

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ГІДРОЦИЛІНДРІВ

Анотація. У статті проведено комплексний аналіз основних напрямків підвищення експлуатаційної надійності гідроциліндрів, які є ключовими елементами гідросистем гірничо-металургійного обладнання. В умовах інтенсивної експлуатації в агресивному середовищі, що характеризується високим тиском, значними вібраціями та наявністю абразивного пилю, гідроциліндри зазнають підвищеного навантаження, що призводить до зростання частоти відмов. Найвразливішими в конструкції є ущільнювальні елементи, які піддаються швидкому зношенню та деградації через вплив температури, тиску й агресивних середовищ. Метою дослідження є ідентифікація критичних чинників, які впливають на ресурс і надійність гідроциліндрів, а також розробка обґрунтованих заходів для оптимізації їх роботи. Для цього застосовано методи статистичного аналізу відмов, нормованого розподілу ресурсу ущільнень і математичного моделювання напрацювання на відмову. У роботі запропоновано низку технічних рішень, серед яких удосконалення матеріалів і конструкції ущільнювальних елементів, впровадження уніфікованих конструктивних рішень, а також застосування шпилькових з'єднань, що суттєво знижують трудомісткість і час ремонту. Втілення цих заходів спрямоване на підвищення надійності гідроциліндрів і забезпечення стабільної, безперебійної роботи гідросистем у складних виробничих умовах. Особливу увагу в дослідженні приділено перспективам впровадження цифрових технологій моніторингу технічного стану та прогнозного аналізу ресурсу, що відкриває можливості для переходу до інтелектуального обслуговування гідравлічного обладнання.

Ключові слова: гідроциліндр, цифрова модель, ущільнення, знос, прогнозування ресурсу, уніфікація, технологічність, стандартизація, ремонт, прогнозне обслуговування.

Постановка проблеми. На сьогодні впровадження автоматичного керування комплексами гірничо-металургійного обладнання вимагає подальшого розвитку методів розрахунку виробничого обладнання і його приводів.

Питання вивчення надійності гідроциліндрів — надзвичайно важливий аспект у проектуванні промислових машин, особливо в гірничо-металургійній промисловості. Питання надійності гідроциліндрів в Україні активно досліджували вчені А.М. Підгорний, В.К. Зарубін, В.О. Марутов та Ю.М. Кузнецов, зосереджуючись на конструкціях, матеріалах і діагностиці. У світі ця проблема теж інтенсивно вивчається в університетах (Німеччина, США, Японія) та, особливо, у науково-дослідних підрозділах великих

промислових гігантів, таких як Parker Hannifin, Bosch Rexroth, Caterpillar. Ці компанії інвестують у передові матеріали, "розумні" технології та тестування, забезпечуючи глобальне лідерство в надійності гідравлічних систем.

Важливим є також питання збору точних статистичних даних, щодо частки відмов гідроциліндрів у загальній кількості відмов промислової техніки гірничо-металургійного комплексу України, проте, згідно з дослідженнями та практикою в галузі, гідроциліндри є критичними компонентами гідросистем, і їх відмови можуть суттєво впливати на працездатність обладнання. У гірничо – металургійній промисловості, де гідроциліндри використовуються в екстремальних умовах (високий тиск, пил, вібрація) частка відмов може бути більшою ніж 30%. **Основні причини відмов гідроциліндрів:** зношування ущільнень та штоків, корозія внутрішніх поверхонь, гідродари та перевантаження, недостатнє технічне обслуговування [1]:

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надійність гідроциліндрів як ключових елементів гідросистем гірничих машин визначає загальну надійність приводу та довговічність обладнання. На відміну від стандартизованих насосів і розподільної апаратури, гідроциліндри зазвичай розробляються індивідуально для конкретних машин на відповідних виробничих підприємствах [2]. Їх надійність має оцінюватися на всіх етапах — від проєктування до експлуатації, що критично важливо для забезпечення якості гідросистем і машин загалом [3]. Це питання є особливо актуальним для технічного розвитку гірничого обладнання Криворізького регіону.

