e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

MATHEMATICAL MODELING OF THE TRIBOLOGICAL EFFICIENCY OF RESTORATION TECHNOLOGIES FOR PISTON-ASSEMBLY COMPONENTS OF AXIAL-PISTON HYDRAULIC MACHINES

P. Melyantsov[1*], O. Losikov[2], V. Sidorenko[2]

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
resource-limiting tribo-couplings,
high-velocity oxy-fuel spraying,
electric contact sintering,
wear rate,
entropy-based assessment

Article history:
Received 16.09.2026
Reviewed 28.09.2026
Approved 30.10.2026

[*]***Corresponding author:***
Melyantsov.Petr@gmail.com

ABSTRACT

Improving the efficiency of repairing axial-piston hydraulic machines requires a reasoned selection of restoration technologies for parts forming resource-limiting tribo-couplings. The study aims to develop a mathematical model for a comprehensive tribological efficiency evaluation of piston pair parts restoration technologies in axial-piston hydraulic machines based on a set of experimental characteristics. The object of the study was the "piston – block sleeve" coupling with a piston made of ShKh15SG steel and a sleeve made of LMtsSKA-58-2-2-1-1 brass. The evaluation utilized the maximum anti-scuffing load (stimulating indicator), minimum friction coefficient, and wear rate (destimulating indicators). Relative normalization against the best experimental value was applied to eliminate different dimensions and directions of the criteria. The informational weight of the criteria was determined using Shannon's entropy method. Based on the obtained weights, a dimensionless comprehensive tribological efficiency index was formed, characterizing the relative level of aggregate property improvement for the studied technological option. For the steel piston, applying high-velocity oxy-fuel spraying of tungsten carbide composite powder with a cobalt-chromium binder in an argon environment increased the maximum anti-scuffing load from 3,0 to 44,5 MPa, reduced the friction coefficient from 0,016 to 0,009, and the wear rate from 3,20 to $1,40 \cdot 10^{-12}$ *mm³ / (N·m). The comprehensive index for this option was 1,00000 compared to 0,50625 for the reference state. For the brass sleeve, electric contact sintering of a powder composition with boron combined with ultrasonic mandrel drawing increased the maximum load to 40,5 MPa, reduced the friction coefficient to 0,011, and the wear rate to* $1,7024 \cdot 10^{-12}$ *mm³ / (N·m); the comprehensive index was 1,00000 compared to 0,59771. The wear rate possessed the highest informational weight in both datasets. The proposed model can be used for quantitative comparison of restoration technologies and forming the informational basis of engineering decision support systems during the repair of axial-piston hydraulic machines.*

DOI: 10.36910/acm.vi52.2341

To cite this article:
Melyantsov, P., Losikov, O. & Sidorenko, V. (2026). Mathematical modeling of the tribological efficiency of restoration technologies for piston-assembly components of axial-piston hydraulic machines *Agricultural Machines*, *52*, 151-166. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2341

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 631.3-7:621.891:621.225.2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИБОТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПОРШНЕВОЇ ПАРИ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВИХ ГІДРОМАШИН

П. Т. Мельянцов[1*], О.М. Лосіков[2], В.К. Сидоренко[2]

[1] Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Україна
[2] Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
ресурсно-лімітуючі трибоспряження, високошвидкісне газополуменеве напилення, електроконтактне напікання, інтенсивність зношування, ентропійне оцінювання.

Історія публікації:
Отримано 16.09.2026
Прорецензовано 28.09.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

Автор для листування:*
Melyantsov.Petr@gmail.com

АНОТАЦІЯ

Підвищення ефективності ремонту аксіально-поршневих гідромашин потребує обґрунтованого вибору технологій відновлення деталей ресурсно-лімітуючих трибоспряжень. Метою дослідження було розроблення математичної моделі комплексного оцінювання триботехнічної ефективності технологій відновлення деталей поршневої пари аксіально-поршневих гідромашин за сукупністю експериментальних характеристик. Об'єктом дослідження було спряження «поршень – втулка блоку» з поршнем зі сталі ШХ15СГ та втулкою з латуні ЛМцСКА-58-2-2-1-1. Для оцінювання використано максимальне передзадирне навантаження (показник-стимулятор), мінімальний коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування (показники-дестимулятори). Для усунення різної розмірності та спрямованості критеріїв застосовано відносне нормування щодо найкращого експериментального значення. Інформаційну вагу критеріїв визначено за методом ентропії Шеннона. На основі отриманих ваг сформовано безрозмірний комплексний індекс триботехнічної ефективності, який характеризує відносний рівень сукупного покращення властивостей досліджуваного технологічного варіанта. Для сталевого поршня застосування високошвидкісного газополуменевого напилення композиційного порошку карбіду вольфраму з кобальтово-хромовою зв'язкою в середовищі аргону підвищило максимальне передзадирне навантаження з 31,0 до 44,5 МПа, зменшило коефіцієнт тертя з 0,016 до 0,009, а інтенсивність зношування – з 3,20 до $1,40\cdot10^{-12}$ *мм³ / (Н·м). Комплексний індекс для цього варіанта становив 1,00000 проти 0,50625 для еталона. Для латунної втулки електроконтактне напікання порошкової композиції з бором у поєднанні з ультразвуковим дорнуванням підвищило максимальне навантаження до 40,5 МПа, зменшило коефіцієнт тертя до 0,011 та інтенсивність зношування до* $1,7024\cdot10^{-12}$ *мм³ / (Н·м); комплексний індекс становив 1,00000 проти 0,59771. Найбільшу інформаційну вагу в обох масивах даних мала інтенсивність зношування. Запропонована модель може бути використана для кількісного порівняння технологій відновлення та формування інформаційної основи систем підтримки інженерних рішень під час ремонту аксіально-поршневих гідромашин.*

DOI: 10.36910/acm.vi52.2341

Цитувати цю статтю:
Мельянцов, П. Т., Лосіков, О.М. & Сидоренко, В.К. (2026). Математичне моделювання триботехнічної ефективності технологій відновлення деталей поршневої пари аксіально-поршневих гідромашин *Сільськогосподарські машини*, *52*, 151-166. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2341

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аксіально-поршневі гідромашини є відповідальними функціональними елементами гідростатичних трансмісій мобільних сільськогосподарських машин. Експлуатаційна ефективність таких агрегатів визначається не лише конструктивними параметрами, а й технічним станом прецизійних трибоспряжень, які впливають на внутрішні витоки, механічні втрати, об'ємний коефіцієнт корисної дії та загальний ресурс гідросистеми (*Paszota, 2012*). Сучасні дослідження підтверджують, що пара «поршень – циліндр» є однією з основних трибологічних пар аксіально-поршневого насоса, а її зношування безпосередньо пов'язане зі збільшенням витоків та деградацією експлуатаційних характеристик (*Lin et al., 2024; Yin et al., 2024*). Для підвищення точності прогнозних розрахунків технічного стану та надійності таких гідросистем також доцільно застосовувати методики моделювання складних гідромеханічних процесів у зазорах спряжень (*Tang et al., 2023*), у тому числі з урахуванням геометричної адаптації поверхонь до перекосу поршня (*Ernst et al., 2020*).

