване	Екологічно безпечні

	сть, середні та великі фракції	та тиск	их ділянок	років)	дешевше за кераміку	виробни цтво	
Наплавлення (NiCrBSi, хром, карбіди)	Дуже абразивні пульпи, висока агресивні сть	Високий тиск, турбулентн ий режим, високі температур и	Переважно коліна, стики, зони турбулізації	Ресурс залежить від шару (2–6 років)	Вартість залежить від методу, ремонтпри датність висока	Потрібні установк и наплавле ння	Можливі токсичні аерозолі при наплавле нні, далі — безпечні
Змінні футеровані секції	Для різних абразивн их пульп	Використов уються у вузлах локального зносу	Особливо ефективні на колінах і вузлах	Швидка заміна без демонта жу довгої ділянки	Вартість вища на старті, але економить на простоях	Вимагає спеціаль ної конструк ції трубопр оводу	Безпечні
Поліетиленов і та ПВХ вкладиші	Середня абразивні сть, низька агресивні сть	Середні тиски й швидкості	Використов уються в діаметрах до 500 мм	Невисоки й ресурс (1–3 роки)	Дешеві	Прості в установц і	Екологіч но відносно безпечні, але можливі мікропла стики

2.3.1. Метод гумування

Призначення. Гумування (внутрішнє футерування гумою) застосовується для захисту внутрішньої поверхні трубопроводів, вузлів і арматури від гідроабразивного зносу та корозії — зменшує ерозію від твердої фази пульпи й знижує ударне навантаження на сталь труби.



Рис 2.1 – Гумове покриття кутів

Область застосування. Типові сфери: гірничо-збагачувальні комбінати (транспортування пульпи), промислові шламо- та шламопроводи, сполучні ділянки насосних вузлів, прямі ділянки з помірною/середньою абразивністю. Економічно виправдане для середньоабразивних потоків; у високозношуваних вузлах (коліна) часто комбінується з керамікою або металокерамікою.

Сутність методу. Внутрішня площа труби покривається виготовленим із гумового компаунда шаром (вкладиш, футер, напилений шар або вулканізований на місці рукав). Функція — амортизація сил удару, зниження шорсткості в порівнянні з грубо пошкодженою сталлю, еластична деформація, що зменшує коефіцієнт локального ударного зносу.

Матеріали та їх короткі характеристики. Короткий перелік типових гумових компаундів, що використовують у футеруванні труб, з ключовими характеристиками.

1. Натуральна гума (NR)

Переваги: хороша еластичність, висока стійкість до ударів, хороша абразійна стійкість при м'яких/середніх домішках.

Обмеження: обмежена стійкість до масел/нафтопродуктів і деяких хімікатів; температурний діапазон нижчий від деяких синтетиків.

2. SBR (стирол-бутадієнова гума)

Переваги: гарне співвідношення вартість/зносостійкість; краще ніж NR по погодостійкості; широке застосування.

Обмеження: середня хімістійкість.

3. NBR (нітрильна гума)

Переваги: стійка до олив/нафтопродуктів; застосовується при середньоагресивних середовищах.

Обмеження: нижча морозо- і озоностійкість порівняно з EPDM.

4. EPDM (етилен-пропілен-диєновий полімер)

Переваги: відмінна стійкість до температур, озону, кислот/лужів у певних межах; хороша довговічність.

Застосування: коли потрібна хімічна стійкість і температурна стабільність.

5. Спеціалізовані абразивостійкі компаунди (підвищені наповнювачі, сірка/силіція, каучукові суміші з поліконструкцією)

Переваги: оптимізовані для великої абразивності; використовують у важких умовах.

Основні технічні параметри, які порівнюють при підборі:

- Shore A твердості (типово 60–95 для футеровок).
- Абразивостійкість за DIN/ASTM (абразивні тести).
- Межа міцності на розрив, відносно подовження.
- Температурний інтервал експлуатації (інші гумові типи мають різні межі).
- Хімістійкість (за конкретними реагентами).

Типова товщина футерування: ~6–20 мм для загальних застосувань; в агресивних ділянках 20–40 мм. (діапазон залежить від умов — фракції, швидкості, місця застосування).

Метод монтажу.

- Вставні вкладиші (segmental liners): заводські гумові сегменти, закріплені механічно або клеєні; легко замінюються.

- Вулканізація in-situ (гаряча/холодна): гумовий шар приклеюється і вулканізується безпосередньо на трубі; забезпечує щільне прилягання.
- Клеєні (bonded) футеровки: гумовий лист приклеюють до внутрішньої поверхні; простіша технологія для менших діаметрів.
- Механічно закріплені рукави / рукави-вставки: для швидкої заміни, застосовуються у важкодоступних місцях.

Перевага гумових вставок — відносна простота монтажу, ремонтпридатність і можливість швидкої заміни у полі.

Переваги

- Висока ремонтпридатність і швидка заміна модулів → невеликі MTTR.
- Покращена стійкість до ударних навантажень; еластична поведінка — знижує локальний контактний тиск.
- Відносно низькі CAPEX у порівнянні з керамікою чи композитами; швидка інтеграція в існуючі магістралі.
- Добре підходить для прямих ділянок і середніх фракцій.

Недоліки

- Менша стійкість у випадках дуже гострих, грубих і важких абразивів (велика частка крупної фракції).
- Може зменшувати внутрішній діаметр → підвищення швидкості та можливе збільшення енергоспоживання (при значній товщині).
- Термічні та хімічні обмеження — необхідно правильно підбирати компаунд.
- Утилізація відпрацьованого гумового матеріалу потребує уваги.

Типові параметри (орієнтировочні)

- Товщина футеровки: 6–20 мм (звичайно); 20–40 мм — для вузлів/колін у середньоабразивних умовах.
- Орієнтована довговічність: 2–5 років (залежить від режиму).
- Типова вартість (орієнтир): ~1 500–3 000 UAH/м (з огляду на раніше наведені числа; конкретні ціни залежить від діаметра, складання й країни/постачальника).

- Ремонт/заміну: можлива без демонтажу довгих ділянок (модульні вставки) або зі спеціальною вулканізацією.

Коли обирати гумування

- Обирати коли: середня або помірно висока абразивність, є вимога до швидкої заміни і низьких MTTR, відносно нижчий CAPEX бажаний, температура і хімія сумісні з гумою.
- Не обирати коли: дуже великі гострі частинки, висока температура або агресивна хімія, або коли пріоритет — максимальна довговічність у вузлах (тут кераміка / наплавлення кращі).

2.3.2. Метод поліуретанових вкладишів для захисту труб при транспортуванні пульпи

Призначення. Поліуретанові вкладиші використовуються для підвищення довговічності трубопроводів, що транспортують абразивні пульпи (рудні концентрати, шлам, золовидалення, піщано-гравійні суміші). Їх основна функція – зниження інтенсивності зносу внутрішньої поверхні труб і збереження гідравлічних характеристик протягом експлуатаційного періоду.



Рис 2.2. – Поліуретанові вкладиші

Область використання:

- гірничо-збагачувальні комбінати;
- металургійні підприємства (шламопроводи, шлакові пульпи);
- енергетика (золотидалення з ТЕС);
- хімічна промисловість (суспензії з високим вмістом абразиву);
- будівництво (транспортування бетонних і піщано-цементних сумішей).

Сутність методу. Метод полягає у встановленні всередині сталевих труб поліуретанових вкладишів (рукавів, сегментів або напилюваного покриття). Поліуретан виконує роль амортизуючого шару, який приймає на себе удари та тертя частинок, запобігаючи їхньому прямому контакту зі сталлю. Це значно знижує швидкість абразивного зносу.

Матеріали

Поліуретан (кастінговий, термореактивний або термопластичний).

- Твердість: 65–95 Shore A.
- Переваги: висока еластичність, стійкість до гідроабразивного зносу, низький коефіцієнт тертя, добрі демпфуючі властивості.
- Механічні характеристики: міцність на розрив до 40 МПа, відносне подовження при розриві 300–600%, опір роздиранню до 100 Н/мм.
- Адгезивні композиції для фіксації поліуретану всередині сталеві труби.

Поліуретанові вкладиші – один із найбільш ефективних методів захисту труб від гідроабразивного зносу. Вони забезпечують у 5–12 разів більший термін служби порівняно зі сталевими трубами, знижують гідравлічні втрати та мають високий коефіцієнт доступності. Недолік – вища вартість порівняно з гумуванням, однак витрати компенсуються зменшенням простоїв і ремонтів.

2.3.3. Метод керамічних вкладишів для захисту труб при транспортуванні пульпи

Призначення. Керамічні вкладиші використовуються для максимального збільшення ресурсу трубопроводів, що працюють у надзвичайно агресивних умовах гідроабразивного зносу. Вони застосовуються там, де гумування та поліуретанові вкладиші не забезпечують достатньої довговічності.

