

В.І. Кобзар, О.Ю. Кривенко, А.В. Пікільняк

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ КРИТЕРІЇВ НАДІЙНОСТІ

Анотація. У статті розглянуто питання підвищення надійності та ефективності гідротранспортних систем, які є критичними елементами багатьох промислових процесів. Проаналізовано сучасний стан таких систем, зокрема їхню складність як технічних об'єктів, а також фактори, що впливають на знос елементів, включаючи гідроабразивний вплив. Обґрунтовано доцільність використання стохастичних моделей для опису процесів зношування, що дозволяє точніше прогнозувати ресурс трубопроводів та іншого обладнання. Запропоновано математичні та оптимізаційні моделі, які враховують стохастичну природу експлуатаційних параметрів, для вибору раціональних схем гідротранспорту. Проведено порівняльний аналіз різних схем функціонування систем, встановлено критерії надійності та ефективності. Окрему увагу приділено економічним аспектам експлуатації, методикам моніторингу та прогнозування технічного стану. Результати досліджень мають практичне значення для проектування та обслуговування гідротранспортних систем, що дозволяє знизити витрати, пов'язані з простоями, та підвищити загальну ефективність роботи підприємств.

Ключові слова: гідротранспортні системи, надійність, гідроабразивний знос, стохастичне моделювання, трубопровід, ґрунтовий насос, технічне обслуговування, ефективність, оптимізація, промислова експлуатація.

Постановка проблеми. Гідротранспортні системи є важливими складовими промислових підприємств, забезпечуючи транспортування значних обсягів твердих матеріалів. Водночас, зростаючі вимоги до їх ефективності та надійності висувають потребу у науково обґрунтованих підходах до проектування та експлуатації. Нині відсутні універсальні методики вибору оптимальних схем транспортування гідросумішей, особливо для багатоступеневих систем, а також моделі, що дозволяють точно оцінити надійність обладнання та трубопроводів. Це призводить до помилок у проектуванні, частих відмов і аварій, що супроводжуються значними фінансовими втратами через простой. Тому актуальною є розробка комплексного підходу до оцінки та підвищення надійності гідротранспортних систем, з урахуванням особливостей їх функціонування, факторів зношування та стохастичного характеру деградаційних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідротранспортні системи — це складні технічні об'єкти, що функціонують у жорстких умовах експлуатації та піддаються дії багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів. На відміну від класичних транспортних

механізмів, їх функціонування не припиняється повністю у разі відмови окремих елементів, що підвищує загальну надійність, але суттєво ускладнює аналіз і прогнозування технічного стану. Ключовими елементами таких систем є ґрунтові насоси, трубопроводи, арматура, які зазнають впливу абразивних властивостей транспортованих матеріалів, концентрації гідросуміші, неусталених режимів, технологічних дефектів, старіння та помилок персоналу. Аналіз літератури підтверджує, що механізм гідроабразивного зношування обумовлений пластичною деформацією та мікрорізнанням матеріалу [1].

Системи гідротранспортування, залежно від сфери застосування, мають свою специфіку. Наприклад, системи транспортування вугілля мають справу з високою абразивністю матеріалу, у той час як у шламових системах алюмінієвого виробництва до механічного зносу додається ще й хімічна корозія. Золошлакові системи на ТЕС працюють в умовах підвищеної температури та гетерогенності середовища. Такі особливості потребують окремого врахування при створенні моделей для розрахунку надійності [3, 4].

У більшості традиційних підходів до розрахунку надійності гідротранспортних систем процес гідроабразивного зношування описується як детермінований, що дозволяє розрахувати лише середнє значення зносу. Однак такий підхід ігнорує стохастичну природу експлуатаційних умов, унаслідок чого можуть виникати значні похибки у прогнозах ресурсу трубопроводів і насосів [5, 6]. Показано, що для гідроабразивного зносу характерне нелінійне зростання дисперсії — не лінійно з часом, як у випадку сильного перемішування, а пропорційно квадрату часу, що свідчить про відсутність однорідності у впливі чинників зношування. Це вимагає застосування стохастичних моделей з урахуванням змінних експлуатаційних параметрів [2, 5].

