

Визначення раціонального складу трибологічно активної добавки в оливу для покращення характеристик трибосистем

В. В. Аулін, А. В. Гриньків, С. В. Лисенко, Т. М. Замота, А. О. Панков, А. А. Тихий

Проведеними дослідженнями формування раціонального складу трибологічно активної добавки до базової оливи показана можливість покращення характеристик трибосистем. Виявлено, що дана трибологічно активна добавка дає можливість формувати трибологічні властивості, що забезпечують нормальні умови експлуатації спряжень деталей трибосистеми. На основі оптимізації технічного стану трибологічно активної добавки отримано раціональні значення кожного з її складових. Оптимізацію проведено за умов, що величина зношування повинна прямувати до мінімуму, а критичне навантаження та навантажування зварювання – до максимуму. На основі експериментальної бази даних на чотирикульковій машині тертя отримано рівняння для кожної з функцій відгуку результатуючих ознак. Отриманні регресійні рівняння та значення функції бажаності порядку 0,698 дали можливість визначити склад трибологічно активної добавки: метакаолін, дисперсійний порошок глини з Катеринівського родовища, олеат натрію, гідрооксид літію та сірки. Встановлено, що при використанні отриманої трибологічно активної добавки в лабораторних умовах зафіксовано зменшення зношування зразків на 26,8 %, збільшення критичного навантаження на 17,2 %, збільшення навантажування зварювання на 4,89 %. Аналіз експериментальних даних свідчить, що запропоновану трибологічно активну добавку можливо експлуатувати при локальному контактному навантажуванні в контакт до 1078 Н та при піковому перенавантажуванні до 2372 Н.

Результати досліджень дають підстави стверджувати, що запропонована трибологічно активна добавка дає можливість покращити характеристики трибосистем. Вона може бути корисною сервісним та автотранспортним підприємствам при проведенні технічного сервісу та для виготовлення композиційної оливи

Ключові слова: трибологічно активна добавка, геомодифікатор, зношування, сірка, літієві мила, натрієві мила, метакаолін, навантаження зварювання

1. Вступ

В даний час підвищення характеристик трибосистем транспортних машин здійснюється шляхом вибору зносостійких конструкційних матеріалів, підбором до них олив та створенням умов рідинного змащування спряжень деталей [1]. У цьому напрямку проводяться більш інтенсивні дослідження й досягнуто значних успіхів при проектуванні трибоспрямих деталей. В свою чергу, протікання в них процесів тертя та зношування підчас експлуатації значною мірою

залежить від властивостей мастильного середовища та сформованих на робочих поверхнях плівок антифрикційних матеріалів.

При цьому широко використовуються металоорганічні матеріали поверхонь деталей спряжень, які експлуатуються в умовах контактування з високо-температурними, абразивовмісними речовинами. Однак, володіючи високою електропровідністю і теплопровідністю, робочі поверхні деталей мають низьку зносостійкість [2]. В свою чергу, висока електропровідність матеріалів деталей призводить до швидкої трибоелектризації поверхневих шарів, які створюють внутрішнє електричне поле, що може впливати на частинки присадки та частинки зносу. Вплив є позитивним в період робочої експлуатації присадок, але при збільшенні кількості частинок зношування та спрацюванні присадок в оливі даний ефект починає відігравати негативну роль. За таких умов відбувається швидке дрейфування частинок зношування з подальшим виконанням ними роботи у якості абразиву на поверхні деталі. Це істотно зменшує зносостійкість робочих поверхонь деталей спряження.

Одним із шляхів усунення цього недоліку є створення різнорідними триботехнологіями антифрикційних поверхневих шарів з високими експлуатаційними властивостями на робочих поверхнях деталей спряжень [3]. Триботехнології володіють значною перевагою формування необхідного комплексу експлуатаційних характеристик та властивостей поверхневих шарів деталей. Їх використання дає можливість забезпечити раціональну еквідистантність робочих поверхонь рухомих спряжень деталей. Створюються також умови для створення та реалізації певних процесів та станів самоорганізації трибосистеми як під час тертя в початковий період роботи спряжень, так і під час їх подальшої експлуатації.

Використання триботехнологічних методів для підготовки мастильних середовищ дає можливість зменшити величину зношування робочих поверхонь деталей та збільшити їх зносостійкість під час різних експлуатаційних режимів, що є безумовно актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В загальному підході усі методи підвищення зносостійкості спряжень деталей транспортних машин, як найпростіших трибосистем, поділяються на три основні групи: конструкційні, технологічні і експлуатаційні [1]. Тому основну увагу бажано було приділити зв'язку експлуатаційних та технологічних груп оливи з триботехнологічної точки зору, а також оцінці робочих присадок. Конструкційні рішення по підвищенню зносостійкості закладаються на етапі проектування спряжень деталей силових агрегатів машин в цілому. При цьому можливе зниження витрат потужності на тертя до 12 %, але обмеженням є ускладнення їх конструювання, окислення оливи та ін. [4]. В такому випадку потрібно буде виконувати завдання підбору технологічних операцій для створення добавок до оливи. На величину зносу робочої поверхні спряжень деталей безпосередньо впливають рівень механічних і теплових навантажень, тип і продуктивність трибоспряжень [5]. Але в роботі не вирішено питання керування зносом за допомогою оптимізації характеристик трибосистеми.

Робочі оливи з трибопрепаратами значно впливають на поверхню тертя. До складу трибологічних препаратів найчастіше входять наступні присадки: поверхнево-активні; хімічно-активні; інактивні; металоплакуючі і пластично-деформуючі присадки [6] та ін. В той час не розроблялась технологія їх формування та підбір складових відповідно до трибологічних умов.

Покращення експлуатаційних властивостей олив відбувається при введенні в них присадок і утворенні спеціальних плівок або покриттів на поверхнях тертя деталей [7]. Проте бажано розробити метод керування фізико-механічними характеристиками робочих поверхонь деталей. В процесі експлуатації спряжень деталей можуть утворитись умови з регульованими процесами зношування і регенерацією робочих поверхонь тертя без додаткового технічного сервісу [8]. В роботі не вирішено питання самоорганізації, що дають можливість зменшити внутрішні напруження в областях контакту елементів трибосистеми.

Суттєвими перевагами в керуванні станами трибосистеми є впровадження олив з добавками і присадками. В свою чергу, потрібно враховувати умови, при яких ефективна дія добавок і присадок триває при достатній їх концентрації [9], а неправильно підібраний їх склад здатний навіть збільшити силу тертя [10]. Для таких умов бажано виконати правильний підбір складу трибологічної добавки. Раціонально підібраний склад та концентрація присадки можуть позитивно впливати на реологічні властивості мастильного матеріалу підчас тертя. Через складність фізико-хімічних процесів та перетворень, присадки не володіють універсальністю до матеріалів деталей трибосистеми і режимів їх роботи [11]. В роботі не дано опис технології приготування присадок та механізму підвищення зносостійкості спряжень деталей на їх основі.

При дослідженні характеру та природи трибофізичних процесів у спряженнях деталей протягом експлуатації є можливість збільшення їх експлуатаційної надійності при формуванні зносостійких покриттів [12]. Для збільшення зносостійкості робочих поверхонь можливе використання методів поверхневого впливу лазерних променів на області робочих поверхонь [13]. Щоб зменшити інтенсивність процесів зношування бажано проводити керування напружено-деформованим станом робочих поверхонь деталей [14]. Автори не розглядали можливість формування реноваційних покриттів з композиційного оливного середовища, що також дає можливість підвищити експлуатаційну надійність.

Важливою технологічною операцією, отримання якісних робочих олив для різних режимів експлуатації трибоспрямижень деталей, є визначення раціонального складу добавок до олив при змінних зовнішніх впливах [15]. Доцільним при цьому є застосування відповідного математичного апарату для визначення значень складових компонентів добавки до олив в межах прикладного завдання при використанні нечітких відгуків [16] та формуванні повної експериментальної бази даних [17]. В роботі не використовували для цього функцію бажаності, що дає можливість зменшити обсяг математичного інструментарію.

Застосування на різних етапах експлуатації машин олив з добавками та присадками сприяє переходу до нормального механо-хімічного зношування деталей спряжень і утворенню ювенільних поверхонь, здатних сприймати експлуатаційні навантаження [18]. Проте потрібно було вирішити завдання зменшення

трибофізичних характеристик рухомих спряжень підчас рідинного тертя. При цьому стабілізується технічний стан, склад, експлуатаційні властивості поверхонь тертя деталей шляхом їх припрацювання [19]. Разом з тим не розглянуто припрацюваність робочих поверхонь деталей в різних середовищах. Розвиток триботехнологій дає можливість утворювати нові зносостійкі структури в поверхневих шарах матеріалів деталей трибоспряжень [20]. Відповідно підчас протікання процесів тертя в присутності композиційної оливи можливо спостерігати аналогічний процес формування локальних областей з кращими фізико-хімічними властивостями, які реалізуються при обробці концентрованим потоком енергії [21]. Бажано було розглянути механізм трибологічної активації локальних ділянок спряжених поверхонь деталей, а також покращення їх якості підчас експлуатації за допомогою трибологічно активних добавок.

Для триботехнологій припрацювання і відновлення найбільш перспективними є методи, в основі яких покладені трибохімічні реакції, що відбуваються в умовах механічної активації в системі "метал – композиційне оливне середовище" або "метал-електроліт" [22]. Основною причиною протікання таких реакцій є перенос речовини електрично зарядженими компонентами. Якщо підібрати присадки або електроліт і активувати робочі поверхні деталей, то можливо досягти спрямованої доставки в зону тертя зносостійких компонентів [23]. В роботі не описано і не розглянуто питання керування трибохімічними реакціями за допомогою складу функціональних елементів трибологічно активних добавок підчас тертя.

На сьогодні, зниження рівня зносу та підвищення надійності спряжень деталей машин досягається переважно застосуванням різних методів. Найбільш доступними являються методи забезпечення точності обробки деталей трибоспряжень [24] та рівноважної шорсткості поверхонь [25], але дані методи не забезпечують експлуатаційно-технологічні вимоги для повного життєвого циклу трибоспряжень. Важливим в цьому напрямку є формування покриттів на робочі поверхні трибоспряжень, що знижують коефіцієнт тертя [26] та використання матеріалів із значною циклічною міцністю, електропровідністю і демпфуючою здатністю та ін. [27]. Натомість необхідно було розробити алгоритми підбору даних покриттів для характерних умов експлуатації рухомих трибоспряжень. Розробка поверхневих шарів, що створюють умови самоорганізації для деталей з нормальними дисипативними та реологічними властивостями [28]. В цьому випадку авторам бажано було встановити закономірності трибологічних характеристик від наявності поверхневих шарів в трибоспряженнях. Методи можливо реалізувати при впровадженні триботехнологій припрацювання та відновлення спряжень деталей в композиційному оливному середовищі [29]. Але вирішення даних проблем виконувалось виключно з використанням синтетичних присадок без геомодифікаторів тертя.