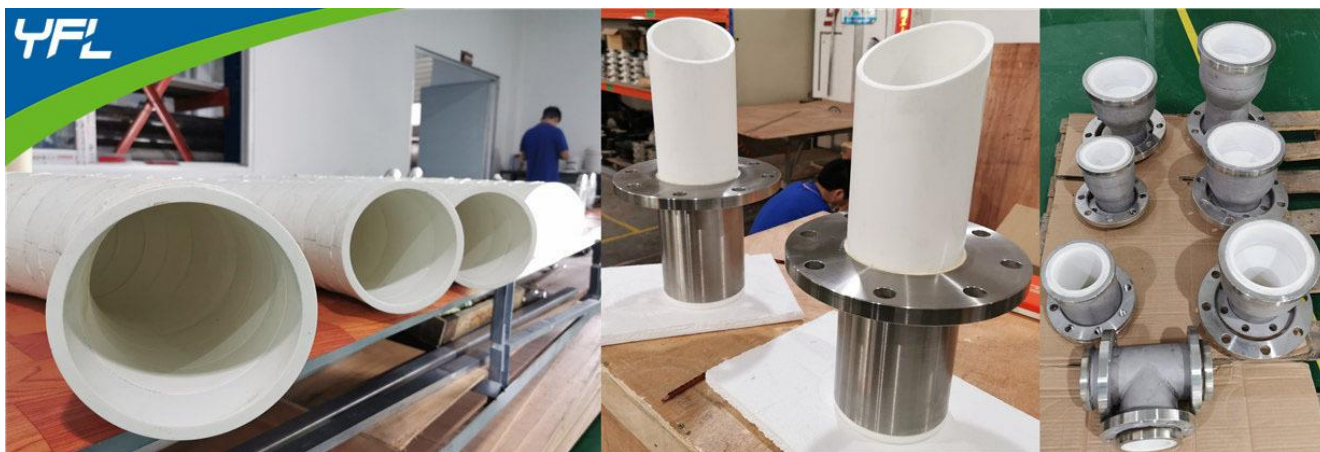


Рис 2.3 – Керамічні вкладиші

Область використання:

- транспортування руди та концентратів у гірничо-збагачувальних комбінатах;
- золовидалення на ТЕС;
- подача пульп у флотаційні відділення;
- видобуток піску та гравію;
- гідротранспорт у металургії (шлакові пульпи, окатиші).

Сутність методу. У сталеві труби монтуються керамічні вкладиші у вигляді циліндричних сегментів, плиток або вставок (Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 тощо). Кераміка має високу твердість (вище сталі в 5–8 разів), низький коефіцієнт тертя та чудову стійкість до абразивного зносу. Сегменти фіксуються всередині труби за допомогою адгезивів або цементуючих сумішей.

Матеріали

- Оксидна кераміка (Al_2O_3):
 - Твердість: 8–9 за Моосом.

- Міцність на стиск: до 3000 МПа.
- Робоча температура: до 1000 °С.
- Карбід кремнію (SiC):
 - Твердість: 9,5 Моос.
 - Висока термостійкість.
 - Застосування у надтвердих умовах.
- Оксид цирконію (ZrO₂):
 - Висока тріщиностійкість.
 - Дорожчий матеріал, використовується у вузлах з екстремальним навантаженням.

Керамічні вкладиші – найдовговічніший спосіб захисту труб від зносу, у 20–50 разів ефективніший за сталь. Вони значно знижують гідравлічні втрати, забезпечують високу надійність і мінімізацію простоїв. Недоліки – висока вартість, складність монтажу та можливість крихкого руйнування.

2.3.4. Метод наплавлення (NiCrBSi, карбіди) для захисту труб при транспортуванні пульпи

Призначення. Наплавлення використовується для підвищення зносостійкості внутрішньої поверхні сталевих труб за рахунок нанесення шару спеціальних сплавів і композицій (на основі NiCrBSi, карбідів WC, Cr₃C₂ тощо). Метод дозволяє створювати міцне металокерамічне покриття, яке поєднує високу твердість та корозійну стійкість з адгезією до сталі.

Область використання:

- транспорт абразивних пульп (залізна руда, кварц, піски, шлаки);
- ділянки трубопроводів з підвищеним зносом (коліна, переходи, вузли гальмування потоку);
- відновлення зношених труб та гідроциліндрів;
- металургійна та гірничодобувна промисловість.



Рис 2.4 – Твердосплавне наплавлення

Сутність методу. Внутрішня поверхня труби наплавляється порошковими або дрітряними матеріалами за допомогою газополуменової, плазмової або лазерної технології. Товщина шару: 1–6 мм.

Матеріали

- NiCrBSi: самофлюсуючийся сплав із високою стійкістю до корозії та помірною твердістю твердість 35–50 HRC, хороша в'язкість, корозійна стійкість.
- NiCrBSi + WC (композити): твердість 55–70 HRC, висока стійкість проти гідроабразивного зносу.
- Cr₃C₂-NiCr: карбідні зміцнювачі, що підвищують твердість шару до 60–70 HRC і забезпечують надзвичайну зносостійкість застосовується для умов високих температур і корозійних середовищ.

Наплавлення є компромісним методом між гумуванням/поліуретаном і керамікою. Воно забезпечує високу зносостійкість (у 10–100 разів більше за сталь), дозволяє ремонтувати труби без їх заміни та має прийнятну вартість. Основні мінуси – технологічна складність, необхідність обладнання і можливі дефекти шару при неправильному нанесенні.

2.3.5. Метод базальтових та композитних труб для транспортування пульпи на ГЗК

Призначення. Використовуються як альтернатива сталевим трубам із внутрішнім захистом. Завдяки унікальним властивостям базальту та полімерних композитів забезпечують надвисоку зносостійкість, хімічну стійкість і довгий термін служби навіть у жорстких умовах транспортування абразивних та корозійно-активних пульп.

Область використання:

- Гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК);
- Транспортування кварцових, залізородних, фосфатних пульп;
- Хімічна та енергетична промисловість;
- Ділянки трубопроводів зі складними умовами (довгі траси, висока швидкість абразиву).



Рис 2.5 – Кам'яне литво та базальтові плити

Сутність методу. Труби виготовляються з литого базальту (отриманого шляхом плавлення вулканічної породи з подальшим литтям у форми);

базальтопластикових композитів (волокна з базальту + полімерна матриця); склопластиків з наповнювачами. Внутрішня поверхня має твердість 7–8 за Моосом, що забезпечує надзвичайну зносостійкість. При цьому труби мають невелику вагу (композити) та високу стійкість до корозії.

Матеріали.

– Литий базальт:

- Твердість: 7–8 Моос (~600–800 HV),
- Щільність: ~2,9 т/м³,
- Термін служби: 15–25 років,
- Висока крихкість (потрібна захисна обойма).

– Базальтопластик (BFRP):

- Міцність на розрив: 1000–1500 МПа,
- Щільність: 1,9–2,1 т/м³,
- Термін служби: 25–30 років,
- Низька теплопровідність, стійкість до агресивних середовищ.

Базальтові та композитні труби – найбільш довговічне рішення (20–30 років), з високою гідравлічною ефективністю та мінімальними експлуатаційними втратами. Основний недолік – висока капітальна вартість і проблеми з ремонтом. Оптимально застосовуються на довгих ділянках магістральних трубопроводів, де заміна труб пов’язана з великими простоями.

2.3.6. Метод поліетиленових (PE) / ПВХ (PVC) вкладишів

Призначення. Захист внутрішньої поверхні сталевих трубопроводів від абразивного та корозійного зносу при транспортуванні пульпи, агресивних рідин або корозійно-активних середовищ.

Область використання.

- Гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК).
- Хімічна та нафтогазова промисловість.
- Водопостачання та каналізаційні системи (антикорозійний захист).

– Системи гідротранспорту з помірним тиском і абразивністю.



Рис 2.6 – Поліетиленові вкладиші

Сутність методу. Внутрішня поверхня сталеві труби покривається вставним поліетиленовим або полівінілхлоридним вкладишем. Він формує суцільний захисний шар товщиною 2–20 мм, який приймає на себе абразивне навантаження та корозійний вплив, при цьому знижуючи контакт пульпи з металом.

Матеріали і характеристики

- Поліетилен високої щільності (HDPE): висока ударна міцність, низький коефіцієнт тертя, робоча температура $-40...+60$ °С, стійкість до більшості хімікатів.
- ПВХ (жорсткий): добра хімічна стійкість, робоча температура до $+60$ °С, твердість вища за поліетилен, але більш крихкий.
- Модифіковані полімери (PE-100, зшитий PE-X): підвищена зносостійкість, ресурс до 30 років у водних середовищах.

Поліетиленові та ПВХ-вкладиші є оптимальним рішенням для трубопроводів пульпи середньої абразивності, де ключовим фактором є низькі втрати напору, корозійна стійкість і простота монтажу. Водночас вони поступаються за зносостійкістю кераміці, наплавленим покриттям та базальтовим трубам у важких умовах.

2.3.7. Метод змінних футерованих секцій

Призначення. Забезпечення захисту трубопроводів гідротранспорту пульпи від абразивного зносу за рахунок застосування секцій труб з внутрішнім змінним футеруванням. Основна ідея — зробити зношувану частину труби змінною (своєрідний картридж), щоб уникати демонтажу всієї магістралі при досягненні граничного зносу.

Область використання:

- Гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК).
- Системи транспортування абразивних пульп (залізорудні, вугільні, золотоносні).

- Пневмотранспорт сипучих матеріалів.
- Області з особливо високим зносом (коліна труб, розгалуження, ділянки після насосів).



Рис 2.7. – Змінні секції трубопроводів

Сутність методу. Футеровані секції — це збірні елементи трубопроводу, що складаються з металевої оболонки (корпусу) та внутрішнього футерувального шару (гумового, поліуретанового, керамічного або комбінованого). При зносі внутрішній шар замінюється без заміни зовнішньої металевої оболонки.

