

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»

Освітня програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «Модифікація мастильного матеріалу для дизельного двигуна  
мідьвмісними добавками і обробкою магнітним полем»

Шифр: МРТАМ 24. 23602.000 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм -23-1 І.С. Войтюк І.С. Войтюк

Керівник

О.В. Диха д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ О.В. Диха Диха О.В.

10 12 2024 р.

Хмельницький, 2024 р.

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр  
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»  
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»  
Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

З А Т В Е Р Д Ж У Ю  
Зав.кафедрою ТАМ  
Диха О.В.  
" 15 " жовтня 2024 р.

## З А В Д А Н Н Я НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ

Войтюк Ігор Сергійович

1. Тема роботи:

**«Модифікація мастильного матеріалу для дизельного двигуна мідьвмісними добавками і обробкою магнітним полем»**

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 26 серпня 2024р. № 60

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 20.12.20.24 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Дані про конструкцію та умови роботи деталей ЦПГ дизелів
- 2) Технологічні характеристики моторних олів та додатків до них
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Нормативно – технологічна документація по випробуванням моторних олів.
- 5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз видів зношування основних спряжень деталей дизелів та методів підвищення їх зносостійкості
2. Методика теоретичних та експериментальних досліджень
3. Теоретичне обґрунтування підвищення зносостійкості спряжень ЦПГ
4. Результати експериментальних досліджень модифікування моторної оливи







# ЗМІСТ

стор.

ВСТУП.....	6
<b>1. Аналіз видів зносу головних муфт деталей дизеля та шляхів підвищення зносостійкості .....</b>	<b>7</b>
1.1 Механічні втрати, режими тертя і види зношування в головних муфтах деталей дизеля .....	7
1.2 Зміна характеристик моторної оливи в процесі експлуатації дизелів.....	
1.3 Аналіз методів зниження механічних втрат на тертя в спряженнях деталей ДВЗ.....	
1.4 Модифікування моторної оливи додаванням присадок.....	
1.5 Модифікування моторних олив обробкою магнітним полем...	
<b>2. Експериментальна методологія дослідження .....</b>	<b>23</b>
2.1 Програма досліджень.....	23
2.2 Методика теоретичних досліджень.....	24
2.3 Загальна методика експериментальних досліджень.....	24
2.4 Лабораторне обладнання для дослідження процесів тертя та зношування магістральних з'єднань дизелів КПП.....	26
<b>3. Теоретичне обґрунтування підвищення зносостійкості муфт ТСП.....</b>	<b>38</b>
3.1 Управління процесом зношування при модифікації масла додаванням присадок .....	38
3.2 Зміна властивостей при обробці композиційного моторного масла струмом і магнітним полем .....	42

МРМТВА 24.23602.000.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Модифікація мастильного матеріалу для дизельного двигуна мідьвмісними добавками і обробкою магнітним полем	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Войпок						4	80
Перевір.	Диха					ХНУ,		
Н.контр.	Бабак					гр. МТВА-23-1		
Затвер	Диха							

<b>4. Результати експериментальних досліджень впливу модифікації моторного масла на двигун.....</b>	<b>49</b>
4.1 Зміна показників та властивостей базової моторної оливи при модифікуванні присадкою та обробкою магнітним полем.....	49
4.2 Триботехнічні характеристики робочих поверхонь зразків, досліджуваних на модернізованих машинах тертя СМЦ-2, 77МТ-1 з використанням модифікованих моторних олив.....	60
4.3 Вплив фізико-хімічного модифікування оливи на властивості поверхонь тертя сполучень деталей компресора.....	73
4.4 Зміна електричного опору шару оливи в сполученнях деталей ЦПГ одноциліндрової установки та виявленні режимів їх тертя.....	80
4.5 Зміна поля напружень в сполученні зразків та деталей ЦПГ, при модифікуванні моторної оливи.....	85
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90
ДОДАТКИ.....	93

## Вступ

Проблема підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автомобільної техніки за рахунок збільшення ресурсу дизельних вузлів з часом не зменшується, а навпаки, неухильно зростає. Це пов'язано з роботою в умовах змінної питомої потужності, що збільшує термічні та механічні навантаження на деталі головної муфти та призводить до негативних наслідків, таких як зниження царапання та зносостійкості робочих поверхонь деталей. Підвищені механічні втрати. В результаті збільшується витрата палива і масла на згорання, збільшується надходження газів в картер і зменшується ресурс дизеля. Також зазначається, що через складність мастильних композицій, отриманих шляхом додавання присадок з різною функціональною дією, часто немає можливості правильно підібрати мастильний матеріал і режим роботи дизеля.

Модифікуючи масло речовинами (добавками) або обробляючи його фізичними полями (електричними, магнітними, електромагнітними тощо), можна продовжити термін служби масла шляхом зміни його фізико-хімічних параметрів і властивостей, а також підвищити зносостійкість. У деяких випадках формування антифрикційних покриттів відновлює зношені робочі поверхні деталей, але ці питання недостатньо вивчені.

Розробка підходу до керованої зміни властивостей базової моторної оливи шляхом модифікування добавками та обробки магнітним полем, з визначенням оптимальних режимів тертя в основних спряженнях деталей КПП дизельних двигунів та вдосконалення фрикційної технології. Характеристики їх робочої поверхні безумовно актуальні.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# 1. Аналіз видів зносу головних муфт деталей дизеля та шляхів підвищення зносостійкості

## 1.1 Механічні втрати, режими тертя і види зношування в головних муфтах деталей дизеля

Робочі напруги мобільних сільськогосподарських та автомобільних (АТТ) дизельних двигунів у сільськогосподарському виробництві відносно високі, що призводить до підвищення питомого тиску трибомуфт, виникнення ударних навантажень, підвищеного зносу деталей тощо. [63]. Крім того, під час виконання технічних операцій характер навантаження не є постійним. Це пов'язано з тим, що енергетичні витрати на подолання опору руху змінюються з часом. Для забезпечення високої надійності і довговічності дизеля необхідно враховувати деякі особливості його роботи і втрати потужності через наявність шкідливого опору, тобто тертя.