Для оптимальних умов функціонування спряжень деталей необхідне створення на їх робочих поверхнях тонкого шару покриття з антифрикційних матеріалів, які сприяють пластифікуванню та згладжуванню мікронерівностей на поверхнях тертя [30]. В той час не розглянуто особливості процесів заповнення поверхневого шару та оптимізуючого складу добавок. Цього досягають при ви-

користанні олив з металовмісними та металоорганічними присадками [31], тобто композиційних оливних середовищ. Найбільшого поширення серед них набули металоорганічні сполуки міді та молібдену [32]. Дані присадки володіють низькою величиною зсуву, в зв'язку з чим бажано було б виявити вплив цих присадок на внутрішні напруження в деталях. Комплексного розгляду досліджуваної проблеми можливо досягнути при аналітичному підході й декомпозиції загального завдання на більш прості дослідні точки [33]. При цьому загальний синтез даних дасть можливість висвітлити повну дослідну картину. Несправність циліндро-поршневої групи транспортних машин обумовлює від 3...15 % відмов силових агрегатів транспортних машин. Аналіз їх відмов показує, що основними причинами є наступні: перевищення умов навантаження; важкі умови експлуатації; недотримання періодичного технічного обслуговування системи змащування та використання невідповідних олив до умов експлуатації [34]. Додатково потрібно розглянути питання зміни технічного стану спряжень деталей з геомодифікатори та їх вплив на процеси зношування. Важливим критерієм реалізації триботехнологій формування добавок є їх автоматизація як при виготовленні систем та агрегатів транспортних машин, так і під час їх експлуатації. Одним з ключових напрямків на даному часі є гідроелементи, що функціонують на ефекті прилипання струменю робочого середовища [35]. Використання даних елементів дає можливість розподіляти гідравлічний потік, а також перенаправляти його по різних технологічних операціям, що вкрай важливо під час формування композиційних олив [36]. Разом з тим в даних елементах бажано було вирішити питання динамічного перемішування сумішей та можливість температурного регулювання в трибосистемі.

Напружено-деформований стан також можливо виявляти під час тертя за рахунок різних безрозбірних методів, а саме методів акустичної емісії та коерцетивної сили на робочих поверхнях деталей [37]. В місцях максимального зношування було виявлено області напружено-деформованого стану, але для аналізу повної картини зношування деталей необхідно досліджувати також області мінімального зношування. Додатково на величину зносу в спряженнях деталей впливають абразивні частинки, які потрапляючи в трибологічний контакт, що в свою чергу, формують локальні компресійні зони, які під час експлуатації є концентраторами напружень [38]. В роботі не виявлено чи цей процес проходить за участі елементів трибологічно активної добавки чи синтетичних присадок на основі поверхнево-активних речовин. Утворення даних абразивних частинок можливе за рахунок кластеризації частинок зношування та лакофарбових включень в робочій оливі, що в свою чергу є неприпустимим під час експлуатації транспортних машин [1]. Формування зносостійких поверхневих шарів з сприятливими реологічними властивостями здійснюється для зменшення внутрішнього напружено-деформованого стану деталей машин. Це можливо при раціональному складі гідросуміші або композиційних мастильних середовищ [39]. Насамперед потрібно виявити закономірності впливу добавок зі складу композиційної оливи, на робочу поверхню деталей та на зношування трибологічних елементів спряження. Останнє в деяких умовах може забезпечувати значно нижчу температуру зварювання в трибологічному контакті [40]. Для подальших

досліджень в цьому напрямку необхідно додатково описати математичні моделі зношування в присутності активних добавок до оливи.

Збільшити ефективність трибологічних спряжень можливо шляхом підбору раціональних матеріалів, таких як полімерні композити. Натомість доцільно виявити трибологічні закономірності полімерних композитів в режимах рідинного змащування з композиційною оливою [41]. Трибосистеми з гідродинамічним змащуванням мають кращі трибологічні характеристики, але їх потрібно оцінити [42]. В роботі не виявлено закономірності від зміни коефіцієнтів тертя з функціональними добавками в оливі. Забезпечення стійкості оливи у важконавантажених трибосистемах, можливо за рахунок використання оливи на основі стеаринової кислоти та ізоціаната [43]. Необхідно додатково встановити вплив даних видів мастил на експлуатаційні присадки. Роботу присадок на різних етапах експлуатації можливо оцінити за рахунок оцінки критерія якості трибосистеми [44], але додатково потрібно розробити алгоритм рекомендацій підбору функціональних добавок.

Вирішення проблеми підвищення довговічності трибоелементів вимагає комплексного підходу і розгляду кожного елементу трибоспряжень, що позитивно впливає на точність визначення характеристик робочих поверхонь деталей. Дослідження формування поверхневих шарів з трибологічно активних добавок на робочих поверхнях деталей при експлуатаційних умовах потребують більшої кількості силових агрегатів машин. Практично відсутні дослідження динаміки формування покриттів, що цілеспрямовано змінюють зносостійкість деталей спряжень в композиційному оливному середовищі.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є формування трибологічно активної добавки та визначення її раціонального складу до робочої оливи, що дає змогу покращити фізико-механічні характеристики трибосистеми.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– запропонувати складові компоненти трибологічно активної добавки та узгодити їх вміст, для отримання мінімальних значень величини зношування, а також максимальних значень критичного навантаження та навантаження зварювання трибоспряження типу "кулька-кулька";

– встановити граничні значення експлуатаційної дії трибологічно активної добавки в лабораторних умовах для трибосистеми "кулька-робоча олива-кулька", а саме критичне навантаження та навантаження зварювання в контактах трибосистеми.

4. Матеріали і методи формування та дослідження характеристик трибологічної добавки до оливи

З практичної точки зору встановлено, що збільшення якості оливи можливе за рахунок введення в неї функціональних активних присадок. За таких умов розробка та використання трибологічно активних добавок дає можливість, за допомогою їх введення в оливу, формувати робочі оливи для різних умов та режимів експлуатації. До цих режимів також доцільно проводити трибологічні

дослідження на сумісність присадок та їх ефективність. В якості базової оливи використовували трансмісійну оливу Grom Ex QUATTRO API GL – 5 80W-90.

В якості основних компонентів для трибологічно активної добавки було обрано: метакаолін МК-40; дисперсійний порошок глини з Катеринівського родовища; олеат натрію; літій гідроксид; сірка. Кожен з цих компонентів відіграє значну роль підчас тертя. Метакаолін дає можливість активувати робочу поверхню металевих зразків та виконує локальне шаржування в приповерхневі шари зразків. Дисперсійний порошок глини з Катеринівського родовища формує на робочих поверхнях тертя керамічне покриття та включення в гелевих складових які можуть створюватись з олеату натрію та літію гідроксиду. Також його частинки частково відкладаються на поверхнях металевих зразків і слугують в якості твердого змащування в граничних режимах тертя. Сірка дає зменшення утворення задири́в підчас активації метакаоліном. Кількість кожного елементу складу добавки підбирали дослідним шляхом. Метакаолін та дисперсійний порошок Катеринівського родовища попередньо проходили етап очищення та подрібнення. Очищення відбувається шляхом розмочування неочищеного порошку 300 г/л в дистильованій воді і перемішування на протязі 30 хв. при 300 об/хв гомогенізатором HG-15A.

Після цього розчин залишали на 3 хв., щоб важкі частинки сіліцієвмісних домішків осіли. Верхній шар 95 % від об'єму отриманого розчину зливали і піддавали випарюванню при температурі 100 °С.

Наступним етапом є подрібнення елементів добавки, який проходить з використанням електричного подрібнювача. Подрібнення виконували на протязі 35 хв для кожної порції порошку (50 г).

Закінчивши операцію помолу, порошок просіювали на лабораторному ситі, щоб отримати фракцію розміром не більше 100 мкм, щоб частинки добавки практично не зазнавали явища седиментації. Для просіювання обрано лабораторне сито GB/T6003.1-2012 з розміром комірки 74 мкм.

Просіюванні фракції порошкового матеріалу в подальшому проходять етап формування трибологічної добавки. Зважування кожного елементу добавки виконується на вагах ТВЕ-0.21-0.001, другий клас точності ДСТУ EN 45501.

Попередній підбір ваги складових одиниць добавки здійснювали в лабораторних умовах: базова олива 50 мл, метакаолін (50...550 мг), дисперсійний порошок глини Катеринівського родовища (250...750 мг), олеат натрію (650...1150 мг), літій гідроксид (50...550 мг), сірка (50...550 мг).

Рідку дисперсію проб трибологічно активної добавки формували за допомогою гомогенізатора перемішуванням кожної проби. Перемішування виконували на протязі 20 хв при кімнатній температурі, кількість обертів збільшували через кожні 5 хв на 1000 об/хв, початкове значення обертів гомогенізаторів 1000 об/хв. Формування робочої оливи відбувалось при перемішуванні 50 мл трибологічної добавки з 1 л. свіжої оливи, перемішування виконували гомогенізатором 10 хв. при 1000 об/хв.

Через точковий контакт зразків чотирикулькова машина тертя служить надійним інструментом для визначення мастильної здатності базових олів та їх композицій, ефективності присадок та добавок до мастильних матеріалів.

Досліди проводили на оливній композиції GL-5 80W-90+ сформована добавка. Чотирикулькова машина тертя, в якій випробовували оливні середовища трибоспряжень в піраміді з чотирьох кульок, із яких три нижніх кульки закріплені нерухомо в чашці, куди заливається випробувальна олива, а верхня кулька обертається у вертикальному шпинделі. Чотирикулькову машину тертя, використовували для дослідження мастильної здатності композиційних мастильних матеріалів [2]. В процесі дослідження визначали усередненні значення критичного навантаження, навантаження зварювання, показника зносу, що характеризується діаметром плями зносу від прикладеного критичного навантаження для відповідних мастильних середовищ. Випробування та визначення характеристик мастильних середовищ на чотирикульковій машині тертя проводили відповідно до однотипних стандартів ГОСТ 9490-75, в Німеччині DIN 51350, в США ASTM D2783.