Матеріали

- Гума (натуральна, синтетична): хороша еластичність, стійкість до ударного навантаження.
- Поліуретан: висока абразивна стійкість, жорсткість, робочий діапазон температур $-40...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Кераміка (Al_2O_3 , SiC): максимальна твердість, термін служби в 5–10 разів вищий за сталь.
- Комбіновані футерування: кераміка + гума або поліуретан для компенсації крихкості.

Змінні футеровані секції — універсальне рішення для захисту ділянок трубопроводу з найвищим рівнем зносу (коліна, вузли після насосів). Метод забезпечує високу довговічність (особливо з керамічним футеруванням), але має середній рівень технологічності й потребує регулярних замін. Найбільш ефективний у комбінації з іншими методами (наприклад, поліетиленові вкладиші для прямих ділянок + футеровані секції на колінах).

Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що традиційна система критеріїв (довговічність, надійність, гідравлічна ефективність, технологічність, економічність) є базовою, але недостатньо відображає сучасні вимоги, оскільки не враховує екологічність і безпеку.
2. Запропоновано для оцінювання ефективності методів захисту трубопроводів для транспортування пульпи, як комплексного завдання, врахувати технічні, економічні, а також екологічні і безпекові чинники.
3. Встановлено, що довговічність трубопроводів та стійкість до зношування залишаються ключовими технічними критеріями, які можуть бути кількісно оцінені через показники швидкості зносу, прогнозованого терміну служби та коефіцієнта зносостійкості.
4. Надійність системи та коефіцієнт її використання тісно пов'язані з ремонтпридатністю, тобто можливістю швидкого відновлення працездатності трубопроводу з мінімальними простоями.
5. Гідравлічна ефективність є критичним критерієм, оскільки захисні покриття можуть змінювати шорсткість і діаметр труб, що безпосередньо впливає на енергоспоживання системи.
6. Технологічність і конструктивна реалізованість методів визначаються складністю монтажу, вартістю ремонту, сумісністю з існуючими елементами системи та можуть бути формалізовані через індекс технологічності.

7. Економічна доцільність методів оцінюється за інтегральними показниками — приведеними витратами та річним економічним ефектом, які дозволяють порівнювати альтернативні рішення.
8. Додатковим сучасним блоком оцінки мають стати критерії екологічності та безпеки, що відображають токсичність матеріалів і процесів, можливості утилізації та ризики для персоналу.
9. Використання інтегрованої багатофакторної системи критеріїв дозволить обґрунтувати вибір найбільш ефективних методів захисту трубопроводів у гірничо-збагачувальних підприємствах, поєднуючи технічну ефективність, економічну вигідність, екологічність та безпеку.
10. Встановлено найбільш зношувані елементи трубопроводів, це коліна, відводи, трійники, місця входу/виходу пульпи (патрубки насосів, засувки, вузли приєднання труб), прямі ділянки з високою швидкістю потоку, днища та нижні частини труб.
11. Проведено критичний аналіз сучасних методів захисту від зношування, а саме гумування, поліуретанові вкладиші, керамічні вкладиші, базальтові труби, наплавлення, змінні футеровані секції, поліетиленові та ПВХ вкладиші. Для кожного методу визначено область застосування.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ПУЛЬПРОПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ГЗК

3.1. Дослідження методів захисту пульпропровідної системи на основі критеріїв для оцінки

3.1.1. Метод гумування

Довговічність і зносостійкість. Прогнозований термін служби: типово 2–5 років для середньоабразивних умов; для агресивніших режимів — 1–3 роки; для помірних умов з хорошим матеріалом — до 6 років.

Коефіцієнт відносної зносостійкості $k_B \approx 5\text{--}10$.

Надійність і коефіцієнт використання.

MTBF (середній час напрацювання до відмови) для систем з гумовими вставками: залежить від умов; у середньому при помірній абразивності MTBF вимірюється роками.

MTTR (середній час відновлення) для заміни гумової вставки — від кількох годин (для модульних вставок на прямолінійних ділянках) до 1–3 діб (для великих секцій та вулканізованих рішень).

Коефіцієнт доступності $A \approx 0.9\text{--}0.95$ для надійних систем; гумові вставки дають гарний показник доступності завдяки простоті заміни. Можливі відшарування гуми; простої середні.

Інтенсивність відмов $\lambda \approx 0.02\text{--}0.03$.

Гідравлічна ефективність

Втрати напору середні; зменшення діаметра $\approx 5\text{--}10\%$.

Вплив гумової футеровки: гумова поверхня зазвичай гладка, іноді має меншу шорсткість ніж корозійно пошкоджений метал, але товщина футеровки зменшує ефективний діаметр, тому ефект сумарний і залежить від співвідношення товщини і початкового діаметра.

Технологічність і конструктивна реалізованість (квантифікація)

Орієнтовані значення для гумування:

S_{mont} : висока оцінка (0.7–1.0) — монтаж часто простий (особливо для модульних вкладишів).

S_{repair} : висока (0.7–1.0) — легка заміна.

S_{compat} : висока (0.8–1.0) — зазвичай сумісне з типовою трубною конструкцією.

Отже, $T_{\text{tech}} = (2,2-3)$ для гумування — високий, що робить метод привабливим із точки зору впровадження.

Оцінка екології та безпеки (квантифікація)

Оцінка для гумування:

S_{tox} — зазвичай висока (0.8–1.0), бо більшість гуми нетоксична в робочому стані; але процес вулканізації/клеєння може виділяти леткі органічні сполуки → потрібно додатково контролювати.

S_{waste} — помірна (0.5–0.8) — відхідні гумові фрагменти складно переробляти, утилізація потребує уваги.

$S_{\text{install_safety}}$ — висока (0.8–1.0) — відносно безпечні операції в полі, при дотриманні норм.

Отже $E_{\text{env}} = (2,1-2,8)$ — гума безпечна, екологічна, але відходи гуми важко утилізувати.

3.1.2. Метод поліуретанових вкладишів для захисту труб при транспортуванні пульпи

Довговічність і зносостійкість

Швидкість зносу 0,05–0,2 мм/1000 год при пульпах середньої абразивності.

Прогнозований термін служби 2–6 років залежно від умов.

Зносостійкість поліуретану у 5–12 разів вища, ніж сталі.

Надійність і коефіцієнт використання

MTBF (середній час безвідмовної роботи): 4000–7000 год,

MTTR (ремонт): 8–12 год.

Коефіцієнт доступності $A \approx 0,97-0,99$.

Для 1 року ($t=8760$ год) при $MTBF = 5000$ год ймовірність безвідмовної роботи $R \approx 0,18$.

Гідравлічна ефективність.

Поліуретан зменшує діаметр на 10–20 мм, але знижує шорсткість, отже гідравлічна ефективність зберігається.

Для поліуретану коефіцієнт тертя λ на 10–15% нижче, ніж для сталі.

Зменшення втрат енергії на 5–10%.

Технологічність і конструктивна реалізованість

Монтаж займає 2–4 год на 1 трубу, термін служби 2–6 років, тому індекс технологічності $TI \approx 0,02–0,05$ (дуже високий рівень технологічності).

Екологія та безпека

Поліуретан інертний, не виділяє токсичних речовин у нормальних умовах. Зменшує ризик аварійних розривів труб. Утилізація потребує спеціальної переробки, але можливе вторинне використання у вигляді грануляту.

Отже $E_{env} = (2,5–2,9)$.

3.1.3. Метод керамічних вкладишів для захисту труб при транспортуванні пульпи

Довговічність і зносостійкість

Швидкість зносу практично: $< 0,01$ мм/1000 год (у 10–50 разів менше, ніж у сталі).

Прогнозований термін служби при товщині 10–20 мм кераміка може служити 8–15 років.

Коефіцієнт відносної зносостійкості для Al_2O_3 : $K_{rel} \approx 20–50$.

Надійність і коефіцієнт використання

$MTBF = 20\,000–40\,000$ год,

$MTTR = 12–24$ год.

Коефіцієнт доступності $A \approx 0,995$.

При $MTBF = 30\ 000$ год, для року роботи (8760 год) ймовірність безвідмовної роботи $R(e) \approx 0,75$

Втрати через простої мінімальні завдяки великому ресурсу, але ремонт складний і дорогий.

Гідравлічна ефективність

Керамічний шар зменшує діаметр на 15–25 мм → зменшення пропускної здатності. Шорсткість кераміки дуже низька, коефіцієнт тертя зменшується на 20–30% порівняно зі сталлю).

Втрати енергії менші на 10–20%, що компенсує зменшений діаметр.

Технологічність і конструктивна реалізованість

Монтаж складний: 6–10 год на 1 трубу, але термін служби 8–15 років, тому індекс технологічності $TI < 0,01$ (висока технологічність).

Екологія та безпека

Кераміка інертна, хімічно стійка, не виділяє токсинів. Висока міцність знижує ризик аварій.

Недолік: у разі руйнування кераміки утворюються гострі уламки, які небезпека при ремонті.

Отже $E_{env} = (2,5–2,9)$.

3.1.4. Метод наплавлення (NiCrBSi, карбіди) для захисту труб при транспортуванні пульпи

Довговічність і зносостійкість

Для NiCrBSi: швидкість зношення 0,05–0,1 мм/1000 год, а для NiCrBSi+WC: 0,01–0,03 мм/1000 год.