Одним із визначальних чинників якості гідроциліндрів є технологічність, яка охоплює конструктивно-технологічні властивості, що мінімізують витрати на підготовку виробництва. Відповідно до державного стандарту, така підготовка включає інформаційне, математичне й технічне забезпечення. При аналізі виробничих умов було доведено, що найбільш повно технологічність в виробничих умовах відображається кількісною системою показників. Основним недоліком кількісної оцінки технологічності конструкції деталей є велика трудомісткість робіт з визначення чисельних показників технологічності. Кількісна оцінка передбачає співставлення з показниками, які дане підприємство обрало як базові. Тож серед основних факторів, що впливають на оціночні показники є обсяг виконуваних робіт, обладнання, верстатне та інструментальне оснащення, сертифікований рівень якості випускаємої продукції, рівень автоматизації технологічної підготовки та самого виробництва, тощо.

При оцінці технічного рівня та якості гідроциліндрів, наприклад, використовуються такі основні показники якості: показник призначення K_n , що характеризує ступінь відповідності гідроциліндра його цільовому призначенню, конструктивне виконання та основні параметри; показник надійності та довговічності K_d , що характеризує властивості надійності гідроциліндрів у конкретних умовах їх використання; показник технологічності K_t , що характеризує ефективність конструктивно-технологічних рішень для забезпечення високої продуктивності праці при виготовленні та ремонті; естетичні показники K_{es} , що характеризують такі властивості виробу, як виразність, оригінальність, гармонійність, цілісність, відповідність стилю та ін.; показники стандартизації та уніфікації K_u , що характеризують ступінь використання стандартизованих

елементів та рівень уніфікації складових частин гідроциліндра; патентно-правові показники Кп, що характеризують ступінь патентного захисту в Україні та за кордоном, а також його патентну чистоту; економічні показники Ке, що відображають витрати на розробку, виготовлення та експлуатацію гідроциліндрів, а також економічну ефективність експлуатації [4].

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз основних факторів, що впливають на надійність гідроциліндрів, визначення напрямків удосконалення їх конструктивно-технологічних характеристик, а також обґрунтування можливостей застосування інформаційних технологій для моніторингу, прогнозування ресурсу та оптимізації експлуатаційних процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Одиничні показники призначення гідроциліндра Ко – це такі як: діаметр активної площі D ; робочий тиск p ; максимальне робоче зусилля $T = pD$; маса G ; довжина L_0 ; максимальний габарит у поперечному перерізі D_{\max} ; загальна довжина напрямних H .

Враховуючи те, що підприємства і фірми - основні виробники гідроциліндрів в Україні, такі як, Гідросила ТЕТІС (Кропивницький), ТОВ «ТД Контакт» (Вінниця), НАК (Львів), Hydrocylinder.com.ua, Дрогобицький завод автомобільних кранів (ДЗАК), випускають гідроциліндри з різноманітними параметрами, зручно використовувати відносні одиничні показники призначення:

$$K_{o1} = T/G_0; \quad K_{o2} = T/L_0; \quad K_{o3} = T/D_{\max}, \quad (1)$$

де G_0 -маса гідроциліндру при ході рівному нулю; L_0 -довжина гідроциліндру при ході рівному нулю.

Узагальнений показник призначення може бути визначений з відношення:

$$K_n = 1/n(m_1 K_{n1} + m_2 K_{n2} + m_3 K_{n3}), \quad (2)$$

де n – кількість одиничних показників; m – вагомість одиничного показника.