Розподіл механічних втрат за механізмом, муфтою і системою в дизельному двигуні (табл. 1.1) залежить від багатьох факторів, але основними з них є: конструкція дизеля, габарити, технічний стан, тип охолодження, наявність або відсутність охолоджуючий пристрій. Методи визначення наддуву, умов експлуатації та механічних втрат [24].

Таблиця 1.1 – Розподіл механічних втрат у головній муфті дизеля при номінальних обертах і 10.0% навантаженні

Складова втрат (дизельна муфта)	Відсоток втрат, %
циліндр/поршнева група	44...50
Кривошипно-шатунний механізм	23...24
система змащення	13...14
газорозподільний механізм	4...6
Система живлення та охолодження	3...6
загальна втрата	120

Результати досліджень [34. 35. 113. 143] також дають підстави вважати, що втрати на тертя в муфтах ЦПГ є найважливішими в загальному балансі

механічних втрат. В основному це викликано умовами роботи високого питомого навантаження і температури в зоні упору компресійного кільця. Зворотно-поступальний характер руху поршня виключає гідрозмазування в зонах ВМК і НДТ. Ділянки з розвиненими поверхнями тертя на поршні, мінімізація зазорів і т.д.

Загальні втрати дизеля визначаються механічним коефіцієнтом корисної дії (ККД).  $\eta_M = N_e / N_i = 0,8...0,9$ , де  $N_e$  – активна потужність;  $N_i$  – Індикатор живлення. Зверніть увагу, що механічна ефективність сильно залежить від в'язкості масла.

Для зменшення втрат на тертя в механізмах і приладах використовують різні методи. Велике значення має прикатка основних зв'язків кожної частини ЦПГ, використання спеціальних обкатки масел. Також ми ефективно використовуємо функціональні добавки до моторної оливи. Дуже важливий також матеріал трибопари [75]. Нові антифрикційні матеріали та покриття значно зменшують втрати на тертя [66].

Аналіз, проведений у дослідженні [13], показує, що характер розподілу механічних втрат для тракторних дизелів в основному подібний до такого для автомобілів, за винятком більшої частки втрат енергії через газообмін при повному навантаженні (27 %) видно, що нічого не змінилося.

У вузлах тертя дизеля можна виділити три основні режими тертя: граничне тертя, змішане тертя і гідродинамічний [33].

Граничні режими визначаються тертям тонкого поверхневого (граничного) шару деталі. Фізико-хімічні властивості цих шарів значно відрізняються від властивостей масла та основного матеріалу деталі [82]. Інтенсивність зношування деталі в цьому режимі залежить від співвідношення міцностей прикордонного шару при різанні та характеру зміни міцності по глибині матеріалу деталі. Якщо міцність шарів на зсув велика, сила тертя може досягати великих значень. Найбільш сприятливим є підвищення міцності від поверхні матеріалу в глибину, тобто позитивний градієнт механічних властивостей.

Спеціальні установки і численні експерименти на повнорозмірних дизелях показали, що тертя муфти «поршневе кільце-гільза циліндра» в основному

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

граничне (60-70% часу робочого циклу) і в меншій мірі змішане. Підтверджено, що є. і гідромеханіки (30...40 %) [32].

І навпаки, тертя в муфтах «поршень-гільза циліндра» має переважно гідродинамічний характер (70–80%) і переходить у змішане та граничне тертя (20–30%) [2.134].

Це підтверджується такими експериментальними результатами [34].

– Сила тертя кільця сильно залежить від навантаження (сила пружності кільця і тиск газу), а кількість моторного масла, що подається на робочу поверхню гільзи циліндра, мало впливає на тертя кільця.

– Вирішальний вплив на тертя поршня має в'язкість моторного масла, швидкість зміни зазору муфти «гільза циліндра поршня», профіль і площа бічних поверхонь поршня [96].

Підшипники КШМ в основному працюють в режимі рідинного тертя (90%) і переходять в режим змішаного тертя (10%) тільки при пуску-зупинці дизеля внутрішнього згоряння і в моменти максимального навантаження [17].

Існує декілька моделей, які описують умови змащення та тертя за допомогою комбінацій «поршневе кільце – гільза циліндра» та «поршень – гільза циліндра». Багато моделей [28] припускають існування гідродинамічного режиму тертя в з'єднанні «поршневого кільця і гільзи циліндра». Це підтверджують експериментальні вимірювання товщини мастильного шару в дизельних муфтах [36]. При знаходженні поршневого кільця в зоні упору (ВМК і ВМК) масло не встигає видавлюватися із зазору [34].

Поведінка поршневих кілець у критичній зоні тертя обговорюється в дослідженнях [9]. Такий режим тертя обґрунтовується залежністю сили тертя поршневих кілець від навантаження і тим, що сила тертя істотно не залежить від кількості масла, що подається.

За даними низки досліджень [8], поведінка коефіцієнта тертя, в'язкості та експериментально вимірної товщини масляного шару пов'язані з гідродинамічним режимом змащування в муфтах «поршневе кільце – гільза

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

циліндра». і підтвердити теорію. і, швидше за все, граничний режим тертя з переходом до змішаного режиму [43].

Дослідження, проведені в літературі [37], показують, що для муфт КПП і КШМ характерні такі основні види зносу: абразивний;

Молекулярний механічний знос має дуже плавний і тривалий характер. У нормальному режимі експлуатації до такого виду зносу схильні муфти «поршневе кільце і поршень», «поршневе кільце і гільза циліндра», «поршень і гільза циліндра», підшипники КШМ.