При $h_0 = 3$ мм: NiCrBSi – 3–5 років, NiCrBSi+WC – 8–12 років.

Для NiCrBSi коефіцієнт відносної зносостійкості 10–20, для NiCrBSi+WC – 30–100.

Надійність і коефіцієнт використання

$MTBF = 15\ 000–30\ 000$ год; $MTTR = 12–48$ год.

Коефіцієнт доступності $A \approx 0,98-0,99$.

Для $MTBF = 20\,000$ год, ймовірність безвідмовної роботи $R(8760) \approx 0,65$.

Втрати через простої менші, ніж у гумування, але більші, ніж у кераміки (через необхідність ремонту наплавленого шару).

Гідравлічна ефективність

Наплавлений шар зменшує діаметр на 4–10 мм, що є незначним зниженням пропускної здатності.

Поверхня відносно гладка, але після зносу шорсткість зростає.

Початкові втрати напору і енергії мінімальні, але в процесі експлуатації ростуть через мікротріщини і нерівності шару.

Технологічність і конструктивна реалізованість

Наплавлення займає 6–24 год на трубу (залежно від довжини), але ресурс 3–12 років, тому індекс технологічності $TI \approx 0,01-0,02$.

Екологія та безпека

Екологічність: покриття інертне, не забруднює пульпу.

Безпека: під час наплавлення утворюються шкідливі гази та пил → потрібні витяжки й захист персоналу.

Ремонтопридатність: труби з наплавленим шаром можна регенерувати без повної заміни.

Отже, $E_{env} = (2,5-2,8)$.

3.1.5. Метод базальтових та композитних труб для транспортування пульпи на ГЗК

Довговічність і зносостійкість

Для базальту: 0,002–0,005 мм/1000 год; для композитів: практично нульовий абразивний знос, деградація пов'язана з матрицею.

Для $h_0 = 20$ мм: базальт – 20–25 років; композити – до 30 років.

Коефіцієнт відносної зносостійкості $K_{rel} = 200-500$.

Надійність і коефіцієнт використання

MTBF = 100 000–150 000 год; MTTR = 48–72 год.

Коефіцієнт доступності $A \approx 0,995$.

Для MTBF = 120 000 год, ймовірність безвідмовної роботи $R(8760) \approx 0,93$.

Втрати через простої мінімальні, завдяки довгому терміну служби і рідким зупинкам.

Гідравлічна ефективність

Діаметр зберігається (шар футерування відсутній → весь прохідний переріз доступний).

Базальт і композити мають гладку поверхню (λ на 20–30% менше, ніж у сталі).

Втрати енергії нижчі, ніж у сталевих і футерованих труб (економія 10–15%).

Технологічність і конструктивна реалізованість

Монтаж займає 4–12 год на трубу; термін служби – 20+ років, тму індекс технологічності $TI \approx 0,002$.

Екологія та безпека

Екологічність: матеріали інертні, не виділяють шкідливих речовин у пульпу.

Безпека: монтаж потребує обережності (крихкі елементи можуть тріснути).

Ремонт: композити ремонтуються складно, базальтові труби – практично не підлягають відновленню.

Отже, $E_{env} = (2,2–2,5)$.

3.1.6. Метод поліетиленових (PE) / ПВХ (PVC) вкладишів

Довговічність і зносостійкість

Швидкість зносу 0.05–0.2 мм/рік при пульпі середньої абразивності.

Прогнозований термін служби 10–20 років залежно від товщини вкладиша й умов роботи.

Коефіцієнт відносної зносостійкості $k_B \approx 5–10$

Масове/об'ємне зношення у 3–5 разів нижче за гумові вкладиші, але вищий, ніж у керамічних і базальтових труб.

Надійність і коефіцієнт використання

Коефіцієнт доступності $A \approx 0.95–0.97A$

При $t = 5$ років, ймовірність безвідмовної роботи $P(t) \approx 0.9$.

Втрати через простої невеликі, оскільки монтаж вкладишів досить простий, час ремонту — мінімальний.

Гідравлічна ефективність

Наявність гладкого полімерного шару зменшує коефіцієнт тертя.

Втрати напору (Darcy–Weisbach) $\lambda_{PE/PVC} \approx 0.01–0.015$, що на 20–30% менше, ніж у сталевих труб.

Зниження втрат енергії на перекачування до 10–15% у порівнянні зі сталевими трубами.

Технологічність і конструктивна реалізованість

Індекс технологічності $TI \approx 0,001$ високий — простий монтаж, можливість вставки в існуючі труби. Є обмеження по температурі та тиску (до 2.5–4 МПа).

Екологія та безпека

Поліетилен і ПВХ інертні, нетоксичні у нормальних умовах.

Відсутність корозії = відсутність продуктів корозії у середовищі.

Перероблюваність (РЕ повністю переробляється, ПВХ — частково).

Обмеження: при нагріванні понад 80 °С можливе виділення продуктів деградації ПВХ.

Отже, $E_{env} = (2,7–2,9)$.

3.1.6. Метод змінних футерованих секцій

Довговічність і зносостійкість

Швидкість зносу $w \approx 0.01–0.1$ мм/рік (залежно від матеріалу футерування)

Прогнозований термін служби:

– Гума: 3–5 років.

– Поліуретан: 5–8 років.

– Кераміка: 10–20 років.

Коефіцієнт відносної зносостійкості $k_B \approx 5-30$

Масове/об'ємне зношення мінімальне для кераміки, середнє для поліуретану, вище для гуми.

Надійність і коефіцієнт використання

Коефіцієнт доступності $A \approx 0.92-0.96$ (падіння через потребу періодичних замін).

Ймовірність безвідмовної роботи висока, але залежить від вибору футерування.

Втрати через простої середні, бо заміна футерування потребує демонтажу секцій, але не всього трубопроводу.

Гідравлічна ефективність

Футерування зменшує внутрішній діаметр на 5–15%.

Втрати напору (Darcy–Weisbach) $\lambda \approx 0.015-0.02$.

Втрати трохи більші через зменшений діаметр, але компенсуються гладкістю поверхні (особливо при поліуретані).

Додаткові витрати енергії 5–10% порівняно з гладкими РЕ-вкладишами.

Технологічність і конструктивна реалізованість

Індекс технологічності $TI \approx 0,01-0,02$ середній: монтаж складніший, ніж у поліетиленових вкладишів, але простіший, ніж у базальтових або наплавлених труб. Гнучкість у виборі матеріалів футерування робить метод універсальним.

Екологія та безпека

Футерування нетоксичне (гума, поліуретан, кераміка).

Можливість утилізації окремих частин.

Низький рівень утворення відходів, оскільки замінюється лише футерування, а не вся труба.

Відсутність продуктів корозії у пульпі.

Отже, $E_{env} = (2,6-2,9)$.

3.1.7. Підсумковий порівняльний аналіз методів захисту труб

Усі визначені параметри внесемо в узагальнену порівняльну таблицю (табл 3.1) методів захисту труб при транспортуванні пульпи за критеріями, які було запропоновано.

Залежність довговічності та гідравлічної ефективності методів захисту труб наведено на рис 3.1, а надійності та вартості – на рис 3.2 і у табл 3.2. Окремі діаграми по кожному методу наведені на рис 3.3

З наведених графіків випливає, що керамічні вкладиші та базальтові/композитні труби мають найвищу довговічність, але їх гідравлічна ефективність дещо знижена через більшу шорсткість і складність у точному монтажі.

Поліуретанові та поліетиленові вкладиші забезпечують високу гідравлічну ефективність завдяки гладкій поверхні, але поступаються за довговічністю.

Гумування має середню довговічність і добру гідравлічну ефективність, проте швидше старіє під дією абразиву й хімії.

Наплавлення (NiCrBSi, карбіди) відзначається високою довговічністю, але гідравлічна ефективність залежить від якості поверхневої обробки (може бути гірша через мікрошорсткість).

Футеровані секції гнучкі в ремонті, але мають лише середній баланс цих двох критеріїв.

Тож з графіка (рис 3.1) випливає, що для умов, де критична максимальна довговічність (наприклад, високий абразив), краще кераміка або базальт. Якщо важлива гідравлічна ефективність і енергозбереження, то поліуретан чи поліетилен.

З точки зору надійності та вартості гумування має низьку вартість і середню надійність, що є добрим варіантом для тимчасових або не дуже навантажених трубопроводів.

Поліуретан має середню вартість, високу надійність, особливо при ударах і середньому абразиві.

Кераміка та базальт мають високу вартість, але і найвища надійність у довготривалому циклі роботи.

Наплавлення (NiCrBSi, карбіди) мають дуже високу вартість через технологію, надійність висока, але залежить від умов зварювання і товщини шару.

Поліетиленові/ПВХ вкладиші мають низька вартість, проте і надійність помірна (можливі пошкодження при ударних навантаженнях).

Футеровані секції мають середню/високу вартість через складність виготовлення, надійність хороша, оскільки дозволяють швидко замінювати пошкоджені елементи.

Отже, з графіка (рис 3.2) випливає, для обмеженого бюджету підходять гума чи поліетилен; для максимізації безвідмовної роботи при великих обсягах транспортування — кераміка, базальт або наплавлення.