Для виявлення оптимальних значень складу трибологічної добавки потрібно провести оптимізацію її складу.

В процесі активного експерименту досліджували вплив складу добавки на зміну трибологічних характеристик, фактори та їх рівні відображено в табл.1. Відгуками або результуючими ознаками під час експерименту слугували: Y1 – величина зношування (мм) → min; Y2 – критичне навантаження (Н) → max; Y3 – навантаження зварювання (Н) → max.

Таблиця 1

Формування факторів та їх рівнів для експерименту

Фактори	Рівні	
	Нижній (-1)	Верхній (+1)
X1 – вміст метакаоліну, мг/50мл	100	500
X2 – вміст дисперсійного порошку глини Катеринівського родовища, мг/50мл	300	700
X3 – вміст олеату натрію, мг/50мл	700	1100
X4 – вміст літію гідроксиду, мг/50мл	100	500
X5 – вміст сірки, мг/50мл	100	500

Попередній вибір рівнів факторів здійснено на основі формалізації апріорної інформації ряду експериментів [1,2,6,23 та ін.]. Значення нижніх рівнів факторів встановлено відповідно їх впливу на відповідну функцію відгуку або можливості прояву негативних процесів у спряженні під час процесу тертя. Вміст метакаоліну в розмірі менше 100мг/50мл сприяє значному спаду та нестійкому отриманні значень такої функції відгуку, як навантаження зварювання. Вміст дисперсійного порошку глини Катеринівського родовища менше 300мг/50мл сприяє значному спаду та нестійкому отриманні значень величини зношування та критичного навантаження в трибологічному контакті. Вміст олеату натрію в розмірі 700мг/50мл характеризується очищенням локальної робочої поверхні і формування кращого доступу частинок метакаоліну та дисперсійного порошку Катеринівського родовища до неї. Вміст літію гідроксиду в розмірі менше

100мг/50мл призводить до інтенсифікації явища седиментації частинок метакаооліну та дисперсійного порошку глини. Вміст сірки в розмірі 100мг/50мл характеризується достатньою задиростійкістю, що добре себе зарекомендувало при стабілізації величини зношування в початкові режими пуску в присутності частинок метакаооліну та дисперсійного порошку. Значення верхніх рівнів факторів встановлено відповідно їхнього впливу та обмежень, що ставляться до робочих олив. Вміст метакаооліну обмежується через його значну поверхневу активність, тобто при вмісті більше ніж 500мг/50мл оливи він значно впливає на синтетичні поверхнево-активні присадки базової оливи, тим самим зменшує її в'язкість при незначних температурних режимах. Вміст дисперсійного порошку в розмірі 500мг/50мл оливи обмежується, через його високу здатність до кластеризації, що в свою чергу сприяє утворення додаткових частинок зношування. Вміст олеату натрію в розмірі 1100мг/50мл обмежується через його високу емульгуючу та миючу здатність. При більших значеннях вмісту олеату натрію в оливі інтенсифікується утворення водооливної емульсії, що призводить до інтенсифікації корозійного зношування. Також вміст олеату натрію більше зазначеного сприяє змиванню робочої оливи з поверхні тертя, що в свою чергу створює умови граничного змащення. Вміст літію гідроксиду в розмірі 500мг/50мл обмежується через його високу загусну здатність, що сприяє збільшенню густини робочої оливи навіть при температурі оливи порядку 0°C. Вміст сірки в розмірі 500мг/50мл обмежується через інтенсивність процесу окислення оливи. За базові рівні фактору було прийнято середнє значення фактору між його початковим та критичними значенням впливу на будь-яку функцію відгуку.

Для проведення експерименту було прийнято рішення досліджувати п'ять факторів та їх два рівні. При цьому кількість експериментів, які повинні проводитись, можливо розрахувати за формулою:

$$N_e = 2^{n_f}, \quad (1)$$

де 2 – кількість рівнів, n_f – кількість факторів.

За формулою (1) визначено, що 32 експерименти потрібні для вирішення завдань оптимізації. Був сформований план повнофакторного експерименту із зазначенням рівнів та факторів, а також функцій відгуку експерименту. З метою зменшення впливу на результати відгуку, експерименти необхідно виконувати у випадковій послідовності.

Аналіз даного плану експерименту виконували з використанням портативного програмного забезпечення (Statistica 10.0.1011.0, CD-key 42347678921334567692). Обробку результатів експерименту проводили на основі регресійного аналізу, тобто будували математичну модель та визначали невідомі коефіцієнти регресійного рівняння:

$$\begin{aligned}
Y = & b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + \\
& + b_6 \cdot X_1 \cdot X_2 + b_7 \cdot X_1 \cdot X_3 + b_8 \cdot X_1 \cdot X_4 + b_9 \cdot X_1 \cdot X_5 + b_{10} \cdot X_2 \cdot X_3 + \\
& + b_{11} \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{12} \cdot X_2 \cdot X_5 + b_{13} \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{14} \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{15} \cdot X_4 \cdot X_5.
\end{aligned} \quad (2)$$

Вид даної моделі характеризується наявністю лінійних та парних ефектів на основі аналізу отриманих експериментальних даних, а також можливістю автоматизованого режиму побудови розширеної матриці експерименту.

Було визначено, що ефекти взаємодії факторів вищих рівнів практично відсутні, а тому вони не були включені в загальний вигляд моделі (2). Визначення невідомих сталих коефіцієнтів проводили за методом найменших квадратів. Коефіцієнти отриманої моделі розраховували за наступними формулами:

$$b_0 = \sum_{i=1}^N Y_i / N; \quad b_j = \sum_{i=1}^N Y_i X_{ji} / N; \quad b_{j^2} = \sum_{i=1}^N Y_i (X_{ji})^2 / N. \quad (3)$$

Опис факторів та відгуку за допомогою математичної моделі (2) характеризується коефіцієнтом детермінації, який повинен бути не менше 0,95, для якісного опису об'єкту дослідження, цей коефіцієнт розраховується за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_{zl}^2}{\sigma_Y^2} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \right), \quad (4)$$

де σ_{zl}^2 , σ_Y^2 – дисперсії залишків регресії, відгуку; Y_i , \bar{Y} , \hat{Y}_i – фактичне, середнє, розрахункове значення відгуку.

Стандартна помилка, яка характеризує стандартне відхилення досліджуваних коефіцієнтів регресії від середнього значення, розраховується за формулою:

$$S_{b_{j^r}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \cdot \frac{1}{n-2}}, \quad (5)$$

де n – об'єм вибірки.

З статистичної точки зору оцінка значень коефіцієнтів регресії здійснюється за критерієм Стюдента. При цьому порівнюють розрахункове значення з табличним при заданому довірчому рівні значущості 0,05 та розрахованими ступенями вільності:

$$\left| t_{\alpha, f} \right| = \left| \frac{b_{j^r}}{S_{b_{j^r}}} \right| > t_{\alpha/2, f_{tb}}, \quad (6)$$

де b_{j^r} – оціночні коефіцієнти регресії, α – довірчої ймовірності 0,95, f – ступінь вільності. При значимому коефіцієнті регресії розрахунковий критерій Стюдента більше за табличний.

Розрахунок граничної похибки відхилення встановлювали з наступних розрахунків:

$$\Delta_{j^r} = t_{\alpha, f, tb} \cdot S_{b_{j^r}}, \quad (7)$$

Визначення довірчого інтервалу для кожного коефіцієнту регресії проводили згідно нерівності:

$$b_{j^r} - \Delta_{j^r} \leq b_{j^r} \leq b_{j^r} + \Delta_{j^r}, \quad (8)$$

Відповідність математичній моделі до експериментальних даних, тобто її адекватність визначали за критерієм Фішера F . При цьому розрахунковий критерій повинен бути більший за табличний:

$$F = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_Y^2} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{f_2}{f_1} \geq F_{\alpha, f, tbl}, \quad (9)$$

де $\sigma_X^2 = \left(\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right) / f_1$ – дисперсія фактору; f_1 – ступінь вільності;

$\sigma_Y^2 = \left(\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \right) / N - f_1 - 1$ – дисперсія відгуку, N – кількість експериментів,

R^2 – коефіцієнт детермінації.

Для вирішення завдання оптимізації використовували метод аналізу функції бажаності Е. К. Харрінгтона. Даний метод має такі корисні властивості як безперервність, монотонність та гладкість. В даному методі перерахунок конкретних параметрів в абстрактні числові значення є доволі простий. За основу перерахунку використовують логічну функцію вигляду:

$$d_i = \exp(-\exp(-Y_i)), \quad (10)$$

де Y – функція відгуку.

Функція (10) характеризується двома ділянками насичення ($d \rightarrow 0$ та $d \rightarrow 1$) та лінійною ділянкою ($d \rightarrow 0.2$ та $d \rightarrow 0.63$). Для більш якісного абстрактного уявлення функції бажаності необхідно її розбити на діапазони де конкретні значення шкали бажаності відповідають досліджуваним показникам. Формування багатofакторної оптимізації функцію бажаності здійснювали за наступною формулою:

$$Z = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}. \quad (11)$$

Подальше дослідження функції бажаності повинно визначати аналіз відносно досліджуваних відгуків та факторів процесу. Значення умови оптимуму відгуку задавали межами бажаного рівня відгуку. В цих межах здійснювали відбір найбільш відповідних значень факторів. Зазначимо, що метод функції бажаності є візуальним.

5. Результати вибору раціонального складу трибологічно активної добавки до оливи та отримання закономірностей зношування відповідних промислових присадок

На основі проведення трибологічних досліджень запропонованої активної добавки на чотирикульковій машині тертя сформовано наступну експериментальну базу даних табл. 2, з якої потім в автоматизованому режимі будується розширена матриця для виявлення парних ефектів.

Обробка експериментальних даних з використанням прикладного програмного забезпечення дає можливість автоматизувати розрахунки, за наведеними формулами. Регресійний аналіз експериментальних результатів відображено в табл. 3–5, незначимі коефіцієнти в таблиці не вказано.