Функціонування деталей поршневого спряження пов'язане зі складними деструктивними процесами, які викликають знос контактних поверхонь. Зміна геометрії поверхонь спряження призводить до збільшення робочого зазору, зміни характеру контакту, підвищення механічних втрат і внутрішніх витоків. Аналіз сучасних досліджень трибології аксіально-поршневих насосів показує, що довговічність таких агрегатів значною мірою визначається властивостями ключових трибоспряжень, а підвищення їх зносостійкості пов'язують із удосконаленням конструкції, вибором матеріалів і застосуванням поверхневих технологій (*Wang et al., 2024*), а також комплексним аналізом гідродинамічних взаємодій на розподільних поверхнях (*Zecchi & Ivantysynova, 2012*).

Для поршневої пари характерним є складний відносний рух. Поршень одночасно здійснює зворотно-поступальний рух уздовж осі циліндра та бере участь у обертанні блока циліндрів. Перекидний момент сприяє виникненню перекосу поршня відносно осі втулки, що зумовлює нерівномірність контакту та локалізацію зношування. Математичне моделювання динаміки та зношування пари «поршень – циліндр» показує, що характер розподілу зношування є неоднорідним, а його розвиток може бути пов'язаний із погіршенням робочих характеристик гідромашини (*Lin et al., 2024*).

Експериментальні дослідження, виконані для гідромашин типу ГСТ-90/112, показали, що зношування деталей спряжень качаючого вузла є однією з причин втрати працездатності агрегатів. Для пари «поршень – втулка блоку» було встановлено суттєву зміну геометричних параметрів деталей у процесі експлуатації та ремонту (*Melyantsov, 2025; Melyantsov, 2026*), що вимагає обґрунтованої заміни контрольованих структурних параметрів для умов ремонтного виробництва. Отже, відновлення робочих поверхонь повинно забезпечувати не лише повернення номінальних геометричних розмірів, а й формування необхідних триботехнічних характеристик.

Одним із перспективних напрямів відновлення сталевих деталей є високошвидкісне газополуменеве напилення зносостійких композиційних покриттів на основі карбіду вольфраму. Сучасні дослідження підтверджують ефективність застосування покриттів типу WC-Co-Cr для суттєвого підвищення мікроструктурних властивостей та зносостійкості деталей машин (*Cui et al., 2022; Si et al., 2024; Yin et al., 2023; Zhao et al., 2024*). Більше того, такі покриття демонструють стабільні показники в умовах інтенсивних механічних та кавітаційно-ерозійних навантажень (*Hong et al., 2015*). Для інтегрального оцінювання таких технологій доцільно використовувати апарат теорії інформації (*Shannon, 1948*), зокрема ентропійні підходи багатокритеріального вибору інженерних рішень (*Dwivedi & Sharma, 2022; Sristi et al., 2024*).

У попередньому дослідженні для сталевого поршня було встановлено позитивний вплив високошвидкісного газополуменевого напилення (ВГН) порошку WC–10Co–3Cr у середовищі аргону з додатковим впливом імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП) та наступним прецизійним шліфуванням (*Melyantsov, 2026*). Максимальне передзадирне навантаження при цьому зросло до 44,5 МПа, а мінімальний коефіцієнт тертя зменшився до 0,009.

Для латунної втулки блоку застосування електроконтактного напікання порошкової композиції, легованої бором, із подальшою механічною обробкою та ультразвуковим дорнуванням (УЗД) дозволило сформувати відновлену робочу поверхню з покращеними триботехнічними характеристиками (*Melyantsov, 2025*). Проте оцінювання результативності таких технологій зазвичай

здійснюється за окремими показниками: несучою здатністю, коефіцієнтом тертя або інтенсивністю зношування. Це не дозволяє однозначно оцінити сукупну зміну властивостей поверхні.

У сучасних інженерних дослідженнях для подолання цієї проблеми використовують методи багатокритеріального оцінювання. Одним із підходів є метод інформаційної ентропії, який дає змогу визначати об'єктивні ваги критеріїв відповідно до ступеня їх диференціації у досліджуваному масиві даних. Ентропійне зважування застосовується, зокрема, у задачах вибору інженерних матеріалів і технологічних параметрів (*Kumar & Singh, 2023*). Теоретичною основою цього підходу є інформаційна ентропія Шеннона (*Shannon, 1948*).

Таким чином, існує потреба у математичному підході, який дозволив би перетворити сукупність різнорідних триботехнічних характеристик у єдиний безрозмірний показник, зберігаючи при цьому інформацію про внесок кожного критерію.

Метою дослідження є розроблення математичної моделі комплексного оцінювання триботехнічної ефективності технологій відновлення деталей поршневої пари аксіально-поршневих гідромашин на основі нормування експериментальних критеріїв та визначення їх інформаційних ваг методом ентропії Шеннона.

Для досягнення поставленої мети необхідно було: сформувати систему триботехнічних критеріїв; визначити спрямованість критеріїв як стимуляторів або дестимуляторів; виконати нормування експериментальних показників; визначити інформаційні ваги критеріїв; сформувати інтегральний індекс триботехнічної ефективності; виконати розрахунки для технологій відновлення поршня та втулки; визначити структурний внесок окремих критеріїв; оцінити можливість практичного застосування запропонованої моделі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Об'єктом дослідження було трибоспряження «поршень – втулка блоку» качаючого вузла аксіально-поршневих гідромашин, які широко застосовуються в гідравлічних трансмісіях мобільних машин сільськогосподарського призначення. Еталонну пару формували поршень зі сталі ШХ15СГ та втулка з латуні ЛМцСКА-58-2-2-1-1.

Для сталевого поршня досліджували три технологічні стани: еталонний стан; високошвидкісне газополуменеве напилення порошку WC–10Co–3Cr у середовищі аргону; високошвидкісне газополуменеве напилення WC–10Co–3Cr у середовищі аргону з додатковим впливом ІЕМП та подальшим прецизійним шліфуванням. Для латунної втулки розглядали: еталонний стан; електроконтактне напікання порошкової композиції, легованої бором; електроконтактне напікання порошкової композиції з бором із наступним УЗД.

Вихідні експериментальні дані для поршня та втулки були отримані в межах попередніх досліджень відповідних технологій відновлення (*Melyantsov, 2025; Melyantsov, 2026*). Оцінювання триботехнічної поведінки досліджуваних матеріалів здійснювали за кінематичною схемою «ролик — колодка». Експерименти проводили на універсальному випробувальному комплексі 2070 СМТ-1 в умовах граничного тертя, де як робоче мастильне середовище використовували гідравлічну оливу марки МГЕ-46В. Процедура тестування складалася з трьох послідовних стадій. На початковому етапі забезпечували припрацювання контактних поверхонь за питомого тиску $P = 0{,}1\ МПа$ та частоти обертання контртіла $n = 380\ хв^{-1}$. Наступна стадія передбачала покрокове навантаження рухомого спряження аж до моменту фіксації критичного передзадирного навантаження. Після цього виконували плавне розвантаження вузла з дискретністю 0,1 МПа задля визначення режимної точки, що відповідає мінімальним значенням коефіцієнта тертя.

Визначення кінетики довготривалого зношування реалізовували за сталої швидкості обертання $n = 380\ хв^{-1}$ за умов дії раніше встановленого оптимального тиску. Безперервний цикл зносних випробувань для кожного зразка становив 8 годин.

Для комплексного оцінювання використано три критерії: $P_{м.п}$ - максимальне передзадирне навантаження, МПа; $f_{\min}$ - мінімальний коефіцієнт тертя; I_w - інтенсивність зношування, $мм^3/(Н \cdot м)$

.