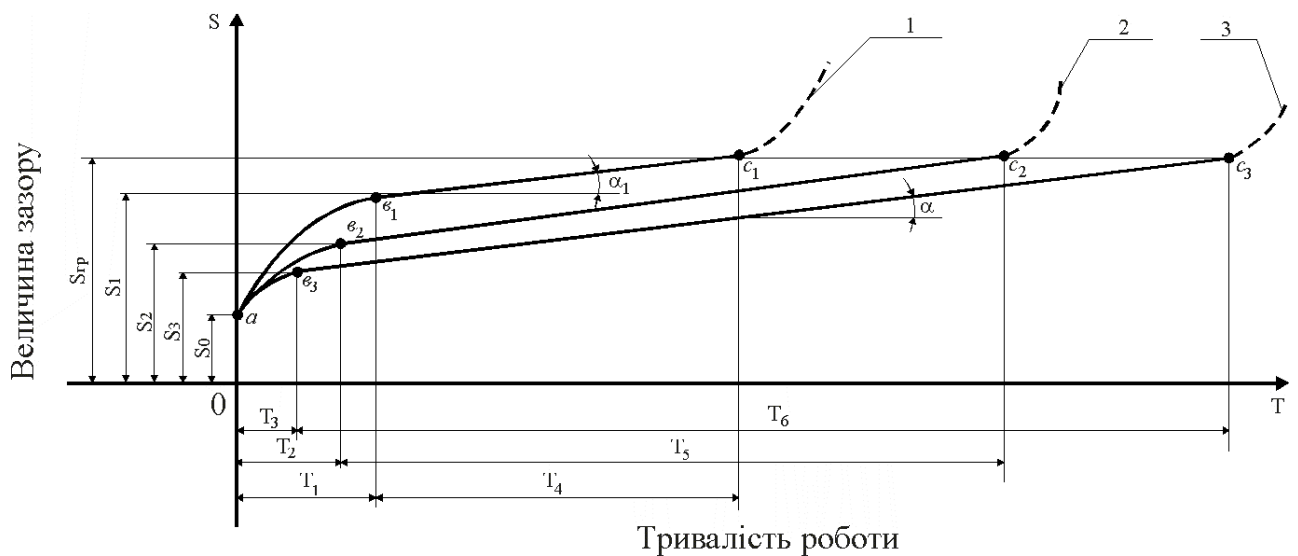
Знос є інтенсивним і призводить до швидкого виходу з ладу компонентів і несправності механізму, включаючи підвищений шум, вібрацію та витрату масла. Однак у деяких випадках знос може зіграти позитивну роль. Наприклад, контроль зносу під час обкатки та обкатки деталей дизеля внутрішнього згоряння дозволяє скоротити час і підвищити якість цих технічних операцій [5]. Знос є найбільш характерною ознакою муфт СРГ і НРМ [8].

Поршневі кільця та гільзи циліндрів піддаються корозійному зносу за несприятливих умов експлуатації, але ймовірність цього типу зносу та пов'язана з цим небезпека значно нижча, ніж у перших двох типів.

Таким чином, поліпшення ходових характеристик і термін служби дизеля залежать від стану та умов експлуатації компонентів дизеля. Аналіз балансу механічних втрат у дизельних дизелях показує, що зниження механічних втрат СПГ дозволяє поліпшити техніко-економічні показники.

Відомо, що на довговічність компонентів істотно впливає величина і характер зносу первинних муфт [8]. У дослідженні [24] враховано закономірність зношування поверхонь тертя муфти «гільза циліндра-поршневе кільце» в залежності від напрацювання дизеля. На малюнку показана залежність значень розриву зв'язку кожної частини СРГ від характеристик у часі. 1.1.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



1. 2. 3 – Криві зносу компонентних з'єднань.  $S_0, S_1, S_2, S_3$  – вихідні, межі та зазори після роботи на поверхнях тертя.  $v_1, v_2, v_3$  – точки, що відповідають періодам роботи з'єднаних деталей  $T_1, T_2, T_3$  до зносу, а  $c_1, c_2, c_3$  – точки, що відповідають періодам роботи з'єднаних деталей  $T_4, T_5, T_6$  до межі.  $\alpha, \alpha_1$  – кожен кут, величина якого характеризує зносостійкість з'єднання.

Рисунок 1.1 – Динаміка зміни ступеня зносу з'єднань КПП

## 1.2 Зміна характеристик моторної оливи при роботі дизеля

У дизельному двигуні основним сполученням компонентів можна вважати тріаду тертя, робочим органом якої є масло з добавками. Це не тільки зменшує втрати на тертя, але й підвищує довговічність, економічність і автономність дизеля. ціле.

Оскільки властивості моторної оливи змінюються в процесі експлуатації [45], важливим питанням є створення ресурсів і розробка засобів контролю її фізико-хімічних властивостей і властивостей.

Як бачите, продукти окислення та зношування можуть накопичуватися в маслі під час роботи, а вода та паливо можуть змішуватися з маслом. Частина масла випаровується і згорає у верхній частині гільзи циліндра, зменшуючи її об'єм. Добавка діє і частково втрачає свої захисні властивості. Утворення

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

продуктів окислення (смоли, карбенів, асфальтенів) призводить до забруднення поверхонь тертя і посиленого зношування.



Рисунок 1.2 – Схематична діаграма змін складу моторного масла з часом використання

Щоб уникнути підвищеного зносу і аварійних ситуацій на трибомуфтах двигунів внутрішнього згоряння необхідно уповільнити (стабілізувати) шкідливі процеси або замінити масло в двигуні.

Під час роботи масло в картері знаходиться в туманному стані, створюючи умови для концентрованої аерації.[44] Масло також відчуває високі питомі навантаження від шестерні масляного насоса, шатунів, корінних підшипників колінчастого вала і опорної шийки розподільного вала. Умови експлуатації автомобілів МСГТ і АТТ (РС) характеризуються суттєвими змінами вологості, запиленості, мастила в залежності від вмісту кисню в атмосфері, продуктів згоряння, каталізу різних металів і сплавів, навантаження на двигун тощо. І вібрація.

Для забезпечення надійного змащування деталей дизеля в таких умовах масло повинно тривалий час зберігати свої властивості, не піддаватися

окисленню, не забруднюватися різними домішками і протистояти виділенню низькотемпературних опадів. Запобігання засміченню маслоприймальних решіток маслонасосів, фільтрувальних пристроїв і маслопроводів.

На процес окислення моторного масла в основному впливає кисень. Першим продуктом цього процесу є перекис, після чого утворюються різні більш глибоко окислені продукти. Ароматичні вуглеводні з короткими бічними ланцюгами утворюють різноманітні нейтральні сполуки, що містяться в нафтах як у розчині (феноли, смоли), так і в осадах (асфальгени, карбени). Парафінові та нафтеніві вуглеводні, а також ароматичні сполуки з довгими бічними ланцюгами окислюються з утворенням кислих продуктів (асфальтогенних кислот, карбідів оксикислот) [15].