Для більш точного відображення результатів експерименту математичну регресійну модель ускладнювали до другого порядку залежності факторів без взаємодії, при умові, що коефіцієнт детермінації повинен бути не нижче значення 0.95. Аналізуючи дані табл. 3–5 можливо зробити висновок, що всі включені фактори є статистично значимі, про що свідчить рівень їх значимості, модель, що описує процес тертя з трибологічно активною добавкою. Підставляємо дані таблиць у загальний вигляд регресійних рівнянь отримуємо:

$$Y_1 = 0.638 - 4.3 \cdot 10^{-4} \cdot (X_2) - 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot (X_3) - 8.5 \cdot 10^{-4} \cdot (X_4) + \\ + 1.76 \cdot 10^{-4} \cdot (X_5) + 2.8 \cdot 10^{-7} \cdot (X_2 \cdot X_3) + 4.1 \cdot 10^{-7} \cdot (X_2 \cdot X_4) + \\ + 2.4 \cdot 10^{-7} \cdot (X_3 \cdot X_4) + 8.9 \cdot 10^{-7} \cdot (X_4 \cdot X_5) \quad (12)$$

$$Y_2 = 1145.59 - 2.45 \cdot 10^{-1} \cdot (X_1) + 4.64 \cdot 10^{-1} \cdot (X_2) - 7.56 \cdot 10^{-1} \cdot (X_4) - \\ - 6.21 \cdot 10^{-1} \cdot (X_5) + 1.0 \cdot 10^{-3} \cdot (X_1 \cdot X_2) + 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot (X_2 \cdot X_3) + \\ + 1.08 \cdot 10^{-3} \cdot (X_2 \cdot X_4) + 4.61 \cdot 10^{-4} \cdot (X_3 \cdot X_4) + 8.5 \cdot 10^{-4} \cdot (X_3 \cdot X_5) \quad (13)$$

$$Y_3 = 2739.05 - 1.09 \cdot (X_1) - 1.378 \cdot (X_2) - 1.6 \cdot 10^{-3} \cdot (X_1 X_4) - \\ - 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot (X_1 X_5) + 1.4 \cdot 10^{-3} \cdot (X_2 \cdot X_3) + 1.85 \cdot 10^{-3} \cdot (X_4 \cdot X_5) \quad (14)$$

Таблиця 2
Експериментальна база даних

№ Експерименту (порядковий № проведення експерименту)	Фактори					Функції (Відгуки)		
	X1	X2	X3	X4	X5	Y1, мм	Y2, Н	Y3, Н
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1(27)	-1	-1	-1	-1	-1	0.398	991	2218
2(8)	+1	-1	-1	-1	-1	0.392	979	2539
3(1)	-1	+1	-1	-1	-1	0.328	942	2074
4(11)	+1	+1	-1	-1	-1	0.321	1031	2424
5(6)	-1	-1	+1	-1	-1	0.367	883	2078
6(15)	+1	-1	+1	-1	-1	0.351	861	2421
7(21)	-1	+1	+1	-1	-1	0.328	652	2185
8(26)	+1	+1	+1	-1	-1	0.332	751	2505
9(14)	-1	-1	-1	+1	-1	0.227	947	2284
10(19)	+1	-1	-1	+1	-1	0.256	947	2367
11(28)	-1	+1	-1	+1	-1	0.231	1083	2151
12(27)	+1	+1	-1	+1	-1	0.261	1204	2232
13(22)	-1	-1	+1	+1	-1	0.232	919	2156
14(32)	+1	-1	+1	+1	-1	0.265	901	2243
15(24)	-1	+1	+1	+1	-1	0.279	871	2282
16(3)	+1	+1	+1	+1	-1	0.312	971	2364
17(25)	-1	-1	-1	-1	+1	0.551	937	2285
18(30)	+1	-1	-1	-1	+1	0.522	907	2361
19(12)	-1	+1	-1	-1	+1	0.481	871	2158
20(29)	+1	+1	-1	-1	+1	0.471	978	2243
21(10)	-1	-1	+1	-1	+1	0.524	965	2187
22(13)	+1	-1	+1	-1	+1	0.501	926	2234
23(17)	-1	+1	+1	-1	+1	0.482	678	2284
24(31)	+1	+1	+1	-1	+1	0.464	798	2361
25(29)	-1	-1	-1	+1	+1	0.525	801	2605
26(16)	+1	-1	-1	+1	+1	0.531	756	2447
27(5)	-1	+1	-1	+1	+1	0.546	918	2481
28(5)	+1	+1	-1	+1	+1	0.571	1005	2324
29(7)	-1	-1	+1	+1	+1	0.531	869	2483
30(4)	+1	-1	+1	+1	+1	0.543	839	2321
31(9)	-1	+1	+1	+1	+1	0.587	812	2606
32(2)	+1	+1	+1	+1	+1	0.604	885	2442

Для оцінки адекватності моделей проводили дисперсійний аналіз експериментальних даних та визначали критерій Фішера. Реалізація дисперсійного аналізу відображено в табл. 6–8.

З табл. 6–8 можна бачити, що включені фактори в математичну модель (12)–(14) адекватно описують досліджуваний процес тертя з трибологічно акти-

вною добавкою, оскільки рівень значимості p для кожного фактору є нижче допустимого рівня.

Додатково необхідно оцінити викиди залишків між дослідними та прогнозованими значеннями за отриманими моделями (12)–(14). Значні викиди в розмірі $\geq 10\%$ дослідних значень (сині маркери) від прогнозних значень (червона лінія) не повинні бути присутніми в аналізованих даних експерименту. У випадку, коли залишки $\geq 10\%$ модель не можна приймати для подальших досліджень. Результати викидів залишків відповідних моделей представлено на рис. 1.

Таблиця 3

Регресійний аналіз експериментальних результатів для результуючої ознаки Y_1

$R^2 = 0.9991$ – коефіцієнт детермінації регресійної моделі експериментальних даних						
Коефіцієнти регресії	Регресійні коефіцієнти (значення)	Стандартна помилка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості p , ($p < 0,05$)	Довірчий інтервал – 95 %	Довірчий інтервал – 95 %
b_0	0.638	0.032	20.19	$1.0 \cdot 10^{-6}$	0.56	0.72
b_2	$-4.3 \cdot 10^{-4}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$	-8.2	$1.72 \cdot 10^{-4}$	$-5.6 \cdot 10^{-4}$	$-3.1 \cdot 10^{-4}$
b_3	$-2.1 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-5}$	6.4	$7.1 \cdot 10^{-4}$	$-2.9 \cdot 10^{-4}$	$-1.3 \cdot 10^{-4}$
b_4	$-8.5 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-5}$	12.9	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$-1.01 \cdot 10^{-3}$	$-6.9 \cdot 10^{-4}$
b_5	$1.76 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-5}$	2.7	$3.7 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$
b_{10}	$2.8 \cdot 10^{-7}$	$5.4 \cdot 10^{-8}$	5.1	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$4.1 \cdot 10^{-7}$
b_{11}	$4.1 \cdot 10^{-7}$	$9.9 \cdot 10^{-8}$	4.1	$6.4 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$6.5 \cdot 10^{-7}$
b_{13}	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$6.7 \cdot 10^{-8}$	3.6	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$8.0 \cdot 10^{-8}$	$4.0 \cdot 10^{-7}$
b_{15}	$8.9 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	8.4	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 4

Регресійний аналіз експериментальних результатів для результуючої ознаки Y_2

$R^2 = 0.9961$ – коефіцієнт детермінації регресійної моделі експериментальних даних						
Коефіцієнти регресії	Регресійні коефіцієнти (значення)	Стандартна помилка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості p , ($p < 0,05$)	Довірчий інтервал – 95 %	Довірчий інтервал – 95 %
b_0	1145.59	71.06	16.12	$4.0 \cdot 10^{-6}$	971.71	1319.48
b_1	-0.245	$4.8 \cdot 10^{-2}$	1.65	$4.9 \cdot 10^{-2}$	$-6.0 \cdot 10^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-1}$
b_2	$4.64 \cdot 10^{-1}$	0.118	3.9	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	$7.5 \cdot 10^{-1}$
b_4	$-7.56 \cdot 10^{-1}$	$1.48 \cdot 10^{-1}$	5.09	$2.2 \cdot 10^{-3}$	-1.12	$3.93 \cdot 10^{-1}$
b_5	$-6.21 \cdot 10^{-1}$	$1.48 \cdot 10^{-1}$	4.19	$5.8 \cdot 10^{-3}$	$-9.8 \cdot 10^{-1}$	$-2.58 \cdot 10^{-1}$
b_6	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	3.17	$1.91 \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
b_{10}	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	9.8	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
b_{11}	$1.08 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	5.21	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$6.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$
b_{13}	$4.61 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	3.05	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$9.1 \cdot 10^{-5}$	$8.3 \cdot 10^{-4}$
b_{14}	$8.5 \cdot 10^{-4}$	$1.52 \cdot 10^{-4}$	5.64	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$4.8 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 5

Регресійний аналіз експериментальних результатів для результуючої ознаки Y_3

$R^2 = 0.9979$ – коефіцієнт детермінації регресійної моделі експериментальних даних

Коефіцієнти регресії	Регресійні коефіцієнти (значення)	Стандартна помилка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості p , ($p < 0,05$)	Довірчий інтервал –95 %	Довірчий інтервал –95 %
b_0	2739.05	60.8	44.9	$8.0 \cdot 10^{-7}$	2590.08	2888.02
b_1	1.099	$1.2 \cdot 10^{-1}$	8.6	$1.3 \cdot 10^{-4}$	0.788	1.41
b_2	-1.378	$1.01 \cdot 10^{-1}$	13.6	$1.0 \cdot 10^{-5}$	-1.626	-1.13
b_8	$-1.6 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	7.89	$2.19 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
b_9	$-1.5 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	7.69	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
b_{10}	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	13.79	$9.02 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
b_{15}	$1.85 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	9.01	$1.04 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 6

Дисперсійний аналіз експериментальних результатів для результуючої ознаки Y_1

Коефіцієнти	Дисперсія	Критерій Фішера	Рівень значимості p , ($p < 0,05$)
b_2	$4.35 \cdot 10^{-4}$	13.15	$2.27 \cdot 10^{-3}$
b_3	$2.5 \cdot 10^{-4}$	7.65	$1.3 \cdot 10^{-2}$
b_4	$3.0 \cdot 10^{-3}$	91.92	$2.1 \cdot 10^{-6}$
b_5	$3,94 \cdot 10^{-1}$	119.27	$3.4 \cdot 10^{-7}$
b_{10}	$2.21 \cdot 10^{-3}$	66.81	$7.4 \cdot 10^{-7}$
b_{11}	$1.45 \cdot 10^{-2}$	436.6	$1.2 \cdot 10^{-7}$
b_{13}	$3.2 \cdot 10^{-3}$	96.7	$3.6 \cdot 10^{-6}$
b_{15}	4.48	136.5	$5.3 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 7