Максимальне передзадирне навантаження характеризує несучу здатність трибоспряження. Його збільшення відповідає покращенню властивостей, тому $P_{м.п}$ є критерієм-стимулятором.

Коефіцієнт тертя характеризує опір відносному переміщенню поверхонь. Його зменшення відповідає покращенню триботехнічного стану, тому $f_{\min}$ є критерієм-дестимулятором.

Інтенсивність зношування характеризує швидкість втрати матеріалу поверхнями тертя. Зменшення I_w відповідає підвищенню зносостійкості, тому цей критерій також є дестимулятором.

Сформована система критеріїв має вигляд: $P_{м.п} \to \max$; . $f_{\min} \to \min$; $I_w \to \min$.

Для порівняння використано експериментальні дані для сталевого поршня за наступними варіантами відновлення поршневої пари (*Melyantsov, 2026*): еталонна пара – серійний сталевий поршень; поршень, відновлений ВГН порошком WC–10Co–3Cr у середовищі Ar; поршень, відновлений ВГН порошком WC–10Co–3Cr у середовищі Ar з додатковим впливом ІЕМП.

Для латунної втулки досліджувались наступні експериментальні дані (*Melyantsov, 2025*): еталонна пара – серійна втулка блоку; втулка, відновлена електроконтактним напіканням порошку, легованого бором; втулка, відновлена електроконтактним напіканням порошку з бором і додатковим УЗД.

Вихідні експериментальні значення максимального передзадирного навантаження, мінімального коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування для досліджуваних технологічних станів наведено в **таблиці 1** та представлено графічно на (**рис. 1–3**).

Таблиця 1 – Експериментальні триботехнічні характеристики досліджуваних технологічних станів

Варіант	Технологіічний стан	$P_{м.п}$, МПа	$f_{\min}$	I_w, 10^{-12}, $мм^3/(Н{\cdot}м)$
Еталон	ШХ15СГ + ЛМцСКА-58-2-2-1-1	31,0	0,016	3,20
Т1	Поршень: ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar	38,0	0,012	1,80
Т2	Поршень: ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar + ІЕМП	44,5	0,009	1,40
В1	Втулка: електроконтактне напікання + В	37,8	0,013	2,10
В2	Втулка: електроконтактне напікання + В + УЗД	40,5	0,011	1,7024

Аналіз вихідних експериментальних параметрів (**таблиця 1**) свідчить, що реалізація запропонованих технологічних маршрутів відновлення супроводжується стійкою позитивною динамікою модифікації робочих поверхонь обох елементів спряження:

Графічно динаміку зміни максимального передзадирного навантаження для досліджуваних технологічних станів поршня і втулки представлено на **рис. 1**.

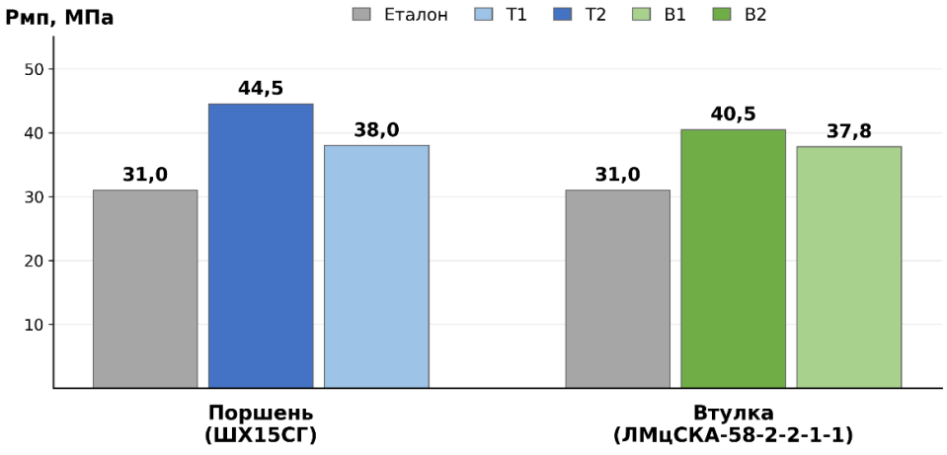


Рис. 1 – Максимальне передзадирне навантаження досліджуваних технологічних станів

Графічне подання результатів (**рис. 1)**, показує, що для сталевого поршня максимальне передзадирне навантаження $P_{м.п}$ зросло від базових 31,0 МПа до 38,0 МПа (на 22,6%) для варіанта Т1, а під комбінованим впливом ІЕМП (варіант Т2) досягло 44,5 МПа, що становить приріст на 43,5% порівняно з еталоном.

Для латунної втулки зафіксовано аналогічне підвищення критичного навантаження до 37,8 МПа варіант (В1) та 40,5 МПа для варіанту (В2), забезпечуючи підсумкове зростання несучої здатності на 30,6%. Це вказує на суттєве підвищення опору трибосистеми до схоплювання першого роду за умов дефіциту мастильного матеріалу.

Зміну мінімального коефіцієнта тертя для досліджуваних технологічних станів поршня і втулки наведено на **рис. 2**.

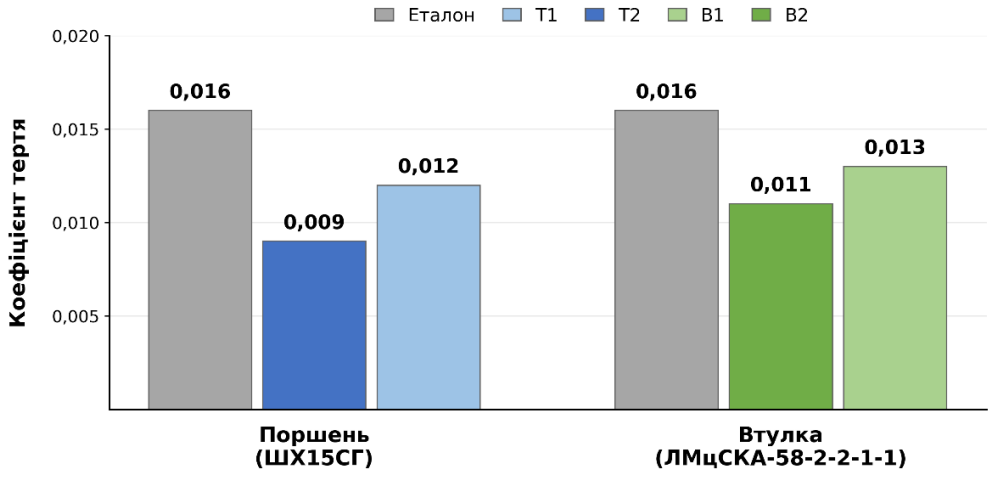


Рис. 2 – Мінімальний коефіцієнт тертя досліджуваних технологічних станів

Аналіз антифрикційних властивостей поверхонь (**рис. 2**) показав, що мінімальний коефіцієнт тертя $f_{\min}$ сталевого поршня знизився з 0,016 до 0,009 (на 43,8%) під дією високошвидкісного карбідного покриття та електромагнітного структурування.

Модифікація латунної втулки напіканням та ультразвуковим дорнуванням варіант (В2) зумовила зменшення коефіцієнта тертя до 0,011 (на 31,3%). Таке зниження фрикційного опору безпосередньо корелює зі зменшенням шорсткості та оптимізацією мікрогеометрії контакту.