Таблиця 3.2 - Вартість та довговічність методів захисту трубопроводів

Метод захисту	Орієнтовна вартість (UAH/м)	Орієнтовна довговічність (роки)	Примітки
Гумування	1 500–3 000	2–5	Використовується для середньоабразивних пульп, потребує періодичної заміни.
Поліуретанові вкладиші	2 000–4 000	3–6	Висока зносостійкість, але дорожчі за гуму.
Керамічні вкладиші	5 000–10 000	8–15	Найвища зносостійкість, але висока вартість.
Наплавлення (NiCrBSi, карбіди)	3 500–7 000	5–10	Ефективне для локальних ділянок з високим зносом.
Базальтові/композитні труби	4 000–8 000	8–12	Довговічні, але потребують високих початкових інвестицій.
Поліетиленові / ПВХ вкладиші	1 000–2 000	1–3	Дешеві, але мають короткий ресурс.
Змінні футеровані секції	2 500–5 000	5–8	Зручні для швидкої заміни, але дорожчі за стандартні методи.

Таблиця 3.1 - Порівняльна таблиця методів захисту труб

Метод	Довговічність і зносостійкість	Надійність і коефіцієнт використання	Гідравлічна ефективність	Технологічність і конструктивна реалізованість	Екологія та безпека
Гумування (натуральна/ синтетична гума)	Термін служби: 3–5 р.; $kB \approx 5–10$; добрий захист від ударного зносу.	$A \approx 0.9–0.95$; можливі відшарування гуми; простої середні.	$\lambda \approx 0.02–0.03$; втрати напору середні; зменшення діаметра $\approx 5–10\%$.	Монтаж простий; ремонт потребує переклейки футерування.	Безпечна, екологічна, але відходи гуми важко утилізувати.
Поліуретанові вкладиші	Термін служби: 5–8 р.; $kB \approx 10–20$; стійкі до абразиву, але крихкі при низьких Т.	$A \approx 0.93–0.96$; висока стабільність; простої рідкісні.	$\lambda \approx 0.015–0.02$; гладка поверхня $\rightarrow$ малі втрати напору.	Монтаж відносно простий; легка заміна вкладишів.	Нетоксичні, безпечні; полімерні відходи частково утилізуються.
Керамічні вкладиші	Термін служби: 10–20 р.; $kB \approx 20–50$; максимальна зносостійкість.	$A \approx 0.95–0.97$; висока безвідмовність; простої мінімальні.	$\lambda \approx 0.02–0.03$; втрати вищі через шорсткість; зменшення діаметра.	Монтаж складний; потреба у точному centruванні; важкі елементи.	Екологічні; довгий термін служби $\rightarrow$ менше відходів.
Наплавлення (NiCrBSi, карбіди)	Термін служби: 5–10 р.; $kB \approx 15–40$; висока твердість, але можливі тріщини.	$A \approx 0.9–0.94$; ризик раптових відмов через мікротріщини.	$\lambda \approx 0.025–0.04$; шорстка поверхня $\rightarrow$ зростання втрат напору.	Монтаж складний; ремонт лише зварюванням; потребує спец. обладнання.	Методи безпечні, але пил при наплавленні токсичний.
Базальтові / композитні труби	Термін служби: 15–25 р.; $kB \approx 25–60$; дуже висока зносостійкість.	$A \approx 0.96–0.98$; безвідмовність висока.	$\lambda \approx 0.02–0.03$; втрати дещо більші через мікрошорсткість.	Виготовлення складне; монтаж у секціях; обмеження по радіусу вигину.	Абсолютно екологічні; довгий термін служби.
Поліетиленові / ПВХ вкладиші	Термін служби: 3–7 р.; $kB \approx 5–12$; стійкі до корозії, але слабші проти абразиву.	$A \approx 0.9–0.94$; ймовірні пошкодження при високих Т/тиску.	$\lambda \approx 0.01–0.015$ (гладка поверхня); мінімальні втрати напору.	Монтаж простий; низька вартість; сумісність з іншими методами.	Нетоксичні, безпечні; повна утилізація можлива.
Змінні футеровані секції	Термін служби залежить від футерування: гума (3–5 р.), PU (5–8 р.), кераміка (10–20 р.); $kB \approx 5–30$.	$A \approx 0.92–0.96$; надійність добра, але потрібна заміна секцій.	$\lambda \approx 0.015–0.02$ (PU) до 0.03 (гума/кераміка); втрати помірні.	Технологічність середня; заміна простіша, ніж у наплавлених труб.	Екологічно раціональні — замінюється лише футерування.