На швидкість дифузії кисню в масло і ступінь його окислення впливає поверхня окисленого масла. Усередині дизеля масло розбризкується, розбризкується та постійно циркулює, що значно прискорює процес окислення [17].

Моторне масло містить органічні речовини (сполуки смол і асфальту, частинки вуглецю, кислотні продукти окислення нафтових вуглеводнів) і неорганічні речовини (продукти зношування тертьових частин дизеля, деякі ефективні добавки, пил, пісок і т. д.). тощо) забруднена домішками. (Подібно до води тощо) Неорганічні забруднення потрапляють у моторне масло та накопичуються, викликаючи сильне зношування тертьових частин. Найбільш інтенсивно механічні домішки накопичуються в моторному маслі протягом перших 60–120 годин роботи, після чого процес стабілізується [34].

Зверніть увагу, що властивості і значення фізико-хімічних показників моторного масла змінюються з часом.

Найбільш інтенсивно в'язкість моторного масла зростає протягом перших 60-180 годин, після чого процес стабілізується і залишається практично на досягнутому рівні [8]. Кінематична в'язкість масла при 10.0°C зростає на 2.5...3.5 мм<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Це пояснюється випаровуванням на першому етапі низькокиплячої

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

малов'язкої фракції нафти і накопиченням у ній поляризованих і конденсованих продуктів окислення.

Лужність - це властивість кількості лужних присадок, введених в масло. У перший період роботи дизеля (60-120 годин) спостерігається значне зниження лужності масла. Додатки, що додаються до масла, зменшують відкладення на деталях дизеля, підвищуючи таким чином надійність роботи [17].

Продукти окислення - смола інтенсивно накопичується в маслі протягом першого періоду експлуатації (до 250 годин), після чого її вміст знижується. Це пояснюється перетворенням смоли в асфальтени в результаті процесів окислення і полімеризації. Вміст асфальтенів у нафтах зростає зі збільшенням терміну експлуатації нафти (до 450–50.0 год) у результаті полімеризації та конденсації смолистих речовин і перетворення їх в асфальтени [44].

При використанні в дизельних дизелях термоокислювальна стабільність моторного масла змінюється незначно. Корозійна активність масла досягає 20...25 г/см<sup>3</sup>. З такими змінами в моторному маслі двигун не відчуває підвищеного утворення сажі, коксування поршневих кілець або корозії вкладишів підшипників [34].

Таким чином, підвищена температура масла збільшує знос компонентів, збільшує витрату палива і збільшує масляний дим. Зміни поведінки і фізико-хімічних показників моторного масла взаємопов'язані з технічним станом дизеля.

### **1.3 Аналіз методів зменшення механічних втрат на тертя в з'єднанні деталей дизеля внутрішнього згорання**

Усі методи зниження механічних втрат у дизелях можна умовно розділити на декілька основних груп: конструктивні, технічні [6] та експлуатаційні заходи [8].

Проектні рішення включають рішення, прийняті на етапі проектування дизеля. Іншими словами, зменшіть відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна. Зменшення відношення ходу поршня до діаметра циліндра. Зменшення

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

площі спідниці поршня. Оптимізація жорсткості спідниці поршня. Зменшена маса поршня. Зменшено перекося деяких осей ЦПГ і КШМ. осьова висота, пружність, зменшення кількості поршневих кілець [30] тощо. Залежно від застосовуваного конструктивного рішення можна знизити механічні втрати на 8-10%. При цьому виникають обмеження через ускладнення конструювання дизеля внутрішнього згоряння та збільшення масляного накипу.

Відомим способом зменшення механічних втрат є відключення деяких циліндрів багаточиліндрового дизеля під час руху автомобіля без навантаження [8. 41].

Найбільш перспективним шляхом підвищення довговічності, а отже, і надійності механічних вузлів із закритими системами змащення є модифікація мастильних матеріалів (рис. 1.3).