Порівняння інтенсивності зношування для різних технологічних станів поршня і втулки наведено на **рис. 3.**

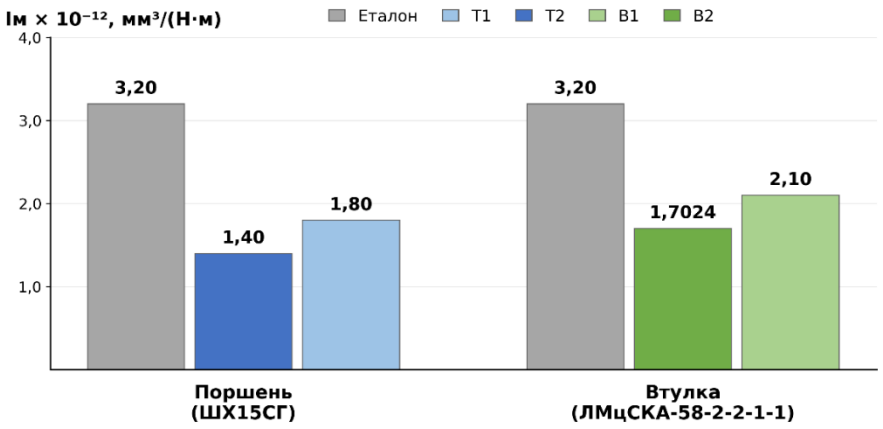


Рис. 3 – Інтенсивність зношування поршня і втулки при різних технологічних станах

Кінетика зношування (**рис. 3**) показала, що найбільш виражену динаміку продемонстрував показник інтенсивності зношування I_w. Для поршня інтенсивність зношування зменшилася з 3,20 до $1{,}80\cdot10^{-12}$ $мм^3/(Н\cdot м)$ після нанесення WC–10Co–3Cr та до $1{,}40\cdot10^{-12}$ $мм^3/(Н\cdot м)$ після додаткового застосування ІЕМП, тобто зносостійкість зросла у 2,28 раза (на 56,2%).

Для втулки, відновленої за варіантом (В2) інтенсивність зношування зменшилася до $1{,}7024\cdot10^{-12}$ $мм^3/(Н\cdot м)$ (на 46,8%). Це підтверджує високу бар'єрну здатність сформованих гетерофазних структур проти абразивного та втомного зношування в прецизійному зазорі поршневої пари.

Через різну фізичну розмірність та різну спрямованість критеріїв вихідні дані перетворювали на безрозмірні величини за класичними методиками відносного лінійного нормування (*Hwang & Yoon, 1981*).

Для критерію-стимулятора використовували нормування за виразом:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}, \tag{1}$$

де x_{ij} – вихідне значення j-го критерію для i-го технологічного варіанта; z_{ij} – нормоване значення критерію.

Для критеріїв-дестимуляторів застосовували вираз:

$$z_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}}. \tag{2}$$

У результаті найкращому значенню кожного критерію відповідає $z_{ij} = 1$, а всі інші значення знаходяться в інтервалі $0 < z_{ij} \le 1$. Для узгодження суперечливих критеріїв в інженерних задачах часто застосовують подібне безрозмірне перетворення (*Brauers & Zavadskas, 2006*).

Результати нормування триботехнічних критеріїв для досліджуваних технологічних станів поршня наведено в **таблиці 2**, а відповідні нормовані значення для втулки – у **таблиці 3**.

Таблиця 2 – Нормовані значення критеріїв для технологічних станів поршня

Варіант	z_1, $P_{м.п}$	z_2, $f_{\min}$	z_3, I_w
Еталон	0,69663	0,56250	0,43750
Т1 – ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar	0,85393	0,75000	0,77778
Т2 – ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar + ІЕМП	1,00000	1,00000	1,00000

Як видно з **таблиці 2**, для технологічного варіанта Т2 усі три нормовані критерії набувають значення 1,00000, що відповідає найкращим експериментальним значенням у сформованій вибірці. Застосування технології Т2 дозволило підвищити нормовані показники поршня порівняно з еталоном на 43,5% (за першим критерієм - z_1), на 77,8% (за другим - z_2) та у 2,28 раза (на 128,6%) (за третім критерієм - z_3).

Таблиця 3 – Нормовані значення критеріїв для технологічних станів втулки

Варіант	z_1, $P_{м.п}$	z_2, $f_{\min}$	z_3, I_w
Еталон	0,76543	0,68750	0,53200
В1 – напікання + В	0,93333	0,84615	0,81067
В2 – напікання + В + УЗД	1,00000	1,00000	1,00000

Аналогічну тенденцію для втулки показують дані **таблиці 3**: технологічний варіант В2 характеризується одиничними нормованими значеннями всіх трьох критеріїв, демонструючи приріст відносно еталона на 30,6%, 45,5% та 87,9% відповідно.

Слід зазначити, що для еталонної пари базові нормовані показники втулки та поршня відрізняються. Це обумовлено різницею у вихідних фізико-механічних властивостях матеріалів елементів пари тертя, геометрії контакту, а також неоднаковим характером розподілу навантажень і кінематики руху поршня відносно направляючої втулки в реальних умовах експлуатації аксіально-поршневої гідромашини.

Наступним етапом реалізації запропонованого підходу є визначення інформаційної значущості кожного з досліджуваних триботехнічних параметрів на основі концепції інформаційної ентропії Шеннона (*Shannon, 1948*). На відміну від експертних методів, які несуть у собі суб'єктивні оцінки дослідника, ентропійний підхід дозволяє розрахувати об'єктивні вагові коефіцієнти, виходячи виключно із внутрішньої структури та ступеня розсіювання отриманих експериментальних даних. На першому кроці виконували процедуру координатного перетворення нормованих матриць шляхом розрахунку відносної частки (імовірнісної міри) j-го триботехнічного критерію для i-го технологічного варіанта відновлення за математичною залежністю:

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} z_{ij}}, \tag{3}$$

де m - загальна кількість досліджуваних технологічних станів (для обох незалежних масивів $m = 3$, що включає еталонний та два відновлювальних стани).

На основі сформованих локальних часток p_{ij} здійснювали безпосередній розрахунок інформаційної ентропії j-го критерію (e_j), яка виступає мірою невизначеності, хаотичності або, навпаки, однорідності розподілу значень ознаки в межах сформованої вибірки:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ln p_{ij}. \tag{4}$$

Математична логіка виразу (4) передбачає, що у випадку, якщо відносна частка набуває нульового значення ($p_{ij} = 0$), відповідний доданок приймається рівним нулю $(0 \cdot \ln 0 = 0)$, що забезпечує стабільність обчислювальної процедури. Множник ($1 / \ln m$) є нормуючим індексом, який гарантує, що значення ентропії для будь-якого критерію буде суворо обмежене інтервалом $0 \le e_j \le 1$.

З позицій теорії інформації, значення e_j відбиває ступінь подібності або розбіжності відгуків трибосистеми на технологічний вплив. Якщо значення певного критерію для всіх технологічних варіантів є близькими між собою, то ентропія прямує до одиниці $(e_j \to 1)$, вказуючи на високу однорідність і, як наслідок, низьку здатність цього параметра диференціювати ефективність обробки. Навпаки, високий розкид згладжених нормованих значень призводить до зниження ентропії, фіксуючи високу інформаційну місткість і корисність даного критерію для прийняття інженерних рішень.