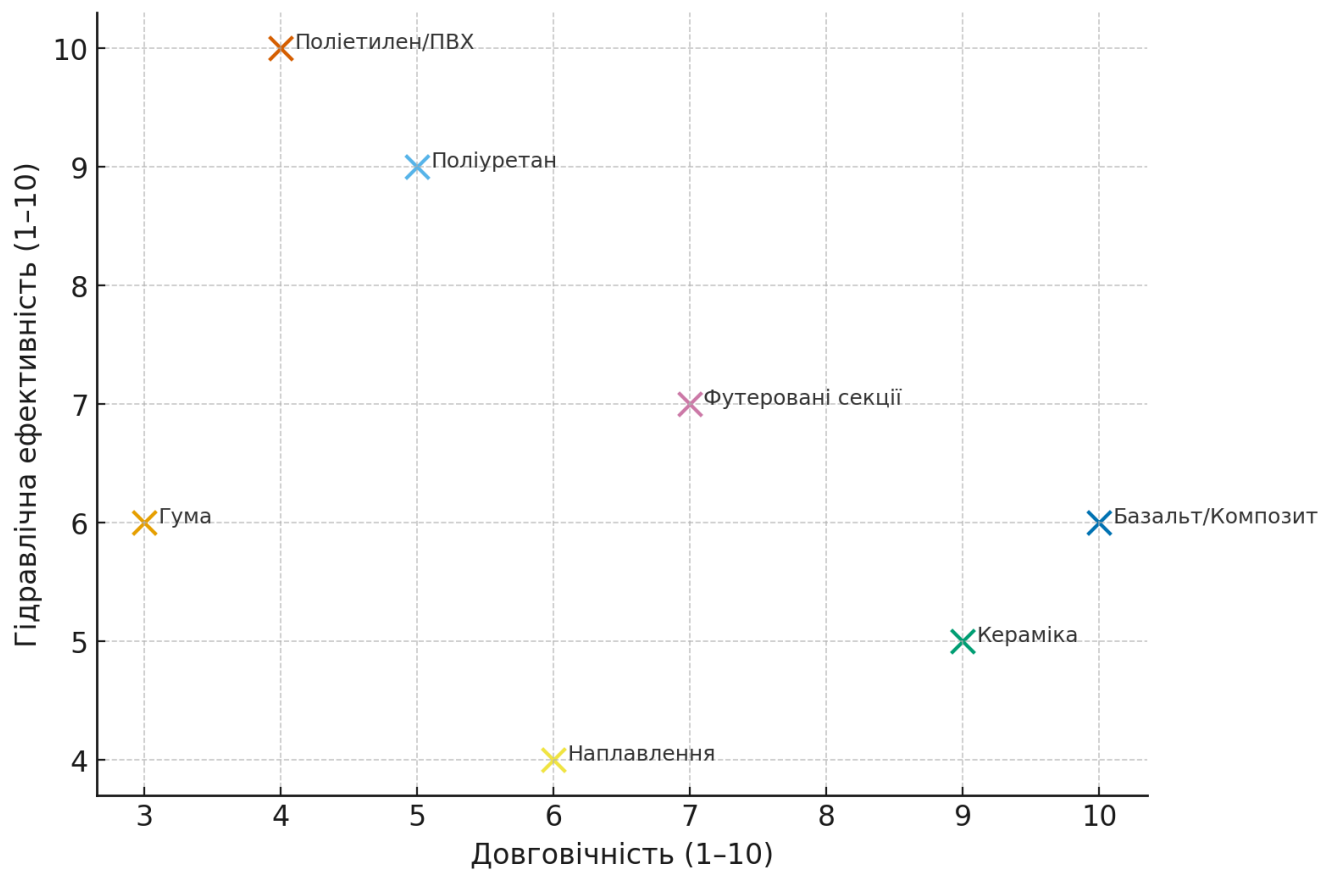


Рис 3.1 – Довговічність та гідравлічна ефективність методів захисту труб

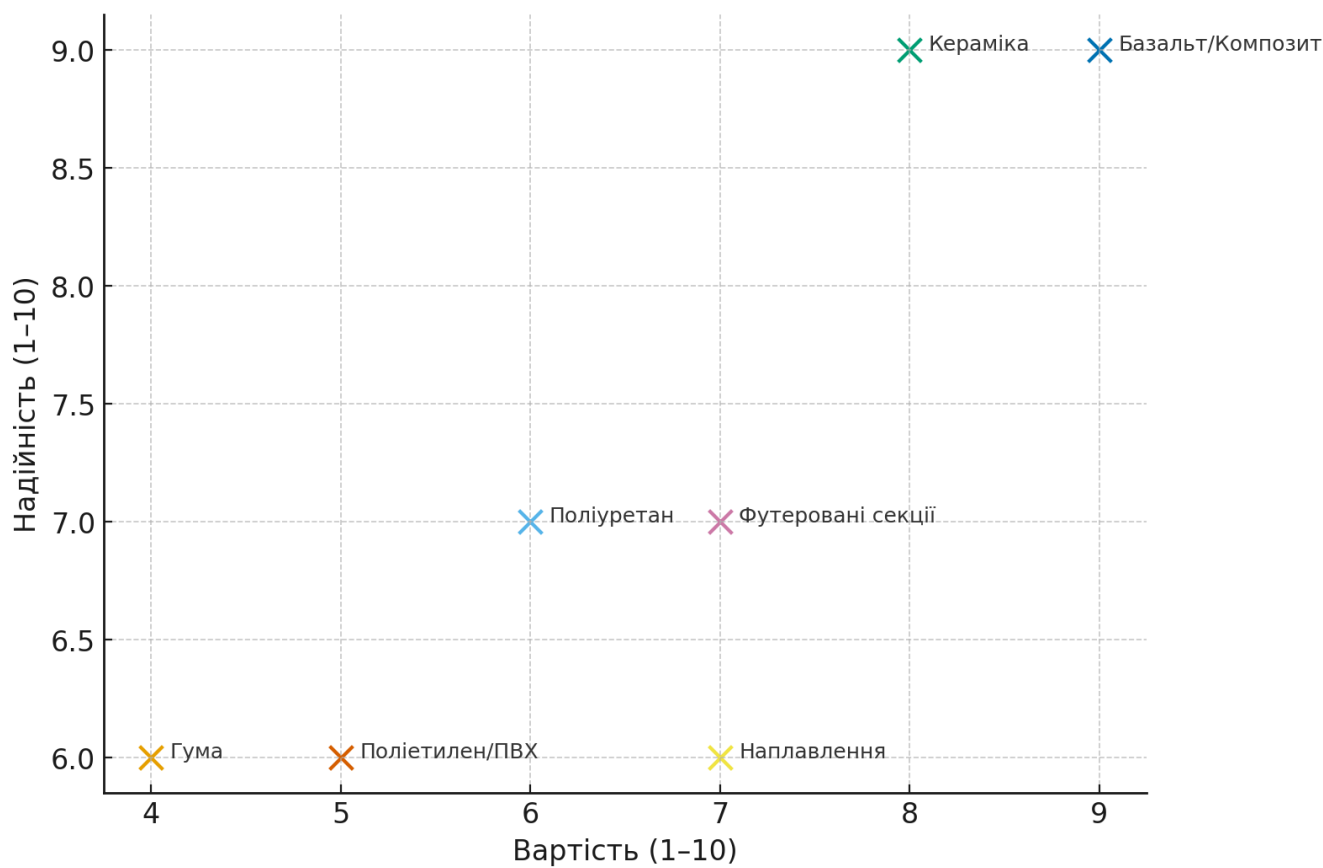


Рис 3.2 – Надійність та вартість методів захисту труб

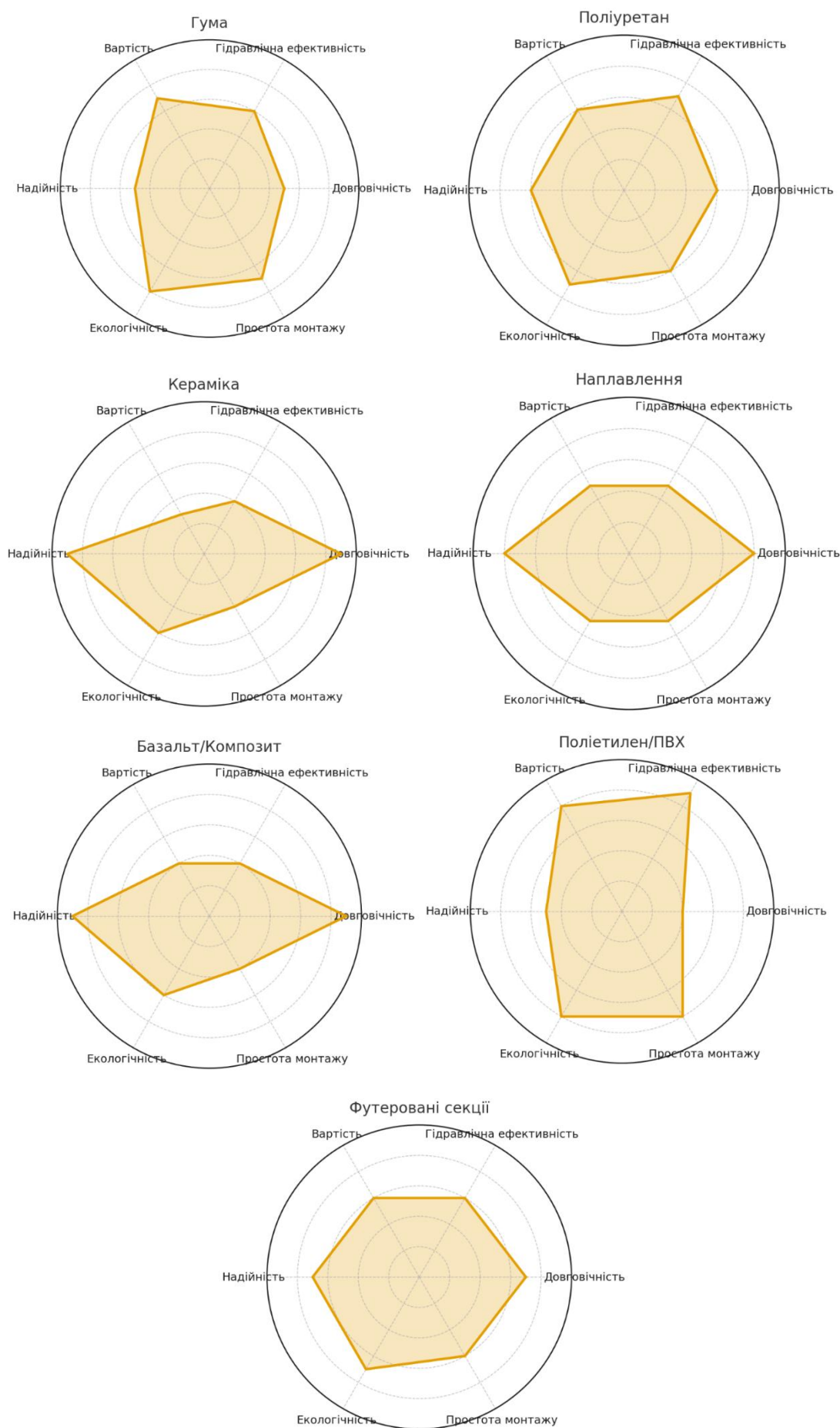


Рис 3.3 – Коротка характеристика розглянутих методів

3.2. Розробка рекомендацій щодо вибору методу захисту труб гідротранспорту на ГЗК

Попередні рекомендації щодо вибору методу захисту наведені у табл. 3.3

Таблиця 3.3 - Доцільність застосування методів захисту залежно від вузла трубопроводу

Елемент	Характер зносу	Доцільні методи захисту	Обґрунтування
Коліна, відводи, трійники	Локальний ударний знос, турбулентні потоки	Керамічні вкладиші, наплавлення (NiCrBSi, карбіди), Змінні футеровані секції	Кераміка – найкраща для концентрованих пульп; Наплавлення – дешевше, дозволяє відновлення; Футеровані секції – швидка заміна без демонтажу
Патрубки насосів, засувки, зони приєднання	Турбулізація, кавітація, комбінація корозії та ерозії	Наплавлення (твердосплави), поліуретан (для менш агресивних потоків), керамічні вкладиші	Наплавлення забезпечує високий ресурс у вузлах; Поліуретан – як компроміс у вартість/ресурс; Кераміка – для максимального захисту
Прямі магістральні ділянки	Абразивний знос по довжині труби	Базальтові труби / композити, гумування (для середньоабразивних пульп), поліуретанові вкладиші	Базальт і композити – оптимальні для довгих ділянок (8–12 років служби); Гумування – дешевше, але ресурс менший; Поліуретан – універсальне рішення
Днища труб (при неповному заповненні)	Нерівномірний абразивний знос	Поліуретанові вкладиші, гумування	Гнучкі матеріали знижують локальну ерозію; легше міняти секції при виході з ладу

Для вибору того чи іншого методу захисту руб на основі проведеного аналізу, розроблено розгорнуте дерево рішень (decision-tree) для вибору методу захисту трубопроводів пульпи на підставі повного набору вхідних даних. Дерево поєднує чіткі гілки (жорсткі критерії) і рекомендації за пріоритетами, а також дає запасний шлях —балансовий скоринг, якщо вимоги конфліктують.

Вхідні дані (потрібні, по порядку, для алгоритму):

1. D — внутрішній діаметр труби (м);

2. Q або V — витрата ($\text{м}^3/\text{с}$) / середня швидкість ($\text{м}/\text{с}$);
3. d_{part} — типова/макс. діаметрна фракція частинок (мм);
4. ρ_p — густина твердих частинок ($\text{кг}/\text{м}^3$);
5. C_v — об'ємна/масова концентрація твердих (%);
6. Абразивність: «низька / середня / висока» або параметричний (твердість, гострота частинок);
7. Режим: ламінар/турбулентний (Re) + часті пуски/зупинки (так/ні);
8. Температура середовища ($^{\circ}\text{C}$);
9. Хімічна агресивність (pH , наявність агресивних реагентів) — «так/ні»;
10. Критичність вузла: пряма ділянка / коліно/тройник / насосний вузол (підвищена);
11. Обмеження по Δp / енергії (можна/не можна підвищувати опір);
12. Бюджет CAPEX (низький/середній/високий) і допустимі простої (низькі/середні/високі);
13. Можливість сервісу/замін на місці (так/ні);
14. Бажаний термін служби (роки).