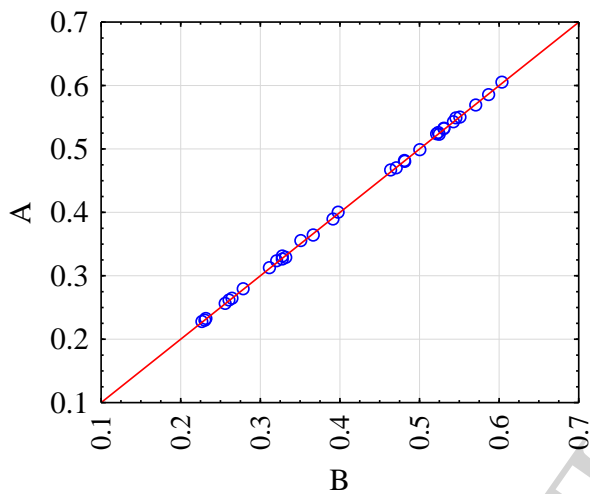
Дисперсійний аналіз експериментальних результатів для результуючої ознаки Y_2

Коефіцієнти	Дисперсія	Критерій Фішера	Рівень значимості p , ($p < 0,05$)
b_1	1250.0	109.8	$1.42 \cdot 10^{-8}$
b_2	756.7	1.48	$2.0 \cdot 10^{-15}$
b_4	10440.1	101.94	$2.41 \cdot 10^{-8}$
b_5	30504.0	297,85	$9.2 \cdot 10^{-12}$
b_6	30752.0	300.27	$8.62 \cdot 10^{-12}$
b_{10}	71442.0	697.58	$1.3 \cdot 10^{-14}$
b_{11}	72010.0	703.12	$1.2 \cdot 10^{-14}$
b_{13}	8712.0	85.06	$8.4 \cdot 10^{-8}$
b_{14}	26106.13	254.91	$3.0 \cdot 10^{-11}$

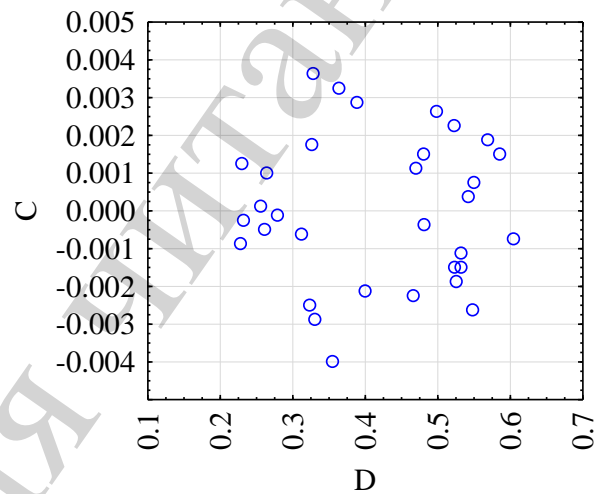
Таблиця 8

Дисперсійний аналіз експериментальних результатів для результуючої ознаки Y_3

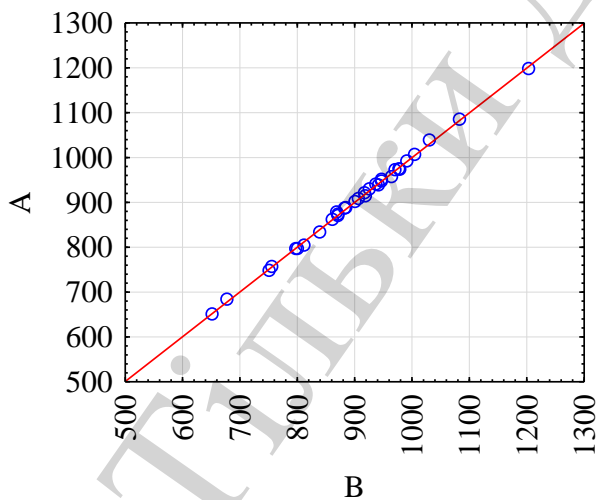
Коефіцієнти	Дисперсія	Критерій Фішера	Рівень значимості $p, (p < 0,05)$
b_1	53710.0	578.49	$5.47 \cdot 10^{-14}$
b_2	399	4.19	$4.6 \cdot 10^{-2}$
b_8	116041.5	1249.9	$1.29 \cdot 10^{-16}$
b_9	127891.5	1377.49	$5.96 \cdot 10^{-17}$
b_{10}	115800.0	1247.27	$1.31 \cdot 10^{-16}$
b_{15}	120172.5	1294.35	$9.76 \cdot 10^{-17}$



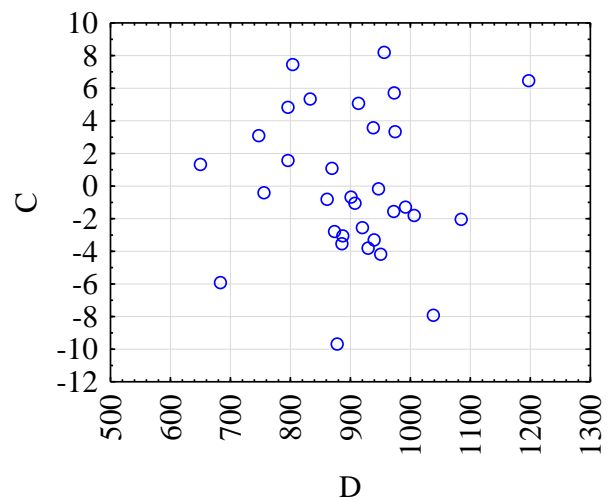
а



б



в



г

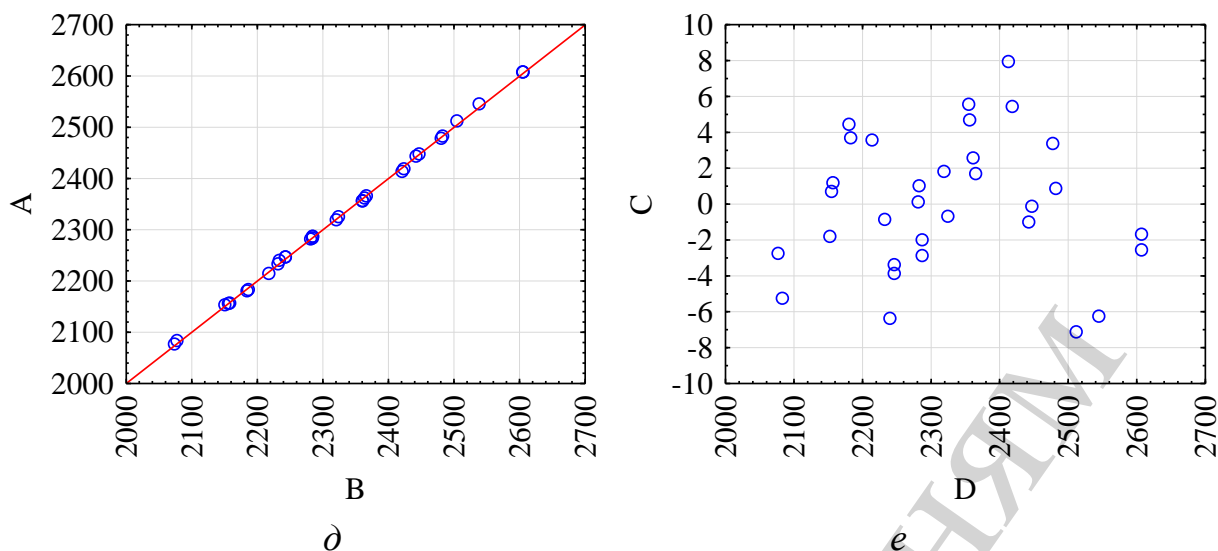
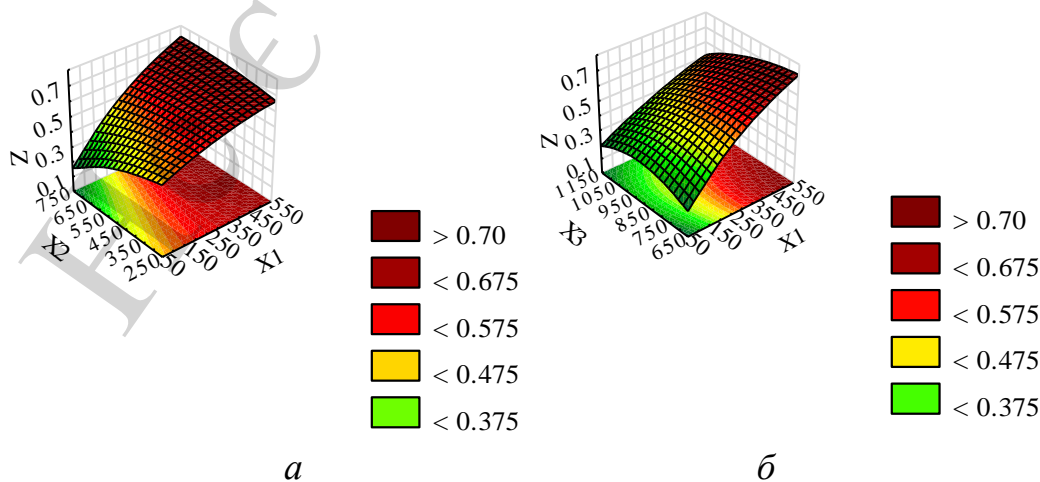
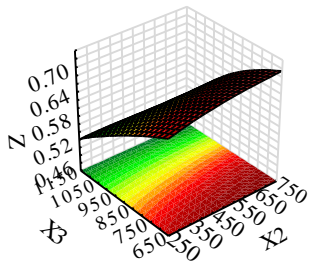


Рис. 1. Графік прогнозованих та спостережуваних залишків, а також оцінка їхнього розмаху: А – Прогнозні значення; В – Дослідні значення; С – Вихідні залишки; D – Дослідні залишки; *a, б* – для функції величини зношування; *в, г* – критичного навантажування; *д, е* – навантажування зварювання.