Аналіз показує, що відносні показники призначення мають тенденції до росту по мірі росту діаметрів гідроциліндрів. Це цілком закономірно, так як для стандартного ряду діаметрів: 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160 ; 200; 250; 320; 400 та інші – $\phi = 1,56$, а для ряду тисків – $\phi = 1,25$. Таким чином і одиничні показники і узагальнені показники по мірі росту діаметру гідроциліндрів повинні збільшуватись зі знаменником прогресії, що дорівнює $\phi = 1,25$, що майже витримується для всіх типів гідроциліндрів. Це дозволяє зробити висновок про те, що при оцінці якості, розрахунках показників якості, прогнозуванні показників якості та виборі базових показників, можна порівнювати показники різних типів гідроциліндрів, але тільки одного діаметра. Основні одиничні показники надійності гідроциліндрів такі: довговічність, середнє напрацювання на відмову, термін служби до капітального ремонту, термін служби до списання, середнє відновлення, середня трудомісткість ремонту. Середнє напрацювання гідроциліндра на відмову здебільшого залежить від довговічності його найбільш зношуваних елементів – ущільнень штока та поршня. Ці компоненти зазнають інтенсивного механічного,

гідрравлічного та температурного навантаження, і саме їх зношення найчастіше є причиною виходу гідроциліндра з ладу.

Середнє напрацювання на відмову (Mean Time To Failure, МТТФ) може визначатися експериментально або статистично за формулою [5]:

$$MTTF = \sum T_i / n, \quad (3)$$

де T_i – час (напрацювання), після якого вийшов з ладу i -й гідроциліндр; n – кількість досліджених зразків.

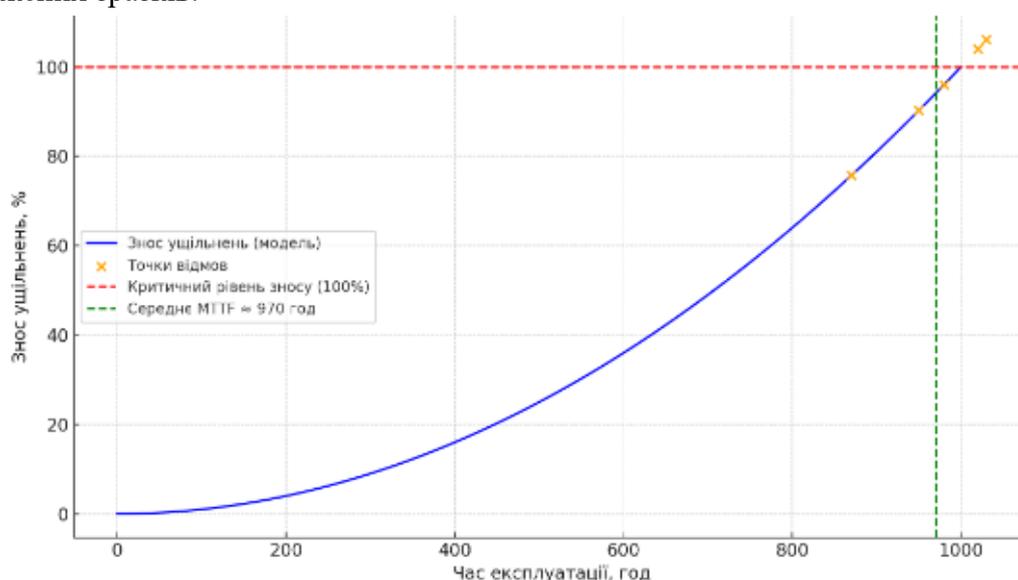


Рисунок 1 – Зростання зносу ущільнень гідроциліндра у часі з точками відмов

Як видно, знос відбувається поступово на початку, а ближче до кінця ресурсу (приблизно після 700 - 800 годин) починає різко прискорюватися – це типова поведінка ущільнень у реальних умовах експлуатації. Цей графік добре ілюструє, як реальні відмови збігаються з прогнозованим зносом ущільнень. Основні чинники, що впливають на довговічність ущільнень: якість матеріалів ущільнень (тип гуми, поліуретан, фторопласт тощо); температурні умови експлуатації; тиск у гідросистемі; якість обробки поверхонь штока та циліндра; чистота робочої рідини (наявність абразивних домішок прискорює знос); режим навантаження (частота циклів, амплітуда переміщення штока).