На основі розрахованих рівнів ентропії визначали ступінь диференціації (корисної інформативності) кожного параметра:

$$d_j = 1 - e_j. \tag{5}$$

Інформаційну вагу критерію розраховували за математичною залежністю:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j}. \tag{6}$$

Ентропійна вага характеризує не абсолютну фізичну важливість критерію, а його здатність диференціювати досліджувані технологічні варіанти в межах конкретного масиву експериментальних даних, що активно використовується в багатокритеріальній оптимізації триботехнічних систем (*Kumar*

& Singh, 2023). Для поршня отримано: $w_P = 0{,}11956,\ w_f = 0{,}30212,\ w_I = 0{,}57832$. Для втулки: $w_P = 0{,}12533,\ w_f = 0{,}23445,\ w_I = 0{,}64021$.

Розраховані інформаційні ваги трьох триботехнічних критеріїв для поршня та втулки наведено в **таблиці 4**.

Таблиця 4 – Інформаційні ваги триботехнічних критеріїв

Деталь	w_1, $P_{м.п}$	w_2, $f_{\min}$	w_3, I_w
Поршень	0,11956	0,30212	0,57832
Втулка	0,12533	0,23445	0,64021

Аналіз даних **таблиці 4** дозволяє встановити закономірності розподілу інформативності оціночних параметрів та визначити їхню роль у загальній триботехнічній оцінці досліджуваних технологічних станів.

У досліджуваних масивах експериментальних даних найвищу інформаційну вагу отримала інтенсивність зношування (w_3). Для поршня її значення становить 0,57832, а для втулки сягає 0,64021. З математичної точки зору це свідчить про те, що саме цей показник має найбільшу диференціюючу здатність (чутливість) у сформованій вибірці. У фізичному аспекті це підтверджує, що швидкість руйнування фрикційних поверхонь є найбільш критичним і визначальним параметром під час оцінювання ефективності нових методів зміцнення та фінішної обробки деталей плунжерної пари.

Другим за значущістю критерієм є коефіцієнт тертя (w_2), інформаційна вага якого для поршня становить 0,30212, а для втулки – 0,23445. Вища вага цього критерію для поршня (на 28,9% порівняно з втулкою) пояснюється специфікою його технологічного стану після комбінованої обробки (ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar + ІЕМП), яка суттєво змінює мікрогеометрію та енергетичний потенціал саме рухомої поверхні контакту, викликаючи більший розкид значень сили тертя порівняно з нерухомою втулкою.

Найменшу інформаційну вагу отримало максимальне передзадирне навантаження (w_1): 0,11956 - для поршня та 0,12533 - для втулки. Низька диференціююча здатність цього параметра вказує на те, що гранична трибологічна стійкість системи залишається відносно стабільною або змінюється менш динамічно під дією досліджуваних модифікацій, ніж параметри безпосереднього зношування та ковзання.

Для комплексного оцінювання сформовано безрозмірний індекс триботехнічної ефективності:

$$K_{TTE,i} = \sum_{j=1}^{3} w_j \cdot z_{ij}, \tag{7}$$

де $K_{TTE,i}$ – інтегральна оцінка i-го технологічного варіанта;

w_j – ентропійна вага j-го критерію;

z_{ij} – нормоване значення j-го критерію.

Індекс $K_{TTE,i}$ не є фізичним коефіцієнтом корисної дії та не має одиниці вимірювання. Він характеризує відносний рівень комплексної триботехнічної ефективності технологічних варіантів, оцінених у межах одного експериментального масиву.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Практична реалізація розробленої математичної моделі дозволила інтегрувати різнорідні масиви експериментальних триботехнічних даних у єдиний безрозмірний комплексний показник. Оскільки досліджувані фізичні характеристики (максимальне передзадирне навантаження, коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування) мають різну розмірність і протилежні вектори цільової оптимізації, перехід до комплексного індексу K_{TTE} забезпечив можливість об'єктивного зваженого порівняння досліджуваних технологій. Розрахунок інтегральних оцінок здійснювався диференційовано для кожної

деталі прецизійного спряження «поршень – втулка блоку», оскільки формування їхніх робочих поверхонь базується на принципово різних фізико-хімічних методах модифікації.

Нижще наведено результати кількісної верифікації моделі, яка відображає відносну триботехнічну ефективність та еволюцію властивостей елементів пари тертя при послідовному ускладненні технологічних маршрутів їх відновлення порівняно із серійним (еталонним) станом.

Результати оцінювання технологій відновлення поршня показали, що для еталонного стану поршня за формулою (7) отримано:

$$K_{TTE,0} = 0{,}11956 \cdot 0{,}69663 + 0{,}30212 \cdot 0{,}56250 + 0{,}57832 \cdot 0{,}43750 = 0{,}50625.$$

Для технологічного варіанта Т1 - (ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar):

$$K_{TTE,1} = 0{,}11956 \cdot 0{,}85393 + 0{,}30212 \cdot 0{,}75000 + 0{,}57832 \cdot 0{,}77778 = 0{,}77849$$

Для технологічного варіанта Т2 - (ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar + ІЕМП):

$$K_{TTE,2} = 0{,}11956 \cdot 1 + 0{,}30212 \cdot 1 + 0{,}57832 \cdot 1 = 1{,}00000.$$

Результати розрахунку комплексного індексу триботехнічної ефективності для досліджуваних технологічних станів поршня наведено в **таблиці 5**.

Таблиця 5 – Комплексний індекс триботехнічної ефективності технологій відновлення поршня

Варіант	K_{TTE}	Зміна щодо еталона
Еталон	0,50625	–
Т1 – ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar	0,77849	+53,78 %
Т2 – ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar + ІЕМП	1,00000	+97,54 %

Аналіз результатів **таблиці 5**, показав, що комплексний індекс триботехнічної ефективності послідовно збільшується від 0,50625 для еталонного стану до 0,77849 для технології Т1 - ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar та до 1,00000 для технології Т2 з додатковим впливом ІЕМП.

Застосування WC–10Co–3Cr забезпечило підвищення інтегральної оцінки на 53,78 %, а додатковий вплив імпульсного електромагнітного поля забезпечив досягнення максимального значення $K_{TTE} = 1{,}00000$ у межах сформованої вибірки.

Отримана тенденція узгоджується з сучасними дослідженнями WC–Co–Cr-покриттів, у яких показано їх високу зносостійкість та залежність трибологічних характеристик від параметрів формування покриття (*Cui et al., 2022; Zhao et al., 2024*).

Розрахунки комплексного індексу триботехнічної ефективності для досліджуваних технологічних станів втулки показали, що для еталонного стану отримано:

$K_{TTE,0} = 0{,}59771$. Для втулки після електроконтактного напікання: $K_{TTE,1} = 0{,}83436$. Для втулки після електроконтактного напікання та УЗД: $K_{TTE,2} = 1{,}00000$.

Результати розрахунку комплексного індексу триботехнічної ефективності для технологічних станів втулки наведено в **таблиці 6.**

Таблиця 6 – Комплексний індекс триботехнічної ефективності технологій відновлення втулки

Варіант	K_{TTE}	Зміна щодо еталона
Еталон	0,59771	–
Напікання + В	0,83436	+39,59 %
Напікання + В + УЗД	1,00000	+67,33 %

Згідно з даними **таблиці 6**, електроконтактне напікання порошкової композиції з бором підвищило комплексний індекс від 0,59771 до 0,83436, а поєднання напікання з УЗД – до 1,00000 у межах сформованого експериментального масиву.

Експериментально це супроводжувалося збільшенням максимального передзадирного навантаження від 31,0 до 40,5 МПа, зменшенням коефіцієнта тертя від 0,016 до 0,011 та зменшенням інтенсивності зношування від 3,20 до $1,7024 \cdot 10^{-12}$ $мм^3/(Н \cdot м)$.