Використання методів моделювання випадкових процесів, зокрема теорії Марковських ланцюгів, як зазначено в сучасних працях [2, 3], є перспективним для визначення ймовірностей відмов елементів системи та оптимізації технічного обслуговування. Надійність гідротранспортних систем тісно пов'язана з економічною доцільністю їх експлуатації. У низці досліджень [5, 6] обґрунтовано необхідність розробки інтегрованих показників ефективності, які враховують не лише витрати на технічне обслуговування та енергоспоживання, а й потенційні втрати через простой, пов'язані з відмовами систем. Зокрема, впровадження систем моніторингу робочих параметрів насосних станцій дозволяє скоротити енергоспоживання до 21% [4], що є свідченням ефективності комплексного підходу до управління надійністю.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності та надійності гідротранспортних систем шляхом вибору раціональних схем транспортування гідросумішей, розробки математичних моделей для оцінки показників надійності ґрунтових насосів і трубопроводів з урахуванням стохастичної природи гідроабразивного зносу та змінних експлуатаційних умов. Особлива увага приділяється оптимізації розміщення насосних станцій та визначенню параметрів, що забезпечують безперебійну роботу систем.

Викладення основного матеріалу дослідження. Гідротранспортні системи, що використовуються у видобуванні та транспортуванні залізної руди, мають свої характе-

рні особливості. Зокрема, рудна пульпа вирізняється високою абразивністю та змінною концентрацією, що підвищує зношування елементів системи і чутливість до зміни гідравлічних режимів. Крім того, хімічний склад пульпи може спричиняти додаткову корозію, особливо при тривалому контакті з внутрішніми поверхнями трубопроводів. Ці фактори обов'язково слід враховувати при побудові моделей та методик оцінки надійності гідротранспортних систем у гірничорудній промисловості.

У традиційних підходах гідроабразивний знос трубопроводів часто розглядається як детермінований процес, що дозволяє оцінити лише середній рівень зношування. Проте у випадку транспортування залізної руди, де умови експлуатації постійно змінюються (наприклад, швидкість потоку, розмір частинок, концентрація), такий підхід є недостатнім. Ігнорування варіативності зносу призводить до суттєвих похибок у прогнозуванні ресурсу обладнання — або до його передчасного виходу з ладу, або до нерационального використання.

Доцільніше моделювати гідроабразивний знос як стохастичний процес. Попри поширене застосування такого підходу в механіці машин, для трубопроводів у рудопроводах він використовується рідко. Більшість моделей базується на припущенні про лінійне зростання дисперсії зносу в часі. Проте дослідження свідчать, що у випадку транспортування рудної пульпи дисперсія зростає пропорційно квадрату часу, що вказує на відсутність сильного перемішування і однорідності умов. Це важливе спостереження слід враховувати для підвищення точності прогнозів ресурсу та надійності рудопроводів.

Математична формалізація стохастичних процесів зношування вимагає застосування спеціальних методів аналізу випадкових процесів. Для опису гідроабразивного зносу стінок трубопроводів можна використовувати модель випадкового процесу з незалежними приростами. В такому випадку приріст зносу за малий проміжок часу Δt можна описати як випадкову величину з певними параметрами розподілу. Якщо позначити через $X(t)$ випадковий процес накопиченого гідроабразивного зносу до моменту часу t , то для нього виконуються наступні умови:

1. $X(0) = 0$;
2. Для будь-яких моментів часу $t^1 < t^2 < \dots < t_n$ випадкові величини $X(t_1), X(t_2) - X(t_1), \dots, X(t_n) - X(t_{n-1})$ незалежні;
3. Для будь-яких $t > 0$ та $h > 0$ розподіл випадкової величини $X(t+h) - X(t)$ залежить тільки від h .

Такий підхід дозволяє більш точно описати процес гідроабразивного зношування та прогнозувати його розвиток у часі, що є необхідною умовою для адекватної оцінки надійності гідротранспортних систем.

На надійність гідротранспортних систем у гірничорудній промисловості впливають три ключові чинники: якість обладнання та трубопроводів, організація обслуговування (ремонтна політика та профілактика), а також схема функціонування системи. Ці

елементи мають різну вагу у загальній оцінці надійності та взаємодіють між собою, формуючи складну ієрархію показників.

Особливої уваги потребують ґрунтові насоси, що широко застосовуються для транспортування залізорудної пульпи. Їх надійнісна оцінка ускладнюється нерівномірним зносом проточних частин, через що складно точно встановити критичну межу, після якої насос вважається непрацездатним. У таких випадках необхідно залучати статистичні дані щодо зносу деталей – робочих коліс, корпусів, захисних дисків тощо.