Таким чином, для прогнозування ресурсу гідроциліндра зазвичай розглядають довговічність ущільнень як критичний параметр, а середнє напрацювання визначають шляхом випробувань або на основі експлуатаційної статистики. ТУ 38 1051725-86, обумовлює ресурс ущільнень сумарним шляхом ковзання в середньому до 100 км, проте режим роботи гідроциліндра якість манжет, якість поверхонь тертя, чистоти рідини, температура і багато інших факторів дають такий розкид статистичних даних по середньому напрацюванню на відмову, що порівнювати їх поки що важко.

У практиці часто припускають, що напрацювання на відмову ущільнень має приблизно **нормальний розподіл**, де: **середнє значення (μ)** – середній ресурс (наприклад, 970 год); **стандартне відхилення (σ)** – міра розкиду, зазвичай 10–25% від середнього значення (Рисунок 2). **Зелена пунктирна лінія** показує середнє напрацювання до від-

мови – **970 годин**; **блакитна зона** охоплює діапазон ± 1 стандартне відхилення (**150 год**), де зосереджено **близько 68% усіх відмов** (від 820 до 1120 год).

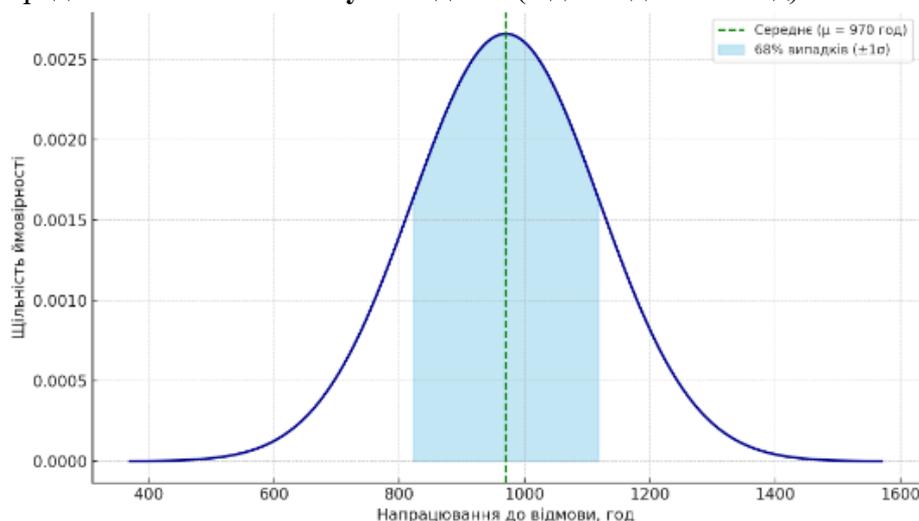


Рисунок 2 – Розподіл нормального розподілу ймовірності відмов ущільнень гідроциліндра

Розкид може становити ± 200 – 500 годин або більше, залежно від якості ущільнень та умов роботи. Надійний прогноз ресурсу можливий тільки за умов проведення статистичних випробувань в умовах, наближених до експлуатаційних. За результатами аналізу відмов при експлуатації гідроприводів різних типів встановлено, що понад 90 % з них часткові і лише близько 10 % – повні, близько 60 % – параметричні і 40 % – функціональні. При цьому до параметричних відмов віднесені випадки виникнення витоків рідини, а до функціональних – прояв нестійкості і випадки пошкодження механічних елементів, які ще не призвели до втрати їх функціонування.

Порівняльний аналіз різних видів відмов показав, що частки раптових і поступових відмов приблизно рівні. Більша частина відмов обумовлена зовнішньою негерметичністю, решта – невідповідністю параметрів встановленим рівням, відсутністю функціонування агрегату або його елементів, порушенням динамічної стійкості, внутрішніми витокami, пошкодженнями фільтрів та ін.[6]

Термін служби гідроциліндра до капітального ремонту залежить від матеріалів пар тертя, від якості покриттів штока і гільзи, а також від способу установки і закріплення гідроциліндра на машині. У гідроциліндрах гірничих машин цей показник майже однаковий для різного конструктивного виконання та в середньому дорівнює 6-7 рокам. Термін служби до списання збігається з терміном експлуатації гірничого обладнання до утилізації.