Правила та обмеження

Велика фракція: $d_{\text{part}} > 2 \text{ mm}$ (помітно збільшує інерційні удари).

Критичні Stokes-величини (орієнтир): якщо $St \gg 1 \rightarrow$ частинки інертні (не слідує за потоком). (Орієнтири: $St < 0.1$ — дуже "гарне" слідування; $0.1-1$ — проміжне; >1 — інерція домінує).

Концентрація: $C_v < 10\%$ — низька; $10-40\%$ — середня; $>40\%$ — висока.

$Re < 2300$ — ламінарне; $2300-10^5$ — перехід/турбулентний; $>10^5$ — сильна турбулентність.

Температура $> 80^{\circ}\text{C}$ — обмежує полімери (PE, PVC, деякі PU).

Бюджет: низький $\rightarrow$ упор на PE/гуму; середній $\rightarrow$ поліуретан/наплавлення; високий $\rightarrow$ кераміка/базальт/композити.

Початкова гілка — базові «фільтри без компромісів»

0. Аварійні жорсткі вимоги

- Якщо температура $> 120^{\circ}\text{C}$ або агресивні хімікати, що руйнують полімери $\rightarrow$ ПОСТУПИТИ в гілку: кераміка / наплавлення / базальт, полімери не підходять.
- Якщо тиск $>$ допустимого для композитів/РЕ $\rightarrow$ виключити РЕ/PVC/гуму.
- Якщо вимога: мінімальні Δp (енергетика критична) і бюджет низький $\rightarrow$ перевага РЕ/PVC або поліуретан (мінімізують Δp).

1. Чи критичний вузол? (коліно/тройник/патрубок насосів)

- Так (локально підвищений знос) $\rightarrow$ перейти до вузлової гілки (див. 2).
- Ні (пряма магістраль) $\rightarrow$ перейти до магістральної гілки (див. 3).

2. Вузлова гілка (коліно / насосний вузол / трійник)

(ці місця піддаються ударному зносу — вимоги на максимальну абразійну стійкість)

2.1. Якщо абразивність дуже висока (гострі тверді частинки, $C_v > 30\%$ або $d_{\text{part}} > 2 \text{ mm}$) $\rightarrow$ керамічні вкладиші в якості першого варіанту; якщо бюджет дозволяє — кераміка + змінні футеровані секції для швидкої заміни. Обґрунтування: найкраща ударо- і абразіостійкість.

2.2. Якщо абразивність середня (C_v 10–30%) та бюджет середній $\rightarrow$ наплавлення (NiCrBSi + WC) або поліуретанові/гумові змінні секції (залежить від частоти пусків та температури). Наплавлення підійде для місць з більшим тиском/температурою; поліуретан — коли важлива демпфуюча здатність.

2.3. Якщо бюджет обмежений і повинна бути швидка заміна $\rightarrow$ змінні футеровані секції з поліуретаном або гумою (легко замінювати).

2.4. Якщо **гібридні вимоги** (дуже абразивно + можливі удари + треба мінімізувати Δp) $\rightarrow$ кераміка в критичних точках + поліуретан/РЕ на прилеглих ділянках (комбінований підхід).

Вихід із вузлової гілки: рекомендовано (в порядку пріоритету) — кераміка (вузол) $\pm$ футеровані секції; якщо неможливо — наплавлення; якщо бюджет низький — гум/PU секції.

3. Магістральна гілка (довгі прямі ділянки)

3.1. Якщо $C_v < 10\%$ (низька концентрація) і $d_{\text{part}} < 0.2 \text{ mm}$ (тонкі суспензії), то перевага — *PE/PVC вкладиші* (низький Δp , хороша корозійна стійкість), або *поліуретан* при помірній абразивності.

3.2. Якщо C_v 10–40% (середня), то *поліуретан* — універсальний вибір (гарний баланс ціна / довговічність / Δp).

Якщо *потрібно дуже довго служити* (горизонт $> 5\text{--}10$ років) і бюджет *високий* — базальт/композити.

3.3. Якщо $C_v > 40\%$ або $d_{\text{part}} > 2 \text{ mm}$ (висока абразивність), то *при високому бюджеті* — базальт/композити (максимальний ресурс).

при середньому — *наплавлення* (висока зносостійкість за меншу ціну, ніж базальт), або *змінні футеровані секції* з керамічними/поліуретановими вставками у критичних ділянках.

3.4. Якщо *енергетика критична* (обмеження Δp), то уникати рішень із великим зменшенням D (товсті футеровки $> t/D \approx 0.02$). Перевага — *PE/PVC* або *тонкий поліуретан*; *кераміка/базальт* краще підходять, якщо внутрішній прохід збережено або компенсується більшою номінальною трубою.

4. Режимні/додаткові фільтри

4.1. Часті пуски/зупинки (transients):

Якщо *часті* — *поліуретан* краще за кераміку (менш крихкий при циклічних навантаженнях).

Якщо *рідкісні* — *кераміка* чи *базальт* більш доцільні.

4.2. *Температура* $> 60\text{--}80^\circ\text{C}$, то виключити *PE/PVC*, деякі PU; перевага — *наплавлення, кераміка, базальт*.

4.3. *Хімічна агресивність* (pH екстремальний/агресивні реагенти), то вибір: *кераміка* $>$ *базальт* $>$ *наплавлення* (із стійких сплавів). Полімери — тільки спеціальні (хімстійкі компаунди).

4.4. *Велика фракція / інерційна поведінка* ($St > 1$), то частинки інертні — більший ризик удару об стінку $\rightarrow$ *кераміка* або *наплавлення* або *змінні секції з твердими вставками*.

4.5. *Обмеження на прості* (потрібна дуже висока доступність), якщо *простій критичний*, то — вибір довговічні рішення (*базальт, кераміка*) або змінні секції, щоб заміна виконувалася мінімально часто і швидко.

5. Бюджет і LCC (життєвий цикл) — правило прийняття рішення

Якщо CAPEX (*Capital Expenditures, капітальні витрати*) - низький і OPEX (*Operational Expenditures, операційні витрати*) відносно доступні (можете частіше міняти), то вибір: *гумування, PE/PVC*.

Якщо CAPEX - середній і бажаєте зменшити OPEX, то *поліуретан або наплавлення*.

Якщо CAPEX - високий і потрібна мінімізація OPEX і простоїв, то *базальт/композити або кераміка* (LCC-оптимальні при довгих термінах служби).

6. Фінальний блок — комбінований скоринг (коли вимоги конфліктні)

Іноді властивості конфліктні (наприклад, хочеться одночасно низький Δр, високу довговічність і низький CAPEX). У цьому випадку застосовується зважений скоринг

6.1. Пропонована вага критеріїв (типовий приклад) (ваги змінюйте під замовника)

- Довговічність (T) — 30%
- Гідравлічна ефективність (H) — 20%
- Вартість (CAPEX) — 20%
- Надійність/доступність (A) — 15%
- Технологічність / сервіс (S) — 10%
- Екологія (E) — 5%

6.2. Нормалізація і оцінка

Для кожного методу даємо оцінку 0–10 за кожним критерієм (приклади — згадані раніше). Обчислюємо зважену суму. Метод з найвищим балом — рекомендація.

ПРИМІТКА. зробіть 2 сценарії: «CAPEX-консервативний» (вища вага CAPEX) і «OPEX-консервативний» (вища вага довговічності), порівняйте результати.

7. Готові «швидкі» рішення

1. Прямі ділянки, невелика абразивність, енергетика критична, бюджет низький → РЕ/PVC вкладиші.
 2. Прямі ділянки, середня абразивність, середній бюджет → поліуретанові вкладиші.
 3. Коліна/вузли, висока абразивність, бюджет високий → керамічні вкладиші (опціонально змінні секції).
 4. Ділянки з високою температурою / хімічністю → наплавлення сплавами/карбідами або базальт/композити.
 5. Довгі магістральні ділянки, дуже висока абразивність, бажаний термін >15 р. → базальтові / композитні труби.
 6. Обмежений бюджет, місця з локальним сильним зносом → змінні футеровані секції (гума/PU/кераміка залежно від вузла)**.
 7. Якщо часті пуски/зупинки → поліуретан > гума > кераміка.
 8. Якщо $St \gg 1$ (частинки інертні) → **кераміка / наплавлення / базальт.
- Побудуємо спрощене дерево рішень.

1. Визначення абразивності пульпи

Низька / середня
(дрібні, не дуже тверді частинки, невисока концентрація)

Висока
(тверді, гострі частинки, висока концентрація)

Дуже висока
(максимальна абразивність, крупні тверді фракції)

БЛОК А. Низька/середня абразивність
Перевірка робочого тиску
До 2 МПа → Поліетиленові / ПВХ вкладиші
2–4 МПа → Гумування
Наявність агресивних хімічних домішок
Є → Гумування хімістійкою гумою
Немає → Стандартні гумові або поліуретанові вкладиші

БЛОК В. Висока абразивність
Перевірка швидкості потоку
До 3 м/с → Поліуретанові вкладиші
Більше 3 м/с → перехід до В2
Перевірка вузлів (коліна, відводи)
Прямолінійні ділянки → Базальтові труби / композити (8–12 років служби)
Локальні вузли (коліна, розгалуження) → Керамічні вставки або змінні футеровані секції

БЛОК С. Дуже висока абразивність
Температура та агресивність середовища
Висока температура / агресивні хімічні домішки → Наплавлення (NiCrBSi, хром, карбіди)
Нормальні умови → Керамічні вкладиші
Ключові вузли (зони турбулізації, коліна)
Використовуються змінні футеровані секції для швидкої заміни без демонтажу всієї труби.