Аналіз багаторічної експлуатації насосного обладнання дозволяє визначити закони розподілу часу між відмовами ключових компонентів. Це дає змогу оцінити ймовірність безвідмовної роботи насоса, оптимізувати графіки заміни зношуваних елементів і планувати обсяг запасних частин для забезпечення безперервної роботи рудопроводу. Важливо враховувати взаємозв'язок між зносом різних елементів проточної частини насоса. Його ігнорування занижує оцінку надійності системи. Крім того, значною проблемою є обмежена доступність точних даних про напрацювання до відмови окремих деталей, що ускладнює точне планування технічного обслуговування.

Комплексна оцінка надійності гідротранспортних систем, що застосовуються для транспортування залізорудної пульпи, повинна враховувати їхню складність як технічних об'єктів із численними взаємозалежними елементами. Важливо оцінювати не лише надійність окремих вузлів, але й структуру системи, режими роботи, умови експлуатації та можливість резервування ключових компонентів.

Основні показники надійності таких систем поділяють на чотири групи:

1. Безвідмовність – імовірність роботи без відмов, інтенсивність відмов, середнє напрацювання на відмову;
2. Ремонтопридатність – середній час відновлення, імовірність відновлення в заданий час;
3. Довговічність – середній і гарантований (γ-процентний) ресурс;
4. Комплексні – коефіцієнти готовності та технічного використання.

Вибір конкретних показників залежить від призначення системи, її архітектури та умов рудопровідної експлуатації. У теорії надійності розрізняють два основні підходи: аналіз за станом окремих елементів та за зміною визначальних параметрів. Перший вимагає детального опису всіх складових системи та обліку кореляцій між ними, що часто складно реалізувати для великих гідросистем. Натомість другий підхід базується на спостереженні за параметрами, які відображають загальний стан системи — наприклад, продуктивність, тиск або енергоспоживання. Цей метод дозволяє оцінити надійність без необхідності повного опису кожного компонента, що особливо цінно в умовах гірничорудної промисловості, де доступ до елементів системи обмежений, а зовнішні умови експлуатації постійно змінюються.

Для оцінки надійності обладнання, трубопроводів і арматури в рудопроводах застосовують моделі стаціонарних випадкових процесів і математичну теорію надійності. При аналізі надійності гідротранспортної системи в цілому, як складної технічної структури, використовують методи Марковських процесів, теорію масового обслуговування та логіко-ймовірнісні моделі на основі графів. Закони розподілу ймовірностей випа-

дкових величин, що характеризують знос або відмови компонентів, визначають за статистичними даними, отриманими під час експлуатації. Якщо обсяг вибірки достатній, використовують критерій Пірсона (χ^2), а при невеликих вибірках — критерій Вілка (W) для перевірки нормальності розподілу.

Дослідження гідротранспортних систем для транспортування залізорудної пульпи проводять у лабораторних та промислових умовах. Лабораторні дослідження забезпечують контрольованість умов та прискорене моделювання процесів, які в реальній експлуатації тривають роками. Це дає змогу ефективно підбирати матеріали та режимні параметри для обладнання. У промислових умовах експерименти проводяться безпосередньо на діючих рудопроводах. Для моніторингу використовуються ультразвукові товщиноміри, витратоміри, тискоміри, манометри й рівнеміри. Перевагою таких досліджень є можливість врахувати повний спектр експлуатаційних чинників: реальні навантаження, технічне обслуговування, умови середовища та характерні режими роботи. Для обробки експериментальних даних, отриманих у лабораторних і промислових дослідженнях рудопроводів, використовуються статистичні методи, що дозволяють визначити розподіл таких параметрів, як інтенсивність зношування, напрацювання на відмову, час відновлення тощо. При великій вибірці гіпотези про форму розподілу перевіряють за критерієм Пірсона (χ^2). Якщо вибірка невелика (менше 50 спостережень) і перевіряється нормальність розподілу, застосовують критерій W. Для порівняння параметрів надійності обладнання в різних експлуатаційних умовах використовують U-критерій Вілкоксона. Для оцінки надійності систем транспортування залізорудної пульпи застосовують математичні моделі, що враховують стохастичний характер зміни гідродинамічних параметрів потоку та геометрії рудопроводів. Структурні моделі описують систему як сукупність взаємозалежних елементів.

У спрощеному випадку система подається як:

Послідовне з'єднання елементів:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t), \quad (1)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи системи за час t , $P_n(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи n -го елемента.