Оскільки для поршня та втулки ентропійні ваги визначалися окремо, а нормування виконувалося щодо найкращого значення кожного відповідного експериментального масиву, абсолютні значення K_{TTE} різних груп не слід трактувати як безпосереднє ранжування поршня та втулки між собою.

Для коректного порівняння динаміки зміни ефективності доцільно використовувати відносний показник K_{rel}:

$$K_{rel,i} = \frac{K_{TTE,i}}{K_{TTE,0}}, \tag{8}$$

де $K_{TTE,i}$ - комплексний індекс триботехнічної ефективності i-го технологічного варіанта відновлення; $K_{TTE,0}$ - комплексний індекс триботехнічної ефективності еталонного (серійного) стану відповідної деталі.

Для поршня отримано значення: $K_{rel,T1} = 1,5378\ (+53,78\%)$, та $K_{rel,T2} = 1,9754\ (+97,54\%)$. Для втулки: $K_{rel,B1} = 1,3959\ (+39,59\%)$ та $K_{rel,B2} = 1,6733\ (+67,33\%)$.

Таким чином, у межах кожної окремої групи технологічний розвиток супроводжувався збільшенням комплексного показника. При цьому, ці значення не є підставою для прямого твердження про абсолютну перевагу відновлення поршня над відновленням втулки, оскільки відповідні індекси сформовано на різних нормованих масивах.

Графічну інтерпретацію порівняння відносного індексу K_{rel} наведено на **рис. 4**.

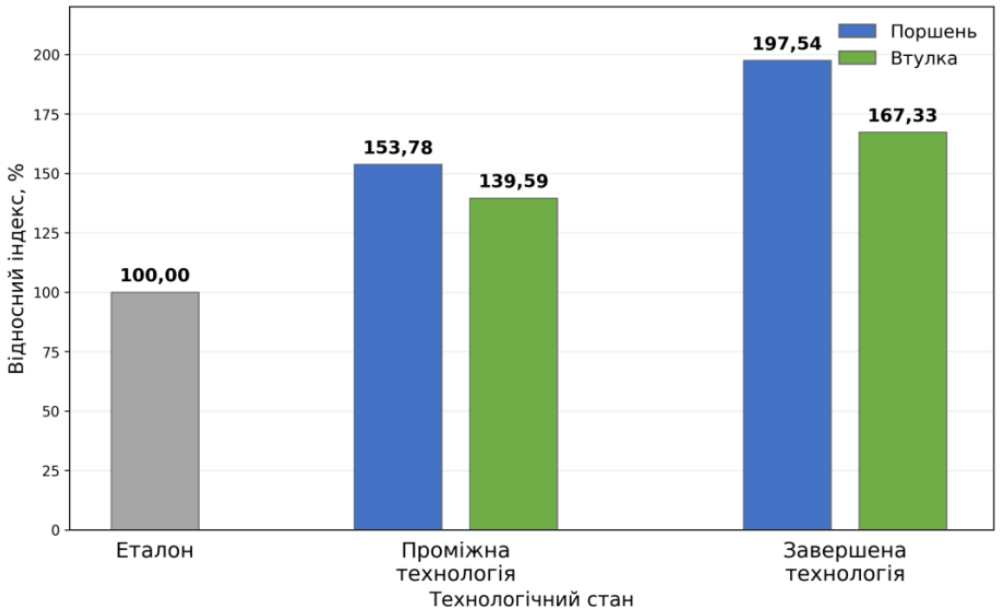


Рис. 4 – Відносна зміна комплексного індексу триботехнічної ефективності в межах окремих груп досліджуваних деталей

Детальний аналіз діаграми, представленої на **рис. 4**, дозволяє виявити закономірності відносного відгуку досліджуваних трибоспряжень на впровадження нових технологічних рішень.

Динаміка проміжних технологічних станів (Т1 та В1), показує, що перехід від вихідного серійного (еталонного) стану до проміжних технологій відновлення забезпечує суттєве підняття інтегрального рівня властивостей для обох деталей. Показник відносної ефективності для поршня (варіант Т1 - ВГН + WC–10Co–3Cr + Ar) досягає 1,5378, що свідчить про зростання інтегральної якості поверхні на

53,78%. Для латунної втулки (варіант В1 - напікання + В) індекс K_{rel} становить 1,3959, тобто фіксується приріст на 39,59%. Така розбіжність вказує на те, що базове високошвидкісне газополуменеве напилення твердосплавного композиту на сталеву основу є дещо ефективнішим інструментом первинного формоутворення зносостійких шарів, ніж металургійне електроконтактне напікання на латунь.

Найбільш вагомий практичний інтерес викликає аналіз динаміки при переході до фінішних комбінованих операцій. Впровадження ІЕМП для поршня (варіант Т2) забезпечує додатковий «стрибок» відносної ефективності на 43,76% (від 1,5378 до 1,9754), майже подвоюючи триботехнічну якість елемента щодо еталона (+97,54%). Водночас застосування УЗД для втулки (варіант В2) піднімає показник K_{rel} з 1,3959 до 1,6733, що дає чистий приріст від фінішної операції на 27,74% (загалом +67,33% відносно базового стану). Фізично це підтверджує гіпотезу про те, що енергетичний вплив ІЕМП на гетерофазну структуру карбідного покриття (шляхом релаксації залишкових напружень та ущільнення) забезпечує вищий відносний приріст експлуатаційних параметрів, ніж деформаційне калібрування латуні за допомогою УЗД.

Представлений на **рис. 4** спосіб відносного відображення є методично коректнішим для інженерного аналізу, оскільки він нівелює різницю у вихідному фізико-хімічному стані та механічних властивостях різнорідних матеріалів (сталь ШХ15СГ проти латуні ЛМцСКА-58-2-2-1-1), фокусуючи увагу виключно на ефективності самого технологічного маршруту. Графік чітко демонструє, що попри кардинально різні принципи обробки поверхні, обидва компоненти прецизійної плунжерної пари мають висхідний характер технологічного розвитку.

Для підвищення інтерпретованості математичної моделі додатково визначали структурний внесок окремого критерію за виразом:

$$C_{ij} = w_j \cdot z_{ij}, \tag{9}$$

де C_{ij} – внесок j-го критерію у комплексний показник i-го технологічного варіанта.

Тоді:

$$K_{TTE,i} = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3}. \tag{10}$$

Для проміжного технологічного варіанта поршня Т1 отримано: $C_1 = 0{,}10210$, $C_2 = 0{,}22659$, $C_3 = 0{,}44980$. Отже, $K_{TTE,T1} = 0{,}10210 + 0{,}22659 + 0{,}44980 = 0{,}77849$.

Для проміжного варіанта втулки В1: $C_1 = 0{,}11698$, $C_2 = 0{,}19838$, $C_3 = 0{,}51900$. Відповідно $K_{TTE,B1} = 0{,}11698 + 0{,}19838 + 0{,}51900 = 0{,}83436$.

Розраховані структурні внески максимального передзадирного навантаження, коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування у формування комплексного індексу для проміжних технологічних станів наведено в **таблиці 7**.