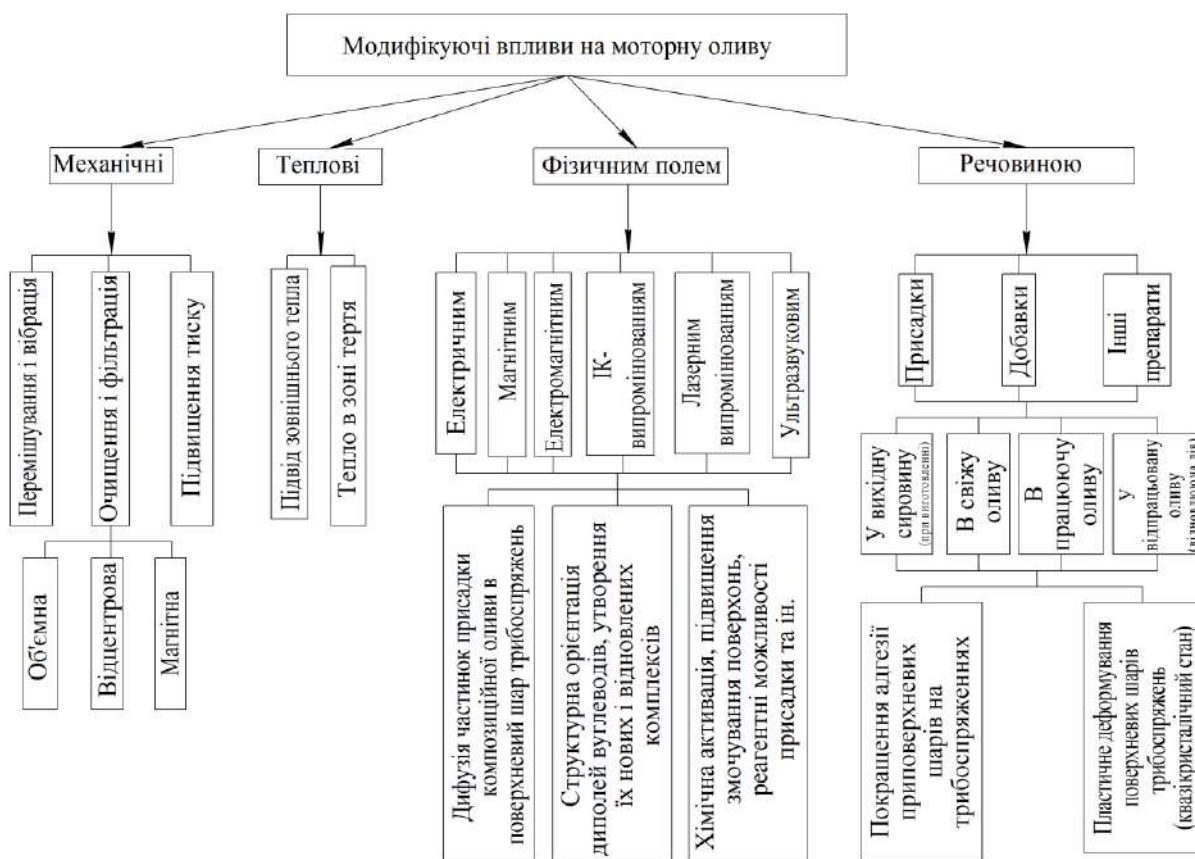


Рисунок 1.3 – Класифікація методів корекції впливу моторного масла

Зверніть увагу на наступні моменти щодо методу модифікації.

- Додавання функціональних добавок.

– Використовувати комплексні масла з металоорганічними добавками та

враховувати трибохімічні процеси, що відбуваються в зоні тертя.

- Вплив електричних полів на базові та композитні масла.
- Вплив магнітних полів на базові та композитні масла.
- Вплив електромагнітних полів на базові та композитні масла.

#### **1.4 Модифікація моторної оливи шляхом додавання присадок**

Основне призначення моторної оливи – утворювати стійку мастильну плівку для мінімізації тертя та запобігання зносу тертьових поверхонь.

Моторна олива — це переважно продукт переробки нафти, до якого вносять різні добавки для поліпшення її експлуатаційних властивостей [64]. При цьому добавки класифікують на такі види [88.137]:

- В'язкий, покращує в'язкісно-температурні властивості масел (полімерні сполуки: поліізобутилен, поліметакрилат, поліалкілстирол та ін.).
- Інгібітори, що знижують температуру коагуляції нафти (ПАР: барієві солі бісалкілфенолдисульфідів, поліметакрилати «Д» та ін.).
- Антиоксидантна та нейтралізуюча дія, зменшує утворення кислих і смолоподібних продуктів внаслідок окислення нафти, а також має нейтралізуючу дію на сполуки сірки (такі як діалкілфенілдитіофосфат цинку, кальцієва сіль дитіофосфатного ефіру). Також зменшує
- Детергенти та диспергатори перешкоджають утворенню різноманітних відкладень на деталях дизеля та утримують забруднюючі домішки в маслі у зваженому, дрібнодисперсному стані (алкілфеноляти барію, сульфонати алкілсукцинімідів барію та ін.) .
- Захист залізовмісних частин (наприклад, нітрооксиалкілсукцинімід сечовини), запобігання корозії.
- Піногасники, які зменшують схильність масел до спінювання (полімерні кремнійорганічні сполуки – такі як силікони або полісилоксани).

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

– Корозійностійкі, стійкі до корозії підшипники з кольорових металів і сплавів (сульфонатів магнію або кальцію, барієвих солей бісалкілфенолдисульфідів тощо).

– Зносостійкість, що знижує ступінь зношування пар тертя, що працюють при високих контактних тисках (наприклад, діалкіл- і діарилдитіофосфати цинку, сульфатовані олефіни, органічна сірка, фосфорвмісні сполуки).

- Протизадирні, призначені для забезпечення роботи поверхонь тертя без заїдань або пом'якшення процесу заїдань. Загалом помірні навантаження не тільки не зменшують знос, але й можуть посилити знос через хімічну взаємодію з металами, тому для нейтралізації цієї властивості їх необхідно поєднувати із зносостійкими компонентами.

У більшості випадків експлуатаційні властивості моторного масла покращуються при введенні присадок під час обкатки та експлуатації дизеля. За допомогою присадок ми намагаємося досягти функціональних властивостей поверхонь тертя, таких як зносостійкість, протизадирна, антифрикційна, антикорозійна. Ці властивості поверхні деталі можуть призвести до утворення спеціальних плівок і присадок, що містять моторне масло.

Протизношувальні та протизадирні добавки (табл. 1.2) утворюють не тільки адсорбовані та хемосорбовані плівки на поверхнях тертя, але й композиційні плівки добавково-металічних сполук [72].

Таблиця 1.2 –Протизносні та протизадирні добавки

адитивний тип	матеріал	мінуси
Запобігання вигорянню	одночасно Містить S, Cl	Ефективність змащування обмежена температурою зони тертя (до 423К)
Стійкість до стирання	Полярні групи, модифіковані хімічними елементами P, S, Cl (COOH, OH)	Ефективність змащення обмежена температурою зони тертя (до 423К) і питомим тиском (7...8МПа).

Основу складу протизносних присадок складають хімічні елементи P, S, Cl. Вони утворюють захисну плівку з фосфатів, сульфідів і хлоридів. Комплексні

сполуки, що містять як S, так і Cl, використовуються як протизадирні добавки [69]. При застосуванні добавок ми намагаємося слідувати синтетичному шляху органічних речовин, що містять P, S та Cl одночасно. Недоліками таких присадок є їх недовговічність та обмеження за температурними факторами та питомим тиском у зоні тертя.

Існуючі металовмісні добавки поділяються на такі типи: Добавки, що містять один метал. Комплексні (мультиметалічні) добавки. Добавки, що складаються з композиції металів і елементарних органічних сполук.

За дією на поверхню тертя [03] добавки поділяють на: Хімічно активний (ХП);

До складу ПАП входять жирні кислоти (олеїнова, стеаринова, пальмітинова), ефіри органічних кислот і спиртів, промисловий лецитин. Їх дія полягає в зміцненні і подальшій пластифікації поверхонь тертя. Як недолік ПАР-добавок можна відзначити експлуатаційні обмеження за температурним коефіцієнтом [39.60].