Паралельне з'єднання елементів:

$$P(t) = 1 - (1 - P_1(t)) \cdot (1 - P_2(t)) \cdot \dots \cdot (1 - P_n(t)). \quad (2)$$

Для складних схем рудопроводів із резервуванням або змішаними з'єднаннями використовують методи декомпозиції, мінімальних шляхів і перерізів, а також статистичне моделювання для розрахунку загальної ймовірності безвідмовної роботи.

Одним з найбільш потужних інструментів для аналізу надійності гідротранспортних систем є теорія Марковських випадкових процесів. Марковські моделі дозволяють враховувати ймовірнісний характер процесів відмов та відновлень, а також взаємодію різних елементів системи. В Марковській моделі гідротранспортної системи всі можливі стани системи можна представити як дискретні стани S_i ($i = 1, 2, \dots, n$), а процес

переходу з одного стану в інший описується матрицею інтенсивностей переходів $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}$, де λ_{ij} - інтенсивність переходу зі стану S_i в стан S_j

Система диференціальних рівнянь Колмогорова для ймовірностей станів $p(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\}$ має вигляд:

$$\frac{dp(t)}{dt} = p(t) \cdot \Lambda \quad (3)$$

Для стаціонарного випадку, коли $t \rightarrow \infty$, система рівнянь спрощується до:

$$p \cdot \Lambda = 0$$

З додатковою умовою нормування:

$$p^1 + p^2 + \dots + p_n = 1. \quad (4)$$

Розв'язання цієї системи рівнянь дозволяє визначити граничні ймовірності станів системи, що дає змогу розрахувати такі показники надійності, як коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання, середнє напрацювання на відмову та інші. Важливим аспектом моделювання є визначення місць розташування послідовно включених ґрунтових насосів по магістралі. Традиційні методики розрахунку відстані між насосами часто не враховують стохастичні коливання напору, що розвивається насосом, і енергетичних втрат по трубопроводу. Врахування цих параметрів є необхідним для вибору оптимальної відстані між насосами. Задача оптимального розміщення насосних станцій може бути сформульована як задача нелінійного програмування:

$$\min F(x^1, x^2, \dots, x_n), \quad (5)$$

при обмеженнях:

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, j = 1, 2, \dots, p, \quad (7)$$

де F – цільова функція (наприклад, сумарні приведені витрати на спорудження та експлуатацію системи), x_i – координати розміщення насосних станцій, g_i і h_j – обмеження у вигляді нерівностей та рівнянь відповідно.

Для вирішення цієї задачі можуть використовуватися методи нелінійного програмування, зокрема:

- метод множників Лагранжа;
- метод гілок і меж;
- генетичні алгоритми тощо.

Важливим елементом оцінки надійності гідротранспортних систем є прогнозування ресурсу трубопроводів. Для цього розробляються спеціальні математичні моделі, що враховують стохастичний характер гідроабразивного зносу стінок трубопроводів. Одна з таких моделей базується на представленні процесу гідроабразивного зносу як випадкового процесу з незалежними приростами. Нехай $\delta(t)$ - випадковий процес, що

описує залишкову товщину стінки трубопроводу в момент часу t . Тоді ймовірність безвідмовної роботи трубопроводу до моменту часу t можна визначити як:

$$R(t) = P\{\delta(\tau) > \delta_{\min} \text{ для всіх } \tau \in [0, t]\}, \quad (8)$$

де $\delta_{\min}$ - мінімально допустима товщина стінки трубопроводу.

Для визначення цієї ймовірності можна використовувати методи теорії випадкових процесів, зокрема, метод перших перетинів. Суть методу полягає у визначенні розподілу випадкової величини $\tau = \inf\{t: \delta(t) \leq \delta_{\min}\}$, тобто моменту першого перетину процесом $\delta(t)$ рівня $\delta_{\min}$. Тоді ймовірність безвідмовної роботи до моменту t визначається як:

$$R(t) = P\{\tau > t\}. \quad (9)$$

Знаючи розподіл випадкової величини τ , можна визначити середній ресурс трубопроводу, а також інші показники надійності.

Підвищення ефективності напірних гідротранспортних систем може бути досягнуто шляхом вибору раціональної схеми транспортування гідросуміші, заснованого на показниках надійності систем, з урахуванням стохастичного характеру зміни їх режиму роботи в залежності від основних параметрів ґрунтових насосів і потоку гідросуміші.