Таблиця 7 – Структурний внесок критеріїв у комплексний індекс

Деталь і варіант	C_1, $P_{м.п}$	C_2, $f_{\min}$	C_3, I_w	K_{TTE}
Поршень, Т1	0,10210	0,22659	0,44980	0,77849
Втулка, В1	0,11698	0,19838	0,51900	0,83436

Як видно з **таблиці 7**, найбільший структурний внесок у комплексний індекс для обох проміжних технологічних станів забезпечує критерій інтенсивності зношування: 0,44980 - для поршня Т1 та 0,51900 - для втулки В1.

Для деталізації формування комплексного індексу структурні внески окремих триботехнічних критеріїв для проміжних технологічних станів порівняно на **рис. 5**.

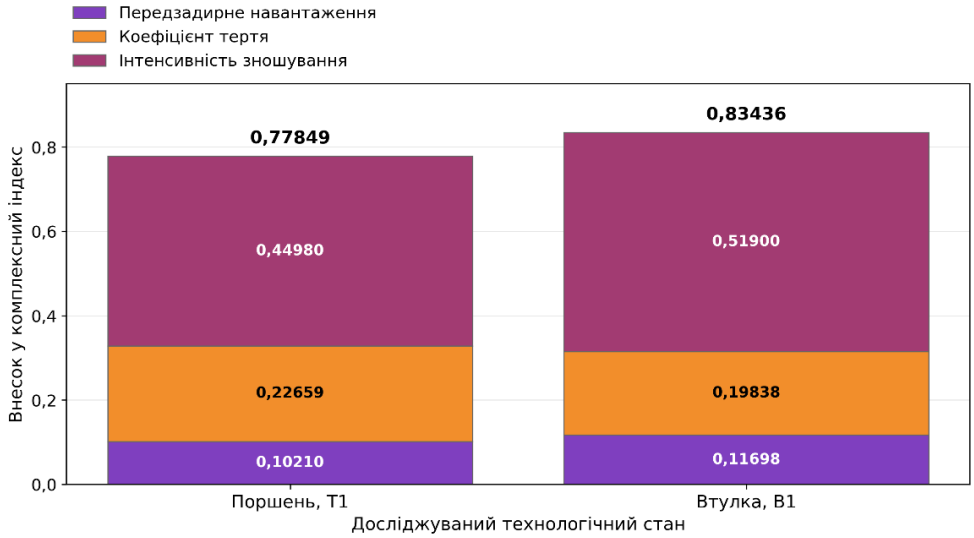


Рис. 5 – Структурний внесок триботехнічних критеріїв у комплексний індекс

Візуалізація та кількісний аналіз діаграми структурних внесків (**рис. 5**) показують, що найбільшу частку у формуванні підсумкового комплексного індексу для обох деталей забезпечує критерій інтенсивності зношування C_3. Його абсолютний внесок становить 0,44980 для сталевого поршня (Т1) та 0,51900 для латунної втулки (В1). У відсотковому відношенні до загального індексу K_{TTE} частка внеску зношування сягає 57,8% для поршня та 62,2% для втулки. Це підтверджує, що в рамках сформованих масивів даних саме швидкість деградації та лінійного руйнування фрикційного контакту є основним локомотивом підвищення загальної ефективності відновлених трибосистем.

Другим за вагою компонентом архітектури індексу є мінімальний коефіцієнт тертя C_2. Його внесок для поршня Т1 дорівнює 0,22659 (частка у структурі - 29,1%), тоді як для втулки В1 він становить 0,19838 (частка - 23,8%). Вища структурна значущість антифрикційного фактора для поршня обумовлена тим, що високошвидкісне газополуменеве напилення карбіду вольфраму суттєвіше трансформує мікрогеометрію та енергетичний рельєф поверхні саме рухомого елемента пари тертя, викликаючи вищу чутливість цього показника порівняно з нерухомим латунним контртілом.

Мінімальний внесок у структуру комплексного індексу забезпечує максимальне передзадирне навантаження C_1: 0,10210 – для поршня Т1 (частка – 13,1%) та 0,11698 – для втулки В1 (частка – 14,0%). Рівномірний та відносно низький розподіл часток цього критерію для обох деталей вказує на те, що хоча гранична навантажувальна здатність і зростає під дією нових технологій, її диференціюючий вплив на загальну оцінку залишається обмеженим через вищу стабільність вихідних експериментальних значень. Отриманий результат має фундаментальне значення для фізико-математичної інтерпретації моделі. Він переконливо демонструє, що інтегральний індекс триботехнічної ефективності не є абстрактною математичною згорткою, а чутливо відображає реальні фізичні зміни у фрикційному контакті. Завдяки деталізації через показник C_{ij}, інженер отримує чітку інформаційну основу для управління якістю ремонту: графік наочно вказує, що під час оптимізації технологічних маршрутів відновлення аксіально-поршневих гідромашин першочерговий акцент слід робити саме на забезпеченні кінетичних параметрів зносостійкості, оскільки вони формують понад 60% успішності відновлення прецизійних спряжень.

Отримані результати показали, що використання ентропійного підходу дозволило сформувати комплексну кількісну оцінку технологій відновлення на основі одночасного врахування несучої здатності, тертя та зношування.

Для сталевого поршня застосування WC–10Co–3Cr забезпечило позитивну зміну всіх трьох критеріїв. Додатковий вплив імпульсного електромагнітного поля супроводжувався подальшим зростанням передзадирного навантаження та зменшенням коефіцієнта тертя й інтенсивності

зношування. Така тенденція узгоджується із загальними результатами досліджень WC–Co–Cr-покриттів, де їх трибологічні характеристики пов'язують із мікроструктурою, фазовим складом, пористістю та умовами напилення (*Cui et al., 2022; Yin et al., 2023; Zhao et al., 2024*).

Сучасні дослідження також показують, що покриття, нанесені методом ВГН, зокрема композиції типу WC–10Co–4Cr, можуть істотно підвищувати зносостійкість поверхні. Водночас властивості таких покриттів залежать від режимів напилення, розміру частинок порошку та стану поверхні основи (Si et al., 2024; Zhao et al., 2024). Це підтверджує доцільність розгляду технології відновлення не як окремої операції, а як комплексного технологічного маршруту, що формує задані властивості поверхні.

Для втулки позитивна зміна комплексного індексу була пов'язана з послідовним поєднанням електроконтактного напікання та УЗД. При цьому, інтенсивність зношування отримала найбільшу ентропійну вагу. Важливо, що це не означає її абсолютної фізичної пріоритетності. Ентропійна вага характеризує лише інформаційну диференціюючу здатність показника в межах конкретної експериментальної вибірки.

Отриманий результат відповідає загальній логіці ентропійного підходу: показник, значення якого сильніше відрізняються між альтернативами, має більшу інформаційну значущість для їх диференціювання. Застосування такого принципу в інженерних багатокритеріальних задачах показано також .у сучасних дослідженнях вибору матеріалів та оптимізації технологічних процесів (*Kumar & Singh, 2023*)

Водночас запропонована модель має певні обмеження. По-перше, ентропійні ваги залежать від складу конкретного експериментального масиву. По-друге, інтегральний індекс враховує лише три триботехнічні характеристики та не містить безпосередніх економічних, технологічних і ресурсних критеріїв. По-третє, досліджувані технології поршня і втулки оцінювалися окремими групами, тому їх абсолютні значення K_{TTE} не повинні використовуватися для прямого міждетального ранжування.

Перспективи подальших досліджень полягають у переході від суто триботехнічної оцінки до комплексної техніко-економічної моделі вибору ремонтної технології. Для цього систему критеріїв доцільно доповнити показниками залишкового ресурсу деталей, собівартості та трудомісткості процесу, стабільності геометричних параметрів, а також оцінкою впливу відновлених спряжень на кінцевий об'ємний і механічний коефіцієнти корисної дії гідромашини.