До складу ГАП входять P, S, Cl. Серед цих добавок найпопулярнішою стала добавка LZ-301 [9]. Це прозора рідина, що містить 50% сірки. Рекомендований вміст таких присадок в маслі становить 1.5-20%. На практиці популярні також дипроксидні добавки (додаються в масла в концентрації 2.5%) з вмістом сірки приблизно 48%.

Як ІІ використовують дисульфід молібдену MoS<sub>2</sub> [22], графіт, дрібнодисперсний каолін та ін. Ефективність даного виду добавки полягає у високому антифрикційному і протизносному ефекті, але недоліком є те, що вона осідає при тривалому зберіганні.

Слід звернути увагу на антифрикційні добавки (АФП) [03.136.137]. Їх можна розділити на три основні класи. Реметалізатор. кондиціонер металу.

Найчисельніший перший клас представлений такими препаратами: Аспект Модифікатор (Росія), RTFE (США), 8X747 (США), Фріктол (Україна), Молітранс (Росія), Моторол (США), Хадо (Україна) СТР з ХЕР2. (США), VR-357

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

(Німеччина) та ін. [37]. Позитивний вплив моторного масла на тертя і зносостійкість полягає в тому, що найдрібніші частинки цього продукту проникають в муфту між тертьовими частинами, тим самим утворюючи захисний шар і перешкоджаючи прямому контакту з ними. Поверхні тертя [36].

Інший спосіб дії виявлено в добавках на основі маслорозчинних сполук молібдену (наприклад, Fricol, Molyt) [42]. Практичний інтерес представляють маслорозчинні беззольні мастила, що містять сірку, фосфор і азот. Механізм їх дії пов'язаний з утворенням міцного адсорбційного шару на поверхні тертя, структура якого визначається як полярною, так і «хвостовою» частинами молекул добавки [37].

Як антифрикційну добавку графіт зазвичай використовують разом з дисульфідом молібдену [36]. Випускається багато моторних масел Marly (Бельгія) і присадок, що містять цей склад.

В умовах утрудненої роботи складових муфт при додаванні в моторну оливу присадок спостерігається ефект самозбирання, який контролює процес зношування і регенерації поверхонь тертя (вибірковий перехід). ) Не вимагає обслуговування.

Інша група присадок – відомий препарат так званих шаруватих модифікаторів тертя [08]. Вони складаються з елементів з низьким міжшаровим опором зсуву, таких як дисульфід молібдену, трисульфід молібдену, диселенід молібдену та дисульфід вольфраму.

До класу реметалізаторов відносяться такі препарати, як РайМЕТ (Росія), Металіз-6 (Швейцарія), Лубрифільм (Швейцарія). У цьому випадку АФП зазвичай містить ультрадисперсні порошки (УДП) кольорових і дорогоцінних металів, з яких найчастіше використовують мідь, свинець, олово, срібло, цинк, алюміній, нікель та їх сплави [7]. Механізм дії цього класу добавок полягає в наступному: Частинки мідного сплаву UDP (RuMET) легко осідають на дефектних ділянках контактних поверхонь тертя і частинки зносу сталі за рахунок різниці хімічних потенціалів і високої поверхневої енергії, утворюючи активні

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мідні острівці на поверхні. Трибоконтатна поверхня. В результаті частинки зносу не виходять із зони тертя і утворюють на поверхні трибоконтатта нову зносостійку дрібнодисперсну структуру. Це сприяє встановленню оптимального зазору для трибомуфти при заданому режимі роботи. Мінімізація сил і моментів тертя, а також зменшення зносу [3]

На практиці поширені добавки: «МІЛІТЕК», «ФЕНОМ», «ЕР», «Переможець трієння». Вони діють на механізми, які постачають необхідні компоненти (середовище або енергію) на металеву поверхню [66.67.88]. , 90. 152], тобто спостерігається взаємодія (адсорбція) їх поверхнево-активних компонентів (фторкарбонат, кварц, складноєфірні сполуки) з поверхнею тертя.

При цьому поверхня тертя пластифікується і на ній утворюється тонкий шар сервоплівки. Це характерно для ефектів селективної транскрипції. Використовуючи даний клас присадок, можна підвищити ресурс компонентів і їх зчеплення на робочому етапі в 3-5 разів і заощадити енергоресурси на 10-40% [6].

Незважаючи на значні переваги, добавки другого класу мають наступні недоліки:

- Їхня дія триває до тих пір, поки вони присутні в маслі в достатній концентрації.
- Взагалі такі добавки не тільки не мають антифрикційного ефекту, але навіть можуть підвищити опір тертю.
- Високі концентрації цих речовин природно впливають на реологію мастила.
- Процеси фізико-хімічних перетворень є складними і тому не мають універсальності для матеріалів і режимів роботи елементів автомобіля.

Фрикційні геомодифікатори (ГМК) (активатори) принципово відрізняються за характером дії на поверхню. Активатор виготовлений на основі природних мінералів ультраосновних порід. За наявності в моторному маслі активатора енергія тертя в зоні контакту викликає відрив дефектного шару металу, що зміцнює основний матеріал на значну глибину з одночасним текстуруванням

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

поверхні тертя [66]. Залежно від реальних умов експлуатації під час припрацювання зношеної поверхні тертя поступово відновлюється її мікроскопічна форма і на поверхні створюється оптимальна мікронерівність (зрівноважена шорсткість).

Хоча хімічний склад активатора металокерамічних (МК) шарів досить добре розроблений [42], детальної інформації щодо поверхневих і підповерхневих шарів деталей дизельного дизеля при використанні присадок немає. Аналіз літературних матеріалів.