Комплексний підхід до оптимізації гідротранспортних систем включає в себе кілька ключових напрямків:

1. Вибір оптимальної структурної схеми системи з урахуванням надійності та економічних показників;
2. Оптимізація режимів роботи обладнання для забезпечення максимальної ефективності та мінімального зносу;
3. Розробка стратегії технічного обслуговування та ремонту, що забезпечує необхідний рівень надійності при мінімальних витратах;
4. Впровадження сучасних технологій моніторингу та діагностики стану обладнання для своєчасного виявлення та попередження відмов.

Важливим аспектом вибору раціональної схеми є визначення оптимальних об'ємів приймальних зумпфів. На основі надійнісних властивостей ділянок гідротранспортної системи розраховуються об'єми проміжних зумпфів. При цьому необхідно враховувати безперервну зміну витрати, що розвивається ґрунтовими насосами, обумовлену зносом останніх, нестабільністю параметрів транспортованої гідросуміші тощо.

Оптимальний об'єм проміжної ємності може бути визначений на основі аналізу балансу потоків гідросуміші, що надходить у ємність та відкачується з неї. Нехай $Q_1(t)$ і $Q_2(t)$ - випадкові процеси, що описують витрати гідросуміші на вході та виході ємності відповідно. Тоді зміна об'єму гідросуміші в ємності $V(t)$ описується стохастичним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q^1(t) - Q^2(t). \quad (10)$$

Оптимальний об'єм ємності V_{opt} повинен забезпечувати заданий рівень надійності функціонування системи при мінімальних витратах на спорудження та експлуатацію ємності:

$$V_{\text{opt}} = \arg \min \{C(V) : P(\text{переливу або осушення}) \leq \varepsilon\}, \quad (11)$$

де $C(V)$ - функція вартості ємності, залежна від її об'єму, ε - допустима ймовірність аварійної ситуації (переливу або осушення ємності).

Практичне значення досліджень надійності гідротранспортних систем полягає в розробці методик, що підвищують ефективність їх проектування та експлуатації. Це охоплює обґрунтування термінів ремонту, параметрів трубопроводів, потреб у запасних деталях, розміщення насосів і об'ємів ємностей.

На основі результатів сформовано наступні рекомендації:

- визначення оптимальних інтервалів ремонтно-профілактичних робіт для зниження витрат при збереженні надійності.
- розрахунок мінімально допустимої товщини стінок труб з урахуванням гідроабразивного зносу.
- визначення необхідного запасу деталей насосів для безперебійної роботи.
- оптимальне розміщення насосів з урахуванням коливань напору.
- розрахунок об'ємів приймальних ємностей для роботи при нестабільних потоках.

Для обґрунтованого вибору раціональної структури гідротранспортної системи важливо враховувати не лише гідравлічні та енергетичні характеристики, а й надійнісні показники. Різні варіанти побудови систем – з резервуванням, використанням проміжних зумпфів або багатоступеневою подачею – суттєво відрізняються за ефективністю, тривалістю безвідмовної роботи та здатністю до швидкого відновлення після відмов. У таблиці 1 наведено порівняння основних показників надійності для типових схем гідротранспортних систем.

Аналіз даних свідчить, що найвищі значення коефіцієнта готовності та технічного використання спостерігаються в одноступеневій схемі з ненавантаженим резервом. Проте її застосування може бути обмеженим через конструктивні або економічні чинники. Водночас триступенева система з проміжними зумпфами забезпечує високий рівень надійності за умов значної довжини траси транспортування. Економічна доцільність схем із резервуванням та зумпфами обумовлена зменшенням втрат від простоїв, що компенсує зростання капітальних та експлуатаційних витрат. Таким чином, вибір конфігурації гідротранспортної системи має базуватись на системному аналізі сукупності техніко-економічних показників з урахуванням особливостей експлуатаційного середовища.

Порівняння показників надійності схем гідротранспортних систем

Схема гідротранспортної системи	Коеф. готовності	Середнє напр. на відмову, год	Середній час відновлення, год	Коефіцієнт техн. використання
Одноступенева без резервування	0.82	180	39.5	0.80
Одноступенева з навантаженим резервом (1+1)	0.94	420	26.8	0.92
Одноступенева з не навантаженим резервом (1+1)	0.96	450	18.7	0.94
Двоступенева без проміжного зумпфа	0.76	150	47.3	0.72
Двоступенева з проміжним зумпфом	0.88	380	51.8	0.86
Триступенева з двома проміжними зумпфами	0.92	410	35.6	0.89

Висновки. Гідротранспортні системи є критично важливою складовою промислової інфраструктури, що забезпечує транспортування великих обсягів матеріалів. Підвищення їх надійності досягається через оптимізацію схем транспортування з урахуванням стохастичних процесів гідроабразивного зношування та варіативності режимів роботи системи.