Запропонований структурний показник C_{ij} додатково підвищує інтерпретованість моделі, оскільки дозволяє визначити, якою мірою кожний критерій формує підсумкову оцінку. Такий підхід може бути використаний як один із елементів інформаційної підтримки прийняття інженерних рішень при виборі технології відновлення.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель комплексного оцінювання триботехнічної ефективності технологій відновлення деталей поршневої пари аксіально-поршневих гідромашин на основі трьох критеріїв: максимального передзадирного навантаження, мінімального коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування.

Встановлено спрямованість критеріїв: максимальне передзадирне навантаження є стимулятором, а мінімальний коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування – дестимуляторами. Для їх приведення до єдиної безрозмірної шкали застосовано нормування щодо найкращих експериментальних значень.

Застосування методу ентропії Шеннона дозволило встановити об'єктивні інформаційні ваги критеріїв оцінювання. Найбільшу диференціюючу здатність в обох масивах даних виявила інтенсивність зношування (0,57832 для поршня та 0,64021 для втулки), тоді як ваги коефіцієнта тертя становили 0,30212 та 0,23445, а передзадирного навантаження – 0,11956 та 0,12533 відповідно.

Для поршня комплексний індекс триботехнічної ефективності збільшився від 0,50625 для еталонного стану до 0,77849 після нанесення WC–10Co–3Cr та до 1,00000 після додаткового впливуІЕМП. Відносне підвищення щодо еталона становило відповідно 53,78 і 97,54 %.

Для втулки комплексний індекс збільшився від 0,59771 для еталонного стану до 0,83436 після електроконтактного напікання та до 1,00000 після поєднання напікання з УЗД. Відносне підвищення щодо еталона становило відповідно 39,59 і 67,33 %.

Структурний аналіз показав, що найбільший внесок у комплексний індекс для проміжних технологічних станів забезпечувала інтенсивність зношування. Її внесок становив 0,44980 для поршня та 0,51900 для втулки.

Показано, що абсолютні значення комплексного індексу, сформовані для окремих експериментальних масивів, не слід використовувати для прямого ранжування поршня та втулки між собою. Для такого порівняння доцільно використовувати відносну зміну індексу щодо відповідного еталонного стану.

Запропонований підхід може бути використаний як математична складова інформаційної системи вибору ремонтно-відновлювальних технологій. Подальший розвиток моделі доцільно здійснювати шляхом включення ресурсних, технологічних та економічних критеріїв.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Brauers, W. K., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. Control and Cybernetics, 35(2), 445–469. https://matwbn.icm.edu.pl/ksiazki/cc/cc35/cc35213.pdf

Cui, Q., Wang, Y., Zhang, X., Shu, W., Deng, X., Guo, W., Shi, W., Li, S., & Bei, X. (2022). Microstructure and wear resistance of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating on Ti-6Al-4V. Journal of Thermal Spray Technology, 31(1), 70–75. https://doi.org/10.1007/s11666-021-01291-y

Dwivedi, P. P., & Sharma, D. K. (2022). Application of Shannon entropy and CoCoSo methods in selection of the most appropriate engineering sustainability components. Cleaner Materials, 5, Article 100118. https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100118

Ernst, M., Vacca, A., Ivantysynova, M., & Enevoldsen, G. (2020). Tailoring the bore surfaces of water hydraulic axial piston machines to piston tilt and deformation. Energies, 13(22), Article 5997. https://doi.org/10.3390/en13225997

Hong, S., Wu, Y., Zhang, J., Zheng, Y., Qin, Y., & Lin, J. (2015). Ultrasonic cavitation erosion of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed near-nanostructured WC–10Co–4Cr coating in NaCl solution. Ultrasonics Sonochemistry, 26, 87–92. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.01.001

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9

Kumar, R., & Singh, B. (2023). Multi-criteria optimization of tribological performance of surface-treated steel using entropy-weighted grey relational analysis. Journal of Materials Engineering and Performance, 32(8), 3540–3552. https://doi.org/10.1007/s11665-022-07412-0

Lin, Y., Wang, H., Wang, H., Tang, S., Hao, H., & Huang, J. (2024). A novel wear prediction method and wear characteristic analysis of piston/cylinder pair in axial piston pump. Wear, 550–551, Article 205402. https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205402

Melyantsov, P. T. (2025). Tekhnolohiia vidnovlennia vtulok bloku kachaiuchoho vuzla obiemnykh aksialno-porshnevykh hidromashyn [Technology of restoration of block sleeves of the pumping unit of volumetric axial-piston hydraulic machines]. InterConf+, 57(248), 543–560. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.05.2025.057

Melyantsov, P. T. (2026). Modeling of wear processes and resource-efficient restoration technologies for components of axial piston hydraulic machines. In P. T. Melyantsov (Ed.), Scientific thought development: Innovative technology, equipment and industry: Monographic series «European Science» (Book 51, Part 1, pp. 6–71). ScientificWorld-NetAkhatAV. https://doi.org/10.30890/2709-2313.2026-51-1-001

Paszota, Z. (2012). Theoretical and mathematical models of the torque of mechanical losses in the pump used in a hydrostatic drive. Polish Maritime Research, 18(4), 28–35. https://doi.org/10.2478/v10012-011-0026-7

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27(3), 379–423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Si, C., Li, S., Zhao, L., Xu, S., & Chen, S. (2024). Effect of HVOF-sprayed nanostructured WC–10Co–4Cr coating on sliding wear and tensile–tensile fatigue properties of TC6 titanium alloy. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 118, Article 106463. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106463

Sristi, N. A., Zaman, P. B., & Dhar, N. R. (2024). Evaluation of entropy-coupled multi-criteria decision-making methods for enhancing machinability. Heliyon, 10(19), Article e38299. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38299

Tang, H., Ren, Y., & Zhang, J. (2023). Fluid-structure-thermal coupling analysis of lubricating gap film between piston and cylinder in axial piston pump. Journal of Mechanical Science and Technology, 37(4), 1845–1855. https://doi.org/10.1007/s12206-023-0327-3

Wang, H., Lin, N., Yuan, S., Liu, Z., Yu, Y., Zeng, Q., Fan, J., Li, D., & Wu, Y. (2024). Structural improvement, material selection and surface treatment for improved tribological performance of friction pairs in axial piston pumps: A review. Tribology International, 198, Article 109838. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109838

Yin, M., Shao, Y., Kang, X., Long, J., & Zhang, X. (2023). Fretting corrosion behavior of WC-10Co-4Cr coating on Inconel 690 alloy by HVOF thermal spraying. Tribology International, 177, Article 107975. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107975

Yin, W., Zhang, J., Wang, X., Zhang, Q., & Li, Y. (2024). Volumetric efficiency degradation prediction of axial piston pump based on friction and wear test. Heliyon, 10(17), Article e37334. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37334

Zecchi, M., & Ivantysynova, M. (2012). An elasto-hydrodynamic lubrication model for the cylinder block/valve plate interface of axial piston machines. Tribology International, 47, 10–23. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.04.012

Zhao, X., Wang, Y., Lin, S., & Wang, Q. (2024). Study on the wear resistance and mechanism of HVOF-sprayed WC10Co4Cr coatings. Surface and Coatings Technology, 494, Article 131368. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131368