Середній час відновлення відмови на гідроциліндрі багато в чому залежить від конструкції і, зокрема, від способу з'єднання кришок з корпусом, а також конструкції зовнішнього приєднувального елемента штока. Середня трудомісткість ремонту гідроциліндра залежить, в основному від трудомісткості відновлення корпусу, так як інші деталі для гідроциліндрів різної конструкції майже однакові. Показники якості за тех-

нологічністю характеризують витрати на виробництво гідроциліндра. Основні одиничні показники технологічності гідроциліндра - це трудомісткість і матеріаломісткість, точність розмірів, рівень уніфікації деталей. Найбільшу трудомісткість і в гідроциліндрі має корпус. Таким чином, технологічність гідроциліндру можна оцінити по технологічності його корпусу. З конструкцій, що порівнювались кращий показник технологічності має корпус гідроциліндру на шпильках. Необхідно відмітити, що ця конструкція найбільш технологічна не тільки в виготовленні, але й в складанні. До показників стандартизації і уніфікації необхідно віднести показник уніфікації деталей:

$$K_{y1} = D_y/D, \quad (4)$$

де D_y – кількість уніфікованих деталей в гідроциліндрі; D – загальна кількість деталей.

Показник уніфікації конструктивних елементів:

$$K_{y2} = Q_y/Q, \quad (5)$$

де Q_y – число уніфікованих типорозмірів; Q – загальне число типорозмірів конструктивних елементів.

Показник стандартизації деталей:

$$K_{y3} = E_{ст}/E, \quad (6)$$

де $E_{ст}$ – число стандартних деталей; E – загальне число деталей.

Аналіз конструкцій гідроциліндрів, що порівнювались, показав, що K_{y2} та K_{y3} у них майже однаковий, а показник K_{y1} у гідроциліндрів на шпильках в два рази вище в порівнянні з іншими конструкціями за рахунок того, що у нього передня і задня голівки уніфіковані і всі десять варіантів кріплення гідроциліндра до машини здійснюються з використанням уніфікованих голівок. Естетичні показники гідроциліндра характеризуються цілісністю композиції, функціональною доцільністю форми, інформаційною виразністю, сучасним стилем, товарним виглядом. До патентно-правових показників гідроциліндрів відносяться показник патентного захисту, показник патентної чистоти, показник кількості вітчизняних винаходів, реалізованих в конструкції. Важливим показником якості є економічний показник (собівартість, відпускна ціна). Однак, враховуючи той факт, що порівнювані гідроциліндри виробляються на заводах з різними виробничими можливостями їх фактичні економічні показники важко порівняти. У цьому випадку можна стверджувати лише те, що кращими економічними показниками повинні мати найбільш технологічні гідроциліндри. Узагальнений показник якості гідроциліндру визначається з виразу:

$$K = 1/7(m_1K_n + m_2K_d + m_3K_t + m_4K_y + m_5K_{ec} + m_6K_p + m_7K_e), \quad (7)$$

де m – відповідний коефіцієнт вагомості окремого показника.

Найбільш недовговічними елементами гідроциліндру є ущільнення штока і поршня, шток, напрямна штоку, корпус і поршень. Одночасно з підвищенням показників надійності і геометричних параметрів гідроциліндрів, які впливають на компоновку всіх вузлів машин її габарити і масу, необхідно поліпшувати технологічний і економічний показник якості, тобто вдосконалення конструкції елементів гідроциліндра. Одночасно з підвищенням показників надійності та геометричних параметрів необхідно покращу-