Розроблені математичні моделі для оцінки надійності трубопроводів та насосів дозволяють обґрунтовано вибирати найбільш ефективні конфігурації систем. Аналіз показників надійності свідчить, що схеми з резервуванням обладнання та проміжними ємностями забезпечують високий рівень надійності, попри підвищені капітальні та експлуатаційні витрати, завдяки зниженню ризиків від простоїв. Оптимізація технічного обслуговування шляхом комбінування планово-попереджувальних робіт і обслуговування за технічним станом дозволяє мінімізувати експлуатаційні витрати. Реалізація результатів досліджень на промислових об'єктах демонструє значний економічний ефект, підтверджуючи необхідність подальшого розвитку наукових досліджень у цій галузі.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Основи корозійно-механічної тріщиностійкості трубопроводів : моногр. / В.Д. Макаренко, Ю.Л. Винников, О.Е. Чигиринець [та ін.]. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2024. – 124 с.
2. He, Z., & Wang, H. Predicting Future Deterioration of Hydraulic Steel Structures with Markov Chain and Multivariate Samples of Statistical Distributions // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – Article ID 360532. – DOI: 10.1155/2014/360532.
3. Liu, Q., Zhang, Y., & Zhou, L. Hydraulic System Reliability Analysis of Slurry Transportation Based on Stochastic Failure Petri Net // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 644–650. – P. 832–836. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.832.
4. Панченко В. О. Спеціальні гідромашини : навч. посіб. / В. О. Панченко. – Суми : СумДУ, 2020. – 186 с.
5. Котило О. В., Малигін Б. В., Шкільнюк А. О. Зменшення гідроабразивного зносу напірних сталевих пульпопроводів за рахунок магнітно-імпульсної обробки // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 116–120.
6. Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. Гідравлічний транспорт (монографія). – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, «Редакція гірничої енциклопедії», 2009. – 436 с.

Received 16.06.2025.
Accepted 20.06.2025.

***Optimization of hydrotransport system parameters taking
into account reliability criteria***

The article explores the problem of improving the reliability and efficiency of hydrotransport systems, which play a crucial role in many industrial processes involving the movement of large volumes of solid-liquid mixtures. These systems operate under complex conditions, being exposed to intensive hydroabrasive wear and variable loads. Recent studies highlight the need to move beyond traditional deterministic models that estimate average wear, as they fail to capture the stochastic nature of degradation under real operating conditions. Instead, probabilistic models based on the theory of stochastic processes and Markov chains have proven effective in predicting the reliability and remaining service life of pipelines and slurry pumps.

The aim of the study is to enhance the operational reliability of hydrotransport systems by developing mathematical and optimization models that consider the randomness of wear and performance parameters. Particular attention is given to selecting rational configurations of pump stations and determining system layouts that minimize risks of failure. The methodology integrates monitoring of hydraulic parameters, statistical analysis of wear data, and modeling of component failures.

The research results demonstrate that modeling hydroabrasive wear as a stochastic process with independent increments enables more accurate prediction of service life and failure probability. The paper presents analytical expressions for key reliability indicators and illustrates how different system configurations—single-stage, multi-stage, with or without redundancy—impact overall system availability. Optimization techniques, including nonlinear programming and simulation, are applied to determine ideal pump placement and

sump volume. The proposed approach offers practical recommendations for maintenance scheduling, spare part management, and cost-effective system design. It is concluded that accounting for stochastic factors significantly enhances system resilience and economic performance in long-term operation.

Кобзар Валентин Ігорович – аспірант кафедри гірничих машин і обладнання, Криворізький національний університет

Кривенко Олексій Юрійович – к.т.н., доцент кафедри гірничих машин і обладнання, Криворізький національний університет

Пікільняк Андрій Валерійович – к.т.н., доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет

Valentyn Kobzar – Postgraduate Student of the Department of Mining Machinery and Equipment, Kryvyi Rih National University.

Oleksii Kryvenko – Ph.D., Associate Professor of the Department of Mining Machinery and Equipment, Kryvyi Rih National University.

Andrii Pikilniak – Ph.D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kryvyi Rih National University.