Широко поширені хімічні методи модифікації мастил. Однією із задач, що вирішуються в цьому випадку, є стабілізація лужності масла в процесі окислення і запобігання потраплянню в нього кислотних продуктів, що утворюються при згорянні палива. У своєму дослідженні [58] автори пропонують вдосконалену систему змащування дизеля, яка включає пристрій для додавання трибохімічного відновника до робочої моторної оливи. Замість одного з фільтруючих елементів або в магістралі охолодження масляної системи рекомендується встановити пристрій, який здатний стабілізувати лужність масла в кілька разів довше певного рівня лужності. Регулярно міняйте моторне масло. При цьому частота заміни масла для АТТ збільшиться до 60 0.00 км, димність вихлопних газів знизиться на 40%, а в'язкість збільшиться на 10%. Однак така система може підвищити надійність роботи дизеля в стабільному режимі з повною системою очищення повітря і масла при переважанні корозійного зносу. Для підвищення довговічності мастилу потрібна висока нейтралізуюча здатність, а також висока стійкість до зносу та подряпин.

Одним із способів підвищення зносостійкості масла є додавання поверхнево-активних речовин (ПАР). Такою добавкою є олеїнова кислота [74], яка при кількості 1 % підвищує стійкість до злипання в 1.5 раза. Однак цей ефект спостерігається лише в дуже вузькому діапазоні навантажень, і жирні кислоти можуть утворювати корозійно активні продукти [58].

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Найпоширенішими на сьогоднішній день є добавки металевого покриття до моторних оливо, що покращують трибологічні властивості і є комплексами перехідних металів (NiCo, Cu, та ін.) [7]. Вплив комплексів перехідних металів як напівфункціональних добавок до нафтопродуктів вивчали в [9]. Аналіз цих результатів показує, що протизносна дія комплексів відрізняється для наступних рядів металів:  $Cu > Ni > Co > Mn > Fe > Ba$

При цьому найефективнішою зв'язкою з найкращими властивостями зносостійкості порівняно з нікелем, кобальтом і марганцем є мідна зв'язка. Це пов'язано з ефектом вибіркового переносу [3].

Багато дослідників, які працюють у сфері використання АТТ, підкреслюють позитивні ефекти додавання добавок на основі міді UDP [5]. Додавання міді дозволяє знизити знос тертьових деталей до 2 разів і при цьому знизити коефіцієнт тертя.

Тому перспективним видом селективного переносу є нанесення металів. Основна увага дослідників була спрямована на умови покриття та ефективність використання присадок, і лише на оцінку зносостійкості та протизадирних властивостей, вважаючи їх достатніми для забезпечення довговічності дизельних двигунів. У той же час це є складними трибологічними системами, і необхідно враховувати комплексний підхід до вирішення проблеми підвищення експлуатаційної надійності, тобто як трибоелементи, що впливають на триботехнічні характеристики робочих поверхонь деталей транспортних засобів.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 2. Експериментальна методологія дослідження

### 2.1 Програма дослідження

Для реалізації цілей та вирішення проблеми, сформульованої в цій роботі, була розроблена програма дослідження з наступними етапами:

1. Проведено аналіз умов експлуатації головних муфт деталей двигунів серії ГАЗ і КРАЗ та аналіз існуючих методів модифікування моторних масел металовмісними добавками з різними варіантами обробки фізичним полем. Підвищує фрикційні технічні властивості робочих поверхонь вузлів, забезпечуючи оптимальний режим змащування і тим самим підвищуючи надійність всього механічного дизеля. Результатом цього етапу є підбір присадок, їх граничні концентрації, діапазон значень фізичного силового поля, їх міцність, варіанти обробки базових масел і композитних масел.

2. Вибір методів і методик теоретичного дослідження впливу модифікування металовмісними добавками та обробки магнітним полем (МП) на зміну властивостей моторної оливи та режим тертя головної муфти дизельних двигунів. Їх знос. Експериментальне дослідження фізико-хімічних і триботехнічних властивостей робочих поверхонь головної муфти дизеля. В результаті виконання даного етапу було обрано методику дослідження фізико-хімічних показників моторних оливи: кінематичної в'язкості, лужного та кислотного числа, густини, діелектричної проникності та магнітної проникності. Обговорено методи дослідження режимів тертя та триботехнічних властивостей поверхонь тертя. Для риформінгу моторного масла МП модернізовано фрикційні машини СМЦ-2 та 77 МК-1. Проведено лабораторне дослідження процесів тертя та зношування головної муфти дизеля внутрішнього згорання на імітаційній фізичній моделі (компресор Forte FL-24) та одноциліндровій установці. Стендові випробування дизеля проводились на стенді обкатки та гальмівному стенді КІ-1363Б.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 2.2 Теоретична методологія дослідження

Враховано динаміку зміни параметрів моторної оливи з роботою дизеля, їх вплив на характер взаємодії моторної оливи з робочими поверхнями головних муфт вузлів, зміну триботехнічних властивостей і режимів тертя.

Ми показуємо, як вплив субстанційної (мідьвмісних присадок) і фізичної (МП) модифікації поля покращує властивості моторної оливи, підвищуючи її експлуатаційні властивості та подовжуючи термін служби між замінами. Енергетична стабілізація досягається з огляду на те, що основна муфта дизеля – розімкнута ТС.

## 2.3 Загальні методи експериментальних досліджень

Експериментальне дослідження включає наступні етапи:

– Прилад тертя, імітована фізична модель, одноциліндровий агрегат, стенд обкатки та гальмівний стенд та відбір проб робочого моторного масла з картера працюючого дизеля.

– Загальний аналіз комплексу властивостей моторних олив з дообробкою на основі хроматограм, отриманих методом крапельного тесту.

– Визначення концентрації хімічних елементів у пробах моторних масел.

- Визначення складних фізико-хімічних показників нафти та закономірності їх зміни з часом роботи.

- За кутом змочування та коефіцієнтом поверхневого натягу визначити характер взаємодії масла з робочою поверхнею деталі.

– Визначається зміною електричного опору масла та ступенем втрати потужності в режимах тертя в муфті компонентів КПП.

– Визначення впливу силових характеристик модифікованого МП на діелектричну проникність та магнітну проникність моторної оливи.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

– Дослідження поєднаної фізико-хімічної модифікації триботехнічних властивостей поверхонь тертя зразків у сучасних трибоприладах СМЦ-2 та 77 МК-1.

– Дослідження триботехнічних властивостей поверхні деталі та режимів її зчеплення тертя в імітаційній фізичній моделі (компресор FL-24).

– Дослідження фрикційних технічних властивостей, зміни електричного опору масляного шару та режимів тертя при спряженні КПП на одноциліндрових агрегатах.