вати технологічний та економічний показник якості, а це означає удосконалити конструкцію елементів гідроциліндра. Аналіз одиничних показників якості дозволяє визначити основні напрямки підвищення якості гідроциліндрів різноманітних гірничих машин. Показники призначення можуть бути поліпшені за рахунок підвищення робочого тиску в гідроциліндрах, зменшення маси, довжини при ході $S=0$, зменшення зовнішніх діаметрів. Аналіз показників гідроциліндрів показує, що за конструктивною якістю вітчизняні моделі не поступаються найкращим зарубіжним. Особливу увагу слід приділити надійності [7]. Низьке середнє напрацювання на відмову у гідроциліндрів з еластичним ущільненням пов'язане з швидким зносом ущільнень штока і поршня. Основні напрямки підвищення довговічності: застосування протекторних ущільнень, удосконалення брудознімача, сучасні фільтри для очищення рідини, покращення покриттів штока і гільзи, алмазне виглажування штоків і гільз. Інші показники надійності такі як: строк служби до капітального ремонту; строк служби до списання; середній час відновлення і середня трудомісткість ремонту – задовільні, однак вони можуть бути поліпшені шляхом підвищення якості матеріалів та пар тертя, поліпшення антикорозійних і зносостійких покриттів, використання в шарнірних з'єднаннях швидкоз'ємних проушин і втулок, поліпшення технологічності ремонту трудомістких деталей і вузлів.

Визначений резерв мають гідроциліндри гірничих машин і в питанні зниження трудомісткості ремонту. Доводку внутрішньої поверхні гільз слід виконувати на спеціальних верстатах; слід відмовитись від трудомісткого бронзування поршнів і втулок, а в тих випадках, коли чавун не задовольняє показнику надійності – використовувати покриття поліамідами; слід ширше застосовувати гідроциліндри на шпильках. У питанні підвищення якості гідроциліндрів велике значення має уніфікація та стандартизація. При проектуванні гідроциліндрів слід максимально використовувати повторно одні й ті ж елементи (наприклад, кришки штокової та поршневої порожнини) і створювати на базі вихідної моделі похідні гідроциліндри за кріпленням. Для цього застосовують методи секціонування, базового агрегату, конвертування, компаундування, модифікації, зміни розмірів і агрегування. Особливу увагу приділяють уніфікації розмірів приєднувальних елементів [8].

Сучасні підходи до підвищення експлуатаційної надійності гідроциліндрів дедалі частіше інтегрують цифрові інструменти — від моніторингу технічного стану до автоматизованого планування ремонту. Одним із перспективних напрямків є застосування систем технічного діагностування на базі сенсорних платформ, які збирають дані про тиск, температуру, вібрації, циклічність навантаження в режимі реального часу. Ці дані передаються у цифрові двійники гідроциліндрів — віртуальні моделі, що відображають фізичний стан компонента з урахуванням накопиченого зносу, впливу робочих умов та статистики відмов [10]. Для обробки таких даних використовуються системи машинного навчання і нейронні мережі, які здатні виявляти приховані закономірності між режимами роботи та ймовірністю виходу з ладу. На основі цього будується прогностична аналітика — математичне прогнозування залишкового ресурсу ущільнень і вузлів гідроциліндра (наприклад з використанням алгоритмів регресії та класифікації).

Інтеграція таких систем в корпоративні PLM/ERP-платформи дозволяє реалізувати концепцію Predictive Maintenance (прогнозного обслуговування), що забезпечує мінімізацію незапланованих простоїв, оптимізацію витрат на ремонтта відкриває можливість централізованого управління життєвим циклом гідроциліндрів на рівні підприємства. Окрім того, застосування CAD/CAE-програмного забезпечення (SolidWorks Simulation, ANSYS, Altair) сприяє створенню більш надійних конструкцій за рахунок попереднього моделювання навантажень і виявлення слабких місць, де може відбутися прискорений знос. Системи управління даними про виріб (PDM) підтримують актуальну документацію й історію обслуговування гідроциліндрів, що особливо важливо для гірничо-металургійної техніки в екстремальних умовах. Таким чином, поєднання механіки і цифрових технологій дозволяє не лише підвищити надійність гідроциліндрів, а й перейти до принципово нової моделі їх експлуатації — інтелектуальної, прогнозованої та економічно ефективної.