Підсумок дерева рішень

- Дешева та швидка стратегія → поліетиленові / гумові вкладиші.
- Середній рівень зносу → поліуретан, базальтові труби.
- Максимальний рівень захисту → кераміка, наплавлення, футеровані секції.

Висновки до розділу 3

1. Проведено дослідження виокремлених методів захисту трубопроводів для транспортування пульпи на ГЗК на основі запропонованих критеріїв. Встановлені кількісні характеристики для кожного методу.
2. Встановлено, що керамічні вкладиші та базальтові/композитні труби мають найвищу надійність і довговічність, але їх гідравлічна ефективність дещо знижена через більшу шорсткість і складність у точному монтажі, мають високу вартість.
3. Встановлено, що поліуретанові та поліетиленові вкладиші забезпечують високу гідравлічну ефективність завдяки гладкій поверхні, але поступаються за довговічністю, мають середню вартість, помірну надійність, особливо при ударах і середньому абразиві.
4. Встановлено, що гумування має середню довговічність і добру гідравлічну ефективність, проте швидше старіє під дією абразиву й хімії.
5. Встановлено, що наплавлення (NiCrBSi, карбіди) відзначається високою надійністю і довговічністю, але гідравлічна ефективність залежить від якості поверхневої обробки (може бути гірша через мікрошорсткість), мають дуже високу вартість через технологію.
6. Встановлено, що для умов, де критична максимальна довговічність (наприклад, високий абразив), краще кераміка або базальт. Якщо важлива гідравлічна ефективність і енергозбереження, то поліуретан чи поліетилен. З точки зору надійності та вартості гумування має низьку вартість і середню

надійність, що є добрим варіантом для тимчасових або не дуже навантажених трубопроводів.

7. Встановлено, що футеровані секції мають середню/високу вартість через складність виготовлення, надійність хороша, оскільки дозволяють швидко замінювати пошкоджені елементи.
8. Встановлено, що для обмеженого бюджету підходять гума чи поліетилен; для максимізації безвідмовної роботи при великих обсягах транспортування — кераміка, базальт або наплавлення.
9. Встановлено, що для захисту колін, відводів, трійників підходять керамічні вкладиші, наплавлення (NiCrBSi, карбіди), змінні футеровані секції.
10. Встановлено, що для захисту патрубків насосів, засувок, зон приєднання підходять наплавлення (твердосплави), поліуретан (для менш агресивних потоків), керамічні вкладиші.
11. Встановлено, що для захисту прямих магістральних ділянок підходять базальтові труби / композити, гумування (для середньоабразивних пульп), поліуретанові вкладиші.
12. Встановлено, що для захисту днищ труб (при неповному заповненні) підходять поліуретанові вкладиші, гумування.
13. Для вибору того чи іншого методу захисту руб на основі проведеного аналізу, розроблено розгорнуте і спрощене дерева рішень (decision-tree) для вибору методу захисту трубопроводів пульпи на підставі повного набору вхідних даних. Дерево поєднує чіткі гілки (жорсткі критерії) і рекомендації за пріоритетами, а також дає запасний шлях —балансовий скоринг, якщо вимоги конфліктують.
14. Встановлено в результаті роботи спрощеного дерева рішень, що за дешевої та швидкої стратегія краще використовувати поліетиленові / гумові вкладиші; при середньому рівні зношення краще використовувати поліуретан, базальтові труби, а для максимального рівня захисту краще підійдуть кераміка, наплавлення, футеровані секції.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає у обґрунтуванні заходів зі зниження зношення пульпопроводів на гірничо-збагачувальних підприємствах

1. Встановлено, що традиційна система критеріїв (довговічність, надійність, гідравлічна ефективність, технологічність, економічність) є базовою, але недостатньо відображає сучасні вимоги, оскільки не враховує екологічність і безпеку.
2. Запропоновано для оцінювання ефективності методів захисту трубопроводів для транспортування пульпи, як комплексного завдання, врахувати технічні, економічні, а також екологічні і безпекові чинники.
3. Встановлено, що довговічність трубопроводів та стійкість до зношування залишаються ключовими технічними критеріями, які можуть бути кількісно оцінені через показники швидкості зносу, прогнозованого терміну служби та коефіцієнта зносостійкості.
4. Надійність системи та коефіцієнт її використання тісно пов'язані з ремонтпридатністю, тобто можливістю швидкого відновлення працездатності трубопроводу з мінімальними простоями.
5. Гідравлічна ефективність є критичним критерієм, оскільки захисні покриття можуть змінювати шорсткість і діаметр труб, що безпосередньо впливає на енергоспоживання системи.
6. Технологічність і конструктивна реалізованість методів визначаються складністю монтажу, вартістю ремонту, сумісністю з існуючими елементами системи та можуть бути формалізовані через індекс технологічності.
7. Економічна доцільність методів оцінюється за інтегральними показниками — приведеними витратами та річним економічним ефектом, які дозволяють порівнювати альтернативні рішення.

8. Додатковим сучасним блоком оцінки мають стати критерії екологічності та безпеки, що відображають токсичність матеріалів і процесів, можливості утилізації та ризики для персоналу.
9. Використання інтегрованої багатофакторної системи критеріїв дозволить обґрунтувати вибір найбільш ефективних методів захисту трубопроводів у гірничо-збагачувальних підприємствах, поєднуючи технічну ефективність, економічну вигідність, екологічність та безпеку.
10. Встановлено найбільш зношувані елементи трубопроводів, це коліна, відводи, трійники, місця входу/виходу пульпи (патрубки насосів, засувки, вузли приєднання труб), прямі ділянки з високою швидкістю потоку, днища та нижні частини труб.
11. Проведено критичний аналіз сучасних методів захисту від зношування, а саме гумування, поліуретанові вкладиші, керамічні вкладиші, базальтові труби, наплавлення, змінні футеровані секції, поліетиленові та ПВХ вкладиші. Для кожного методу визначено область застосування.
15. Проведено дослідження виокремлених методів захисту трубопроводів для транспортування пульпи на ГЗК на основі запропонованих критеріїв. Встановлені кількісні характеристики для кожного методу.
16. Встановлено, що керамічні вкладиші та базальтові/композитні труби мають найвищу надійність і довговічність, але їх гідравлічна ефективність дещо знижена через більшу шорсткість і складність у точному монтажі, мають високу вартість.
17. Встановлено, що поліуретанові та поліетиленові вкладиші забезпечують високу гідравлічну ефективність завдяки гладкій поверхні, але поступаються за довговічністю, мають середню вартість, помірну надійність, особливо при ударах і середньому абразиві.
18. Встановлено, що гумування має середню довговічність і добру гідравлічну ефективність, проте швидше старіє під дією абразиву й хімії.
19. Встановлено, що наплавлення (NiCrBSi, карбіди) відзначається високою надійністю і довговічністю, але гідравлічна ефективність залежить від

якості поверхневої обробки (може бути гірша через мікрошорсткість), мають дуже високу вартість через технологію.

20. Встановлено, що для умов, де критична максимальна довговічність (наприклад, високий абразив), краще кераміка або базальт. Якщо важлива гідравлічна ефективність і енергозбереження, то поліуретан чи поліетилен. З точки зору надійності та вартості гумування має низьку вартість і середню надійність, що є добрим варіантом для тимчасових або не дуже навантажених трубопроводів.
21. Встановлено, що футеровані секції мають середню/високу вартість через складність виготовлення, надійність хороша, оскільки дозволяють швидко замінювати пошкоджені елементи.
22. Встановлено, що для обмеженого бюджету підходять гума чи поліетилен; для максимізації безвідмовної роботи при великих обсягах транспортування — кераміка, базальт або наплавлення.
23. Встановлено, що для захисту колін, відводів, трійників підходять керамічні вкладиші, наплавлення (NiCrBSi, карбіди), змінні футеровані секції.
24. Встановлено, що для захисту патрубків насосів, засувок, зон приєднання підходять наплавлення (твердосплави), поліуретан (для менш агресивних потоків), керамічні вкладиші.
25. Встановлено, що для захисту прямих магістральних ділянок підходять базальтові труби / композити, гумування (для середньоабразивних пульп), поліуретанові вкладиші.
26. Встановлено, що для захисту днищ труб (при неповному заповненні) підходять поліуретанові вкладиші, гумування.
27. Для вибору того чи іншого методу захисту руб на основі проведеного аналізу, розроблено розгорнуте і спрощене дерева рішень (decision-tree) для вибору методу захисту трубопроводів пульпи на підставі повного набору вхідних даних. Дерево поєднує чіткі гілки (жорсткі критерії) і рекомендації за пріоритетами, а також дає запасний шлях — балансовий скоринг, якщо вимоги конфліктують.

28. Встановлено в результаті роботи спрощеного дерева рішень, що за дешевої та швидкої стратегія краще використовувати поліетиленові / гумові вкладиші; при середньому рівні зношення краще використовувати поліуретан, базальтові труби, а для максимального рівня захисту краще підійдуть кераміка, наплавлення, футеровані секції.