– Дослідження зміни поля напружень у зчепленні зразків і деталей КПП під час заміни моторного масла.

- Маючи досвід використання модифікованої моторної оливи на стенді КІ-1363Б, проводимо дослідження зміни техніко-економічних показників дизеля та фізико-хімічних властивостей оливи, характеристик зношування деталей АГНКС.

– Проведення експлуатаційних випробувань по вивченню техніко-економічних показників двигунів ГАЗ і КРАЗ та зміни показників масел з використанням моторних олив з поєднанням фізико-хімічних модифікацій з мідьвмісними добавками та МП.

- Збір статистичних даних про пройдений шлях (км) або відпрацьований час (мото-години), включаючи оцінку залишку ресурсу двигунів серій ГАЗ і КРАЗ.

- Статистична обробка результатів досліджень з графічним та аналітичним відображенням залежностей за допомогою пакетів прикладних програм на персональних комп'ютерах.

У даній роботі композиційне масло, що містить добавку гліцерату міді  $Cu_3(C_3H_5O_3)_2$ . використовувалося для проведення процесу модифікації МП, що полягає у вдосконаленні робочих поверхонь гільз циліндрів і поршневих кілець. Такі добавки відповідають вимогам композиційних масел [6], а вибір гліцерину як розчинника дозволяє отримувати стабільні і недорогі композиційні масла завдяки високій стабільності при зберіганні мастильних композицій, а також

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

забезпечує гарну змащувальну здатність. Можливість відновлення властивостей і робочих площин деталей СРГ

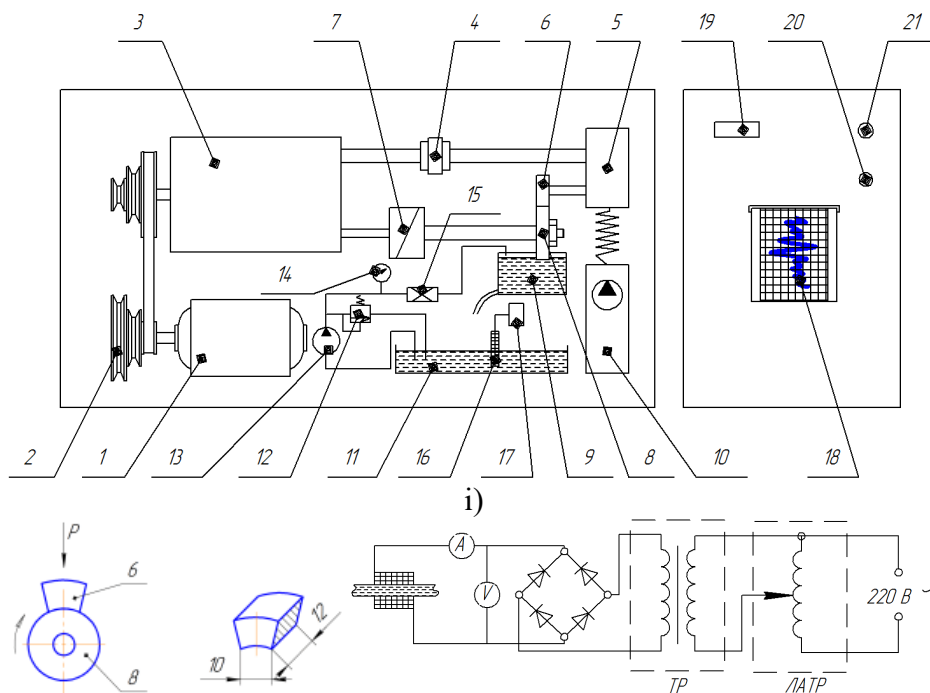
Дослідження проводилися на базових оливах М-10Г2к і М10-ДМ, а також на модифікованих оливах з добавками і МП-обробками.

## 2.4 Лабораторне обладнання для дослідження процесів тертя та зношування магістральних з'єднань дизелів КПП

### 2.4.1 Модернізована прилад тертя СМЦ-2.

Для дослідження триботехнічних властивостей, фізико-механічних властивостей поверхонь тертя, здійснення процесів тертя і зношування проведено модернізацію машини тертя СМЦ-2. Сучасні машини прикладають електричне поле до муфти «подушечного ролика» і обробляють МП-мастило, що подається до нього. Принципова схема модернізованої машини тертя СМЦ-2 наведена на рисунку 2.1.

Блок закріплювався в штатному тримачі, що входить до комплекту СМЦ-2. а ролик кріпився на нижньому валу фрикційної машини. Для контролю загального радіального биття роликів використовувався індикатор часу, встановлений на опорі штока:  $0.1 \pm 0.01$  мм.



б) в)

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

1 – електродвигун 2 – пасова передача; 3 – редуктор; 5 – Зубчаста передача. 6 – колодка. 7 – Датчик моменту тертя; 9 - ванна для масла; 10 – Механізм завантаження. 11 - Палітра. 12 – Регулювальний перепускний клапан. 13 – Насос. 14 – Манометр. 15 – Обладнання для переробки МП нафти. 16 – ТЕН. 17 – Термостат. 18 – Електронний самозаписувальний потенціометр. 19 – Електронний лічильник кількості циклів. 20 – кнопка «Пуск». 21 – кнопка «Стоп».

Рисунок 2.1 – Принципова схема модернізованої машини тертя СМЦ-2

Швидкість обертання ролика змінювалася від  $n=15$  до  $40 \text{ с}^{-1}$ . навантаження від 10 до 160 МПа. Площа робочої поверхні накладки  $1 \text{ см}^2$ . Зовнішній діаметр ролика  $40 \times 0.1 \text{ мм}$ . Вальці та блоки виготовлені із сірого чавуну СЧ18. хімічний склад якого наведено в таблиці 2.1.

**Таблиця 2.1 – Хімічний склад чавуну СЧ-18**

Хімічний склад, %						
C	Si	Mn	P	S	Хром	Ni
3.1	1.2	0.6	0.2	0.1	0.2	0.3

2.4.2 Установка для лабораторних випробувань муфти «Гільза циліндра-поршневе кільце» на базі модернізованої машини тертя 