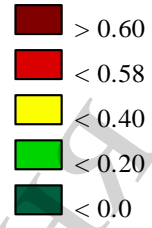
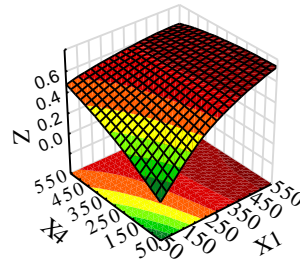
Аналізуючи рис. 6 можна спостерігати, що значних викидів даних немає, а тому математичну модель можна прийняти як достовірну.

Поверхні відгуку розвитку досліджуваних функцій відгуку досліджуваного процесу тертя з трибологічно активною добавкою, з відображеннями значень факторів та за шкалою бажаності, мають ідентичний характер і представлені на рис. 2. Рівні відгуку функції за шкалою бажаності наведено на рис. 3. Візуально аналізуючи дані графіки, можливо однозначно зазначити, що оптимальний склад трибологічної добавки присутній в досліджуваних діапазонах значень факторів X1, X2, X3 X4, X5. Реалізація оптимізації складу трибологічно активної добавки до оливи за розробленою моделлю можлива за допомогою функції бажаності.

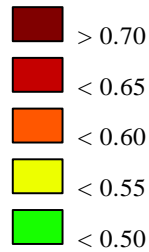
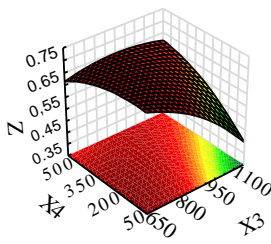




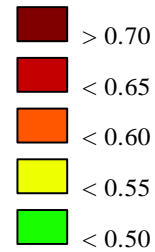
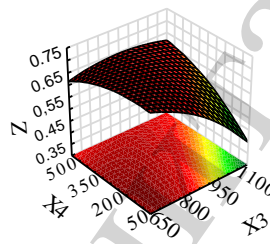
б



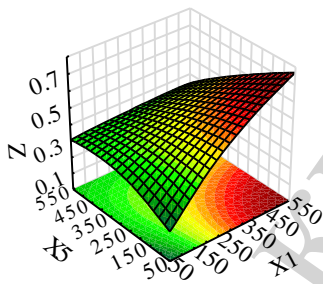
в



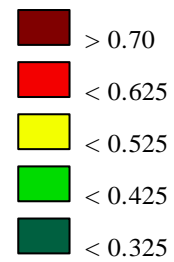
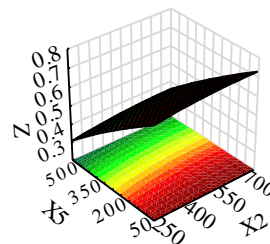
д



е



е



з

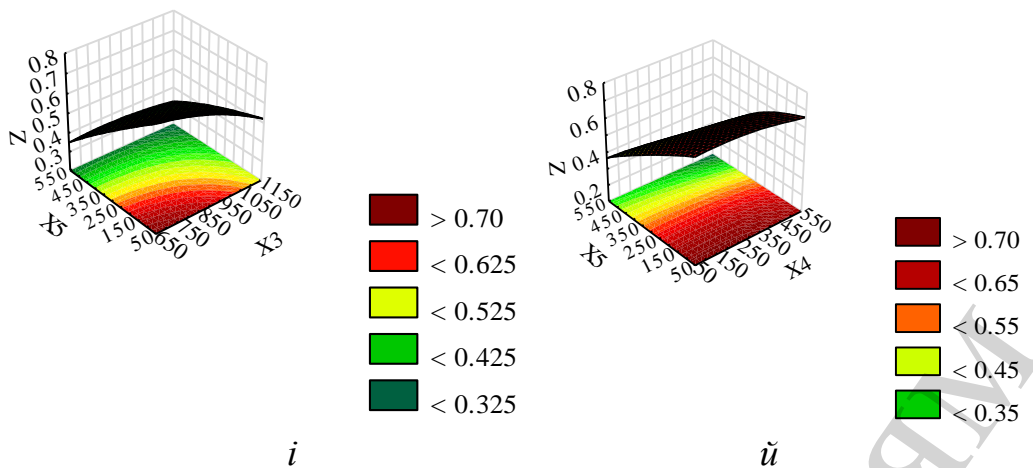
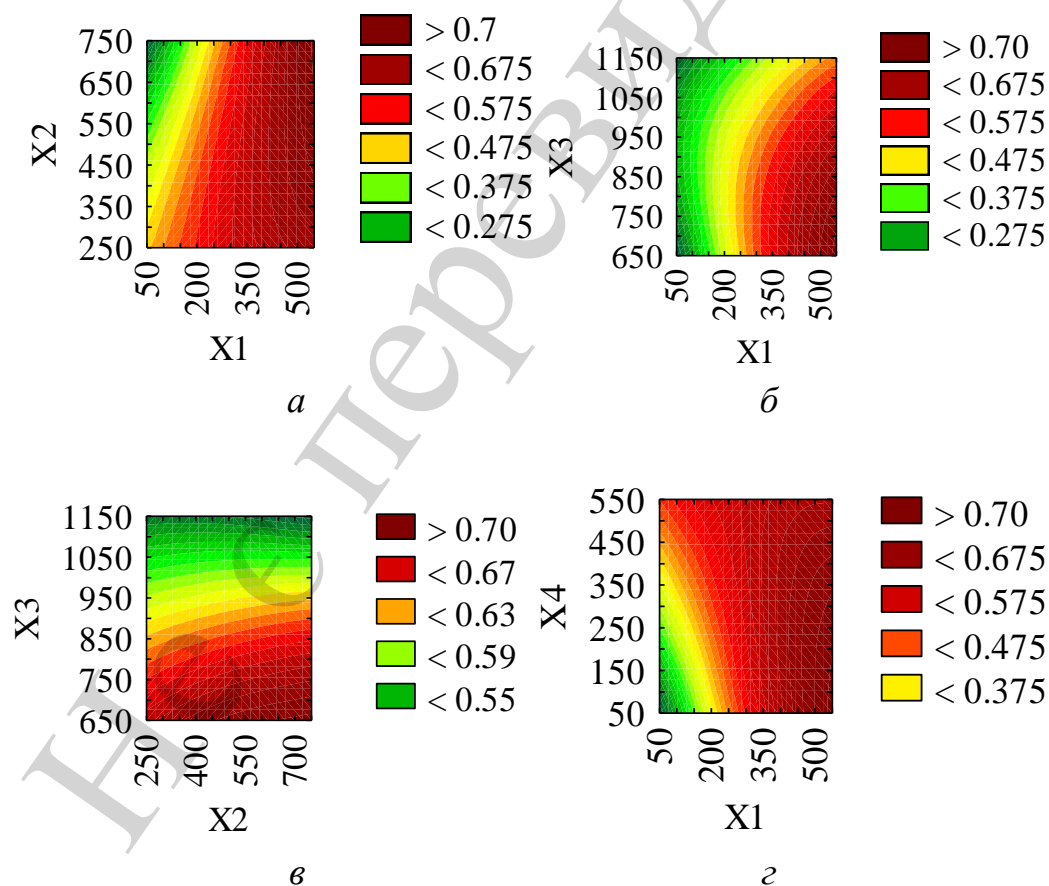


Рис. 2. Графічне відображення поверхонь відгуку за шкалою бажаності досліджуваної трибологічно активної добавки: *a* – залежність *Z* від *X2* та *X1*; *б* – залежність *Z* від *X3* та *X1*; *в* – залежність *Z* від *X3* та *X2*; *г* – залежність *Z* від *X4* та *X1*; *д* – залежність *Z* від *X4* та *X2*; *е* – залежність *Z* від *X2* та *X1*; *є* – залежність *Z* від *X5* та *X1*; *з* – залежність *Z* від *X5* та *X2*; *и* – залежність *Z* від *X5* та *X3*, *й* – залежність *Z* від *X5* та *X4*