Висновки. Для стаціонарного обладнання доцільні гідроциліндри з призматичними головками та шпильковим з'єднанням, що спрощує уніфікацію й обслуговування. У мобільній техніці (екскаватори, самоскиди, бурові установки) використовують циліндричні головки — менш технологічні, але естетичніші й ергономічніші. При створенні уніфікованих рядів застосовують секціонування, базове агрегування, конвертування, компаундування, модифікацію геометрії та агрегатування. Особливу увагу приділяють стандартизації приєднувальних елементів для взаємозамінності, скорочення номенклатури та зниження витрат. Сучасні цифрові технології, інтегровані з механічним проєктуванням і управлінням, відкривають нові можливості для підвищення надійності гідроциліндрів через інтелектуальний моніторинг, прогнозне обслуговування та оптимізацію їх життєвого циклу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин : підручник. Київ : Либідь, 2003. 424 с.
2. Цивінда Н. І., Пікільняк А. В., Зуєв І. О., Журавель А. Г. Застосування математичних моделей кількісної оцінки конструктивно-технологічних ознак гідроциліндрів гірничих машин // Розвиток промисловості та суспільства : зб. наук. пр. міжнар. наук.-техн. конф., 22–24 травня 2024 р., Кривий Ріг. Кривий Ріг : КНУ, 2024. С. 171.
3. Пашинський О. М., Новицький А. В. Особливості конструкцій та експлуатаційної надійності гідроциліндрів // Вісник студентів факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України : зб. наук. пр. Вип. 10. Київ, 2022. С. 48–51.– 51.
4. Цивінда Н. І., Пікільняк А. В., Зуєв І. О. Основні напрямки зниження трудоємності ремонту гідроциліндрів // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф., 23–24 травня 2024 р., Чернігів. Том 1. С. 149–151.
5. Zhu, M., Zhao, J., & Wang, Q. (2017). Reliability evaluation of key hydraulic components for actuators of FAST based on small sample test. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18, 1561–1566. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0185-2>

6. Liu, Y., Qian, L., Zou, J., Xia, C., & Lian, Z. (2022). Study on failure mechanism and sealing performance optimization of compression packer. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106176. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106176>
7. Link, R. E., Tan, A. C. H., Chua, P. S. K., & Lim, G. H. (2000). Condition monitoring of a water hydraulic cylinder by vibration analysis. *Journal of Testing and Evaluation*, 28. <https://doi.org/10.1520/JTE12142J>
8. Mahankar, P. S., & Dhoble, A. S. (2021). Review of hydraulic seal failures due to effect of medium to high temperature. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105552. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105552>
9. Надійність та експлуатація гідромашин і гідроприводів : навчальний посібник / В. Ф. Герман, В. О. Панченко, О. Г. Гусак, А. А. Папченко. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 175 с
10. Maheshwari, U., Jayasutha, D., Nair, I., Senthilraja, R., & Thanappan, S. (2024). Development of digital twin technology in hydraulics based on simulating and enhancing system performance. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, 13, 50–65. <https://doi.org/10.54216/JCIM.130204>