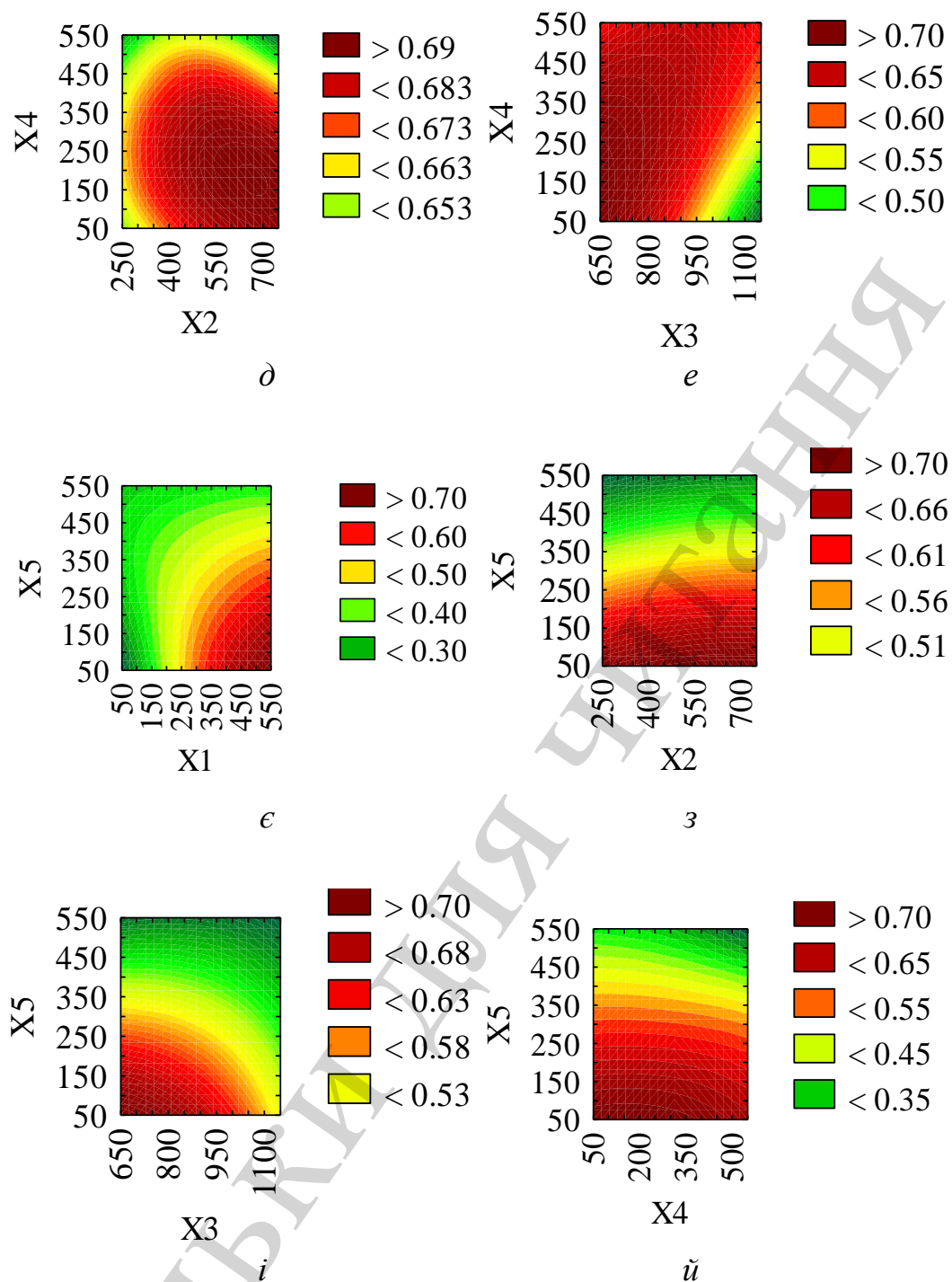


Рис. 3. Графічне відображення рівнів відгуку за шкалою бажаності досліджуваної трибологічно активної добавки: *a* – залежність Z від X_2 та X_1 ; *б* – залежність Z від X_3 та X_1 ; *в* – залежність Z від X_3 та X_2 ; *г* – залежність Z від X_4 та X_1 ; *д* – залежність Z від X_4 та X_2 ; *е* – залежність Z від X_5 та X_1 ; *з* – залежність Z від X_5 та X_2 ; *и* – залежність Z від X_5 та X_3 ; *й* – залежність Z від X_5 та X_4

Для визначення оптимального складу трибологічно активної добавки встановимо межі досліджуваного відгуку, що будуть включати в себе всю експериментальну базу даних, яка доступна для аналізу. За таких умов можливо знайти

необхідні максимальні значення відгуку за функцією бажаності. Розглянемо зазначене для кожного фактору та кожної функції відгуку. Реалізацію процедури визначення оптимізації трибологічно активної добавки представлено на рис. 4.

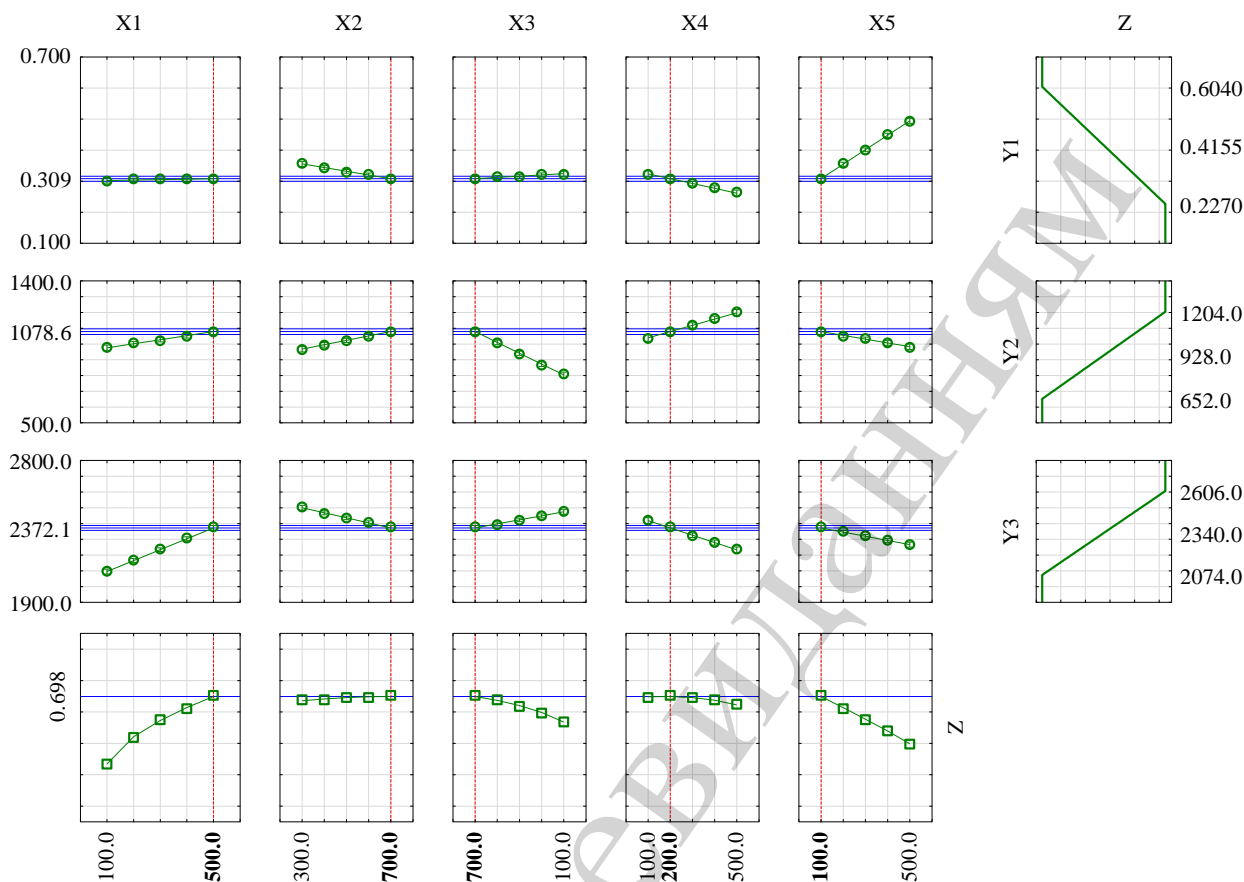


Рис. 4. Графічне відображення процедури знаходження раціонального складу трибологічно активної добавки за профілем функції бажаності

З рис. 9 можна бачити, що раціональний варіант компонентів знаходиться на перетині максимального значення функції бажаності в зазначеному інтервалі кожного фактору. При такому складі трибологічно активної добавки можливо стверджувати про раціональність вирішення прикладного завдання. Результати, що дають можливість оцінити ефективність добавки, зведені в табл. 9.

Таблиця 9

Усереднені результати випробувань на чотирикульковій машині тертя мастильних середовищах

Усереднені показники	Базова олива GL-5 80W – 90	Базова олива GL-5 80W - 90 + сформована добавка
Показник зносу, мм	0.392±0.05	0.309±0.04
Критичне навантаження, Н	893.9±3.0	1078.6±3.0
Навантаження зварювання, Н	2252±17.0	2372.1±25.0

Сформована трибологічно активна добавка дає можливість збільшити якість мастильної композиції, про це свідчать дані табл. 9. Спостерігається зменшення показника зношування в трибологічному контакті, збільшення критичного навантаження та навантаження зварювання.

6. Обговорення результатів трибологічного дослідження отриманої добавки до олів

Для приготування трибологічно активної добавки в оливу та досягнення максимальних значень відгуку в процесі тертя трибосистеми, необхідно забезпечити раціональний склад досліджуваних речовин при яких функція відгуку має максимум функції бажаності. Максимально досяжна бажаність за експериментальною базою даних та умовами оптимізації складає 0.698. Для даної величини бажаності раціональний склад трибологічно активної добавки буде містити метакаоліну на проміжку [100.0...500.0 мг/50 мл], раціональне значення – 500.0 мг/50 мл. Дисперсійний порошок глини Катеринівського родовища на проміжку [300.0...700.0 мг/50 мл] раціональне значення – 700.0 мг/50 мл. Олеат натрію на проміжку [700.0...1100.0 мг/50 мл] раціональне значення – 700.0 мг/50 мл. Літію гідрооксиду на проміжку [100.0...500.0 мг/50 мл] раціональне значення – 200.0 мг/50 мл, сірка на проміжку [100.0...500.0 мг/50 мл], раціональне значення – 100.0 мг/50 мл, відповідно до результатів рис. 4. Зазначимо, що для іншого рівня бажаності раціональний склад трибологічно активної добавки буде відрізнятися від отриманої.

Сформований склад трибологічно активної добавки дає можливість покращити фізико-механічні характеристики трибосистем. За отриманими трибологічними дослідженнями можливо стверджувати, що трибологічно активна добавка в складі з оливою є ефективною в порівнянні з базовою оливою її трибологічні характеристики. В лабораторних умовах виявлено зменшення показника зносу на 26,8 %, критичне навантаження зросло на 17,2 %, а навантаження зварювання збільшилось на 4,89 %. Робочі поверхні володіють нижчим коефіцієнтом тертя. Для більш детального дослідження функціональних покриттів за участі трибологічно активної добавки потрібно в наступних дослідженнях звернути увагу на спектрометричний аналіз функціональних покриттів зразків і деталей. Оливна композиція може бути використана для експлуатації в силових редукторах з контактним навантаженням на поверхнях зубів до 1078 Н та з піковим перевантаженням до 2372 Н, відповідно до результатів табл. 9. Найбільш раціональним для цих даних можуть бути коробки переключення передач та редуктори головної передачі транспортних машин, оскільки зазначені агрегати та їх деталі постійно працюють в умовах змінного циклічного навантаження.

Обмеження при формуванні компонентів трибологічно активної добавки за входними факторами більш детально описано при формуванні табл. 1. Шкідливий вплив на відтворення результатів насамперед – це недотримання технологічних операцій по приготуванні дисперсного порошку з глини, а також метакаоліну необхідних розмірів їх фракції. Експлуатаційні режими використання даної трибологічно активної добавки повинні в першу чергу характеризуватись її навантажувальними режимами, що зазначені вище. Обмеження підчас екс-

платуації за температурним режимом сягає близько 150°C, тому що дана межа характеризується рівнем окислення базової оливи GL-5 80W – 90.

Для подальших досліджень в напрямку формування трибологічно активних добавок ефективно використовувати витяжки та компоненти з глинистих порід.

7. Висновки

1. Виявлено раціональний склад трибологічно активної добавки: олива 50 мл., метакаолін – 500 мг/50 мл; дисперсійний порошок глини Катеринівського родовища – 700 мг/50 мл; олеат натрію – 700 мг/ 50 мл; літію гідроксиду – 200 мг/50 мл; сірка – 100 мг/50 мл.