REFERENCES

1. Kanarchuk V. Ye., Polianskyi S. K., Dmytriiev M. M. *Nadiinist mashyn : pidruch-nyk*. Kyiv : Lybid, 2003. 424 s.
2. Tsyvinda N. I., Pikilniak A. V., Zuiev I. O., Zhuravel A. H. Zastosuvannia matematichnykh modelei kilkisnoi otsinky konstruktyvno-tekhnologichnykh oznak hidrotsy-lindriv hirnychych mashyn // *Rozvytok promyslovosti ta suspilstva : zb. nauk. pr. mizhnar. nauk.-tekhn. konf.*, 22–24 travnia 2024 r., Kryvyi Rih. Kryvyi Rih : KNU, 2024. S. 171.
3. Pashchynskyi O. M., Novytskyi A. V. Osoblyvosti konstruktsii ta ekspluata-tsiinoi nadiinosti hidrotsylindriv // *Visnyk studentiv fakultetu konstruiuvannia ta dyzainu Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy : zb. nauk. pr. Vyp. 10*. Kyiv, 2022. S. 48–51.– 51.
4. Tsyvinda N. I., Pikilniak A. V., Zuiev I. O. Osnovni napriamky znyzhennia trudoiem-nosti remontu hidrotsylindriv // *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system : materialy KhII Mizhnar. nauk.-prakt. konf.*, 23–24 travnia 2024 r., Chernihiv. Tom 1. S. 149–151
5. Zhu, M., Zhao, J., & Wang, Q. (2017). Reliability evaluation of key hydraulic components for actuators of FAST based on small sample test. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18, 1561–1566. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0185-2>
6. Liu, Y., Qian, L., Zou, J., Xia, C., & Lian, Z. (2022). Study on failure mechanism and sealing performance optimization of compression packer. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106176. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106176>
7. Link, R. E., Tan, A. C. H., Chua, P. S. K., & Lim, G. H. (2000). Condition monitoring of a water hydraulic cylinder by vibration analysis. *Journal of Testing and Evaluation*, 28. <https://doi.org/10.1520/JTE12142J>

8. Mahankar, P. S., & Dhoble, A. S. (2021). Review of hydraulic seal failures due to effect of medium to high temperature. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105552. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105552>
9. Nadiinist ta ekspluatatsiia hidromashyn i hidropryvodiv : navchalnyi posibnyk / V. F. Herman, V. O. Panchenko, O. H. Husak, A. A. Papchenko. – Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet, 2016. – 175 s
10. Maheshwari, U., Jayasutha, D., Nair, I., Senthilraja, R., & Thanappan, S. (2024). Development of digital twin technology in hydraulics based on simulating and enhancing system performance. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, 13, 50–65. <https://doi.org/10.54216/JCIM.130204>

Received 11.08.2025.
Accepted 13.08.2025.

Analysis of the main directions for improving the operational reliability of hydraulic cylinders

The article analyzes the key factors influencing the operational reliability of hydraulic cylinders, which are critical components in the hydraulic systems of mining and metallurgical machinery. The relevance of the study is due to the high share of failures in hydraulic actuators under extreme working conditions such as high pressure, dust, and vibrations. The paper emphasizes the importance of considering reliability indicators at all stages: design, manufacturing, and operation. The purpose of the research is to identify the causes of wear, assess quality indicators, and propose design improvements. Particular attention is given to the manufacturability of hydraulic cylinders, with a detailed analysis of structural indicators including reliability, functionality, and economic efficiency. Quantitative indicators for design assessment are proposed, based on technological characteristics and statistical analysis of failure rates.

The article describes the methodology for determining key reliability parameters, such as mean time to failure (MTTF), service life before overhaul, and labor intensity of repairs. It demonstrates that the critical parameter in most failures is the wear of seals, which is influenced by working pressure, material properties, surface treatment, and fluid purity. The analysis highlights the role of standardized and unified elements, and the advantages of modular and threaded construction in increasing serviceability and lowering costs. The conclusions summarize the recommended directions for improving hydraulic cylinder reliability, including the use of protector seals, improved materials and coatings, enhanced filter systems, and design modifications to simplify repairs and assembly. The study also emphasizes the importance of aesthetic and patent-related aspects for competitive product development. Particular attention is paid to the potential of implementing digital technologies for condition monitoring and predictive resource analysis, enabling a transition toward intelligent maintenance of hydraulic equipment.

Цивінда Наталія Іванівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-5100>

Пікільняк Андрій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0898-4756>

Зуєв Іван Олегович – провідний фахівець ТОВ «Метінвест бізнес сервіс», ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0561-5833>

Tsyvinda Nataliia – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Kryvyi Rih National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-5100>

Pikilniak Andrii – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Kryvyi Rih National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0898-4756>

Zyev Ivan – Senior Specialist at Metinvest Business Service LLC, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0561-5833>