2. Введення в оливу трибологічно активної добавки в розмірі 5,3 % в лабораторних умовах зменшує зношування на 26,8 %, збільшує критичне навантаження на 17,2 % та збільшує навантаження зварювання на 4,89 %. Встановлено, що при технічній експлуатації трибосистеми з композиційною оливою з розробленою трибологічно активною добавкою, граничне навантаження повинно не перевищувати 1078 Н, а пікове контактне перевантажування – до 2372 Н.

Література

1. Aulin, V., Hrinkiv, A., Dykha, A., Chernovol, M., Lyashuk, O., Lysenko, S. (2018). Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 4–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125349>
2. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrinkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y. et. al. (2019). Wear Resistance Increase of Samples Tribomating in Oil Composite with Geo Modifier KGMF-1. *Tribology in Industry*, 41 (2), 156–165. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.02.02>
3. Ropyak, L. Y., Shatskyi, I. P., Makoviichuk, M. V. (2017). Influence of the Oxide-Layer Thickness on the Ceramic–Aluminium Coating Resistance to Indentation. *METALLOFIZIKA I NOVEISHIE TEKHNologii*, 39 (4), 517–524. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.04.0517>
4. Aleksandr, D., Dmitry, M. (2018). Prediction the wear of sliding bearings. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (2.23), 4. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11872>
5. Kryshtopa, S. I., Petryna, D. Y., Bogatchuk, I. M., Prun'ko, I. B., Mel'nyk, V. M. (2017). Surface Hardening of 40KH Steel by Electric-Spark Alloying. *Materials Science*, 53 (3), 351–358. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0082-y>
6. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Rohovskii, I., Chernovol, M., Lyashuk, O., Zamota, T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (97)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150>
7. Kopčanová, S., Kučera, M., Kučera, M., Kučera, M., Kučerová, V. (2018). The Effect of Friction Behaviour and Wear Protection Ability of Selected

Base Lubricants on Tribo-pairs Parameters of Machine Components. *Tribology in Industry*, 40 (4), 681–691. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.14>

8. Kryshtopa, S., Kozhevnykov, A., Panchuk, M., Kryshtopa, L. (2018). Influence of triboelectric processes on friction characteristics of brake units of technological transport. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 87–93. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/10>

9. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T., Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (99)), 6–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619>

10. Levanov, I., Zadorozhnaya, E., Vichnyakov, D. (2018). Influence of Friction Geo-modifiers on HTHS Viscosity of Motor Oils. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 967–972. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_101

11. Abd Al-Samieh, M. F. (2019). Surface Roughness Effects for Newtonian and Non-Newtonian Lubricants. *Tribology in Industry*, 41 (1), 56–63. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.07>

12. Prysyzhnyuk, P., Lutsak, D., Shlapak, L., Aulin, V., Lutsak, L., Borushchak, L., Shihab, T. A. (2018). Development of the composite material and coatings based on niobium carbide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (96)), 43–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150807>

13. Ashmarin, G. M., Aulin, V. V., Golubev, M. Yu., Zvonkov, S. D. (1986). Grain boundary internal friction of unalloyed copper subjected to continuous laser radiation. *Physics and chemistry of materials treatment*, 20 (5), 476–478. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022781198&partnerID=40&md5=12a45ba637bf291f2ffb4fe3a9da90e0>

14. Shatskyi, I. P., Makoviichuk, M. V., Shcherbii, A. B. (2017). Equilibrium of cracked shell with flexible coating. *Shell Structures: Theory and Applications Volume 4*, 165–168. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315166605-34>

15. Osadchiy, S. I., Zozulya, V. A. (2013). Combined Method for the Synthesis of Optimal Stabilization Systems of Multidimensional Moving Objects under Stationary Random Impacts. *Journal of Automation and Information Sciences*, 45 (6), 25–35. doi: <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v45.i6.30>

16. Aulin, V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D., Hrynkiv, A., Lysenko, S. et. al. (2019). Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 21 (2), 3–12. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85066994460&partnerID=40&md5=105d35bd46f8ab7b6de0b6688948d0e3>

17. Osadchiy, S. I., Kalich, V. M., Didyk, O. K. (2013). Structural identification of unmanned supercavitation vehicle based on incomplete experimental data. *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. doi: <https://doi.org/10.1109/apuavd.2013.6705294>

18. Dykha, A., Aulin, V., Makovkin, O., Posonskiy, S. (2017). Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pen-

dulum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (87)), 4–10. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99823>

19. Kryshchyna, S., Kryshchyna, L., Bogatchuk, I., Prunko, I., Melnyk, V. (2017). Examining the effect of triboelectric phenomena on wear-friction properties of metal-polymeric frictional couples. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (85)), 40–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91615>

20. Prokopenko, A. K., Golubev, A. P., Korneev, A. A. (2019). Research on Wear Resistance of Multifunctional Coatings Used in the Manufacture of Art and Industrial Products. *Materials Science Forum*, 945, 670–674. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.945.670>

21. Michalec, M., Svoboda, P., Krupka, I., Hartl, M. (2018). Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry*, 40 (4), 515–528. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.01>

22. Kim, D. W., Eum, K., Kim, H., Kim, D., Mello, M. D. de, Park, K., Tsapatsis, M. (2019). Continuous ZIF-8/reduced graphene oxide nanocoating for ultrafast oil/water separation. *Chemical Engineering Journal*, 372, 509–515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.179>

23. Levanov, I., Doykin, A., Zadorozhnaya, E., Novikov, R. (2017). Investigation Antiwear Properties of Lubricants with the Geo-Modifiers of Friction. *Tribology in Industry*, 39 (3), 302–306. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.03.04>

24. Schott, M., Schlarb, A. K. (2018). Simulation of the thermal budget of plastic/metal tribological pairings by means of FEM. *Tribologie und Schmier-ungstechnik*, 65 (1), 20–26. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042685942&origin=inward&txGid=bb4744e1ee5afd75d17e3d859692393a>

25. Riva, G., Perricone, G., Wahlström, J. (2019). Simulation of Contact Area and Pressure Dependence of Initial Surface Roughness for Cermet-Coated Discs Used in Disc Brakes. *Tribology in Industry*, 41 (1), 1–13. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.01>

26. Prysyzhnyuk, P. M., Shihab, T. A., Panchuk, V. H. (2016). Formation of the Structure of Cr₃C₂-MNMts 60-20-20 Cermets. *Materials Science*, 52 (2), 188–193. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9942-0>

27. Ashmarin, G. M., Aulin, V. V., Golobev, M. Yu., Zvonkov, S. D., Mal-yuchkov, O. T. (1986). Electrical conductivity of copper after laser treatment. *Russian metallurgy. Metally*, 5, 185–189. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0022959597&origin=inward&txGid=28bce36b14862581cc8542126d58d41a>

28. Aulin, V., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Karpushyn, S., Denysiuk, N. (2018). Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologica Agriculturae*, 21 (4), 153–159. doi: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028>

29. Fedorov, S. V. (2018). Nano-Structural Standard of Friction and Wear. *Tribology in Industry*, 40 (2), 225–238. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.06>

30. Chernets, M. (2019). A Method for Predicting Contact Strength and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth

Correction. *Tribology in Industry*, 41 (1), 134–141. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.15>

31. Ratnam, C., Jasmin, N. M., Rao, V. V., Rao, K. V. (2018). A Comparative Experimental Study on Fault Diagnosis of Rolling Element Bearing Using Acoustic Emission and Soft Computing Techniques. *Tribology in Industry*, 40 (3), 501–5013. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.03.15>

32. Gritsenko, A. V., Zadorozhnaya, E. A., Shepelev, V. D. (2018). Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading. *Tribology in Industry*, 40 (2), 300–310. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.13>

33. Dykha, A., Makovkin, O. (2019). Physical basis of contact mechanics of surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 1172, 012003. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012003>

34. Kryshchtopa, S., Panchuk, M., Kozak, F., Dolishnii, B., Mykhtii, I., Skalatska, O. (2018). Fuel economy raising of alternative fuel converted diesel engines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (94)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139358>

35. Aulin, V. V., Chernovol, M. I., Pankov, A. O., Zamota, T. M., Panayotov, K. K. (2017). Sowing machines and systems based on the elements of fluidics. *IN-MATEH - Agricultural Engineering*, 53 (3), 21–28. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85039172369&origin=inward&txGid=805c325ab302d5ad2bec25c2388cc184>

36. Hiilser, P. (2018). Electroplating meets lamella - Successful combination of two coating technologies (Part 1). *Galvanotechnik*, 109 (10), 1964–1972. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85056282820&origin=inward&txGid=dc182ae475b723d4d3bf7a2668378187>

37. Aulin, V., Warouma, A., Lysenko, S., Kuzyk, A. (2016). Improving of the wear resistance of working parts agricultural machinery by the implementation of the effect of self-sharpening. *International Journal of Engineering & Technology*, 5 (4), 126. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v5i4.6386>

38. Painuly, A., Arora, A. (2019). Rayleigh wave at composite porous half space saturated by two immiscible fluids. *Applied Mathematical Modelling*, 73, 124–135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.038>

39. Matviienkiv, O., Pryszyazhnyuk, P., Myndiuk, V. (2016). Development of the zinc coating pipe connection technology with arc soldering method using. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (81)), 50–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.70346>

40. Bautista-Ruiz, J., Caicedo, J. C., Aperador, W. (2019). Evaluation of the Wear-Corrosion Process in Beta-Tricalcium(β -TCP) Films Obtained by Physical Vapor Deposition (PVD). *Tribology in Industry*, 41 (1), 126–133. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.14>

41. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hryniv, A., Pankov, A., Tykhyi, A. (2019). Analysis of tribological efficiency of movable junctions “polymeric-composite materials – steel.” *Eastern-European Journal of Enterprise*

Technologies, 4 (12 (100)), 6–15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176845>

42. Vojtov, V. A., Levchenko, A. V. (2001). The integral criterion of rating the tribological behavior of lubricating materials using a four-ball workbench. *Trenie i Iznos*, 22 (4), 441–447. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0035551335&origin=inward&txGid=b52837db51c0488cfa2ed8491e49fde3>

43. Zheleznyi, L., Pop, G., Papeikin, O., Venger, I., Bodachivska, L. (2017). Development of compositions of urea greases on aminoamides of fatty acids. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (6 (87)), 9–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99580>

44. Vojtov, V., Biekirov, A., Voitov, A. (2018). The Quality of the Tribosystem as a Factor of Wear Resistance. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 25–29. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19547>

Не є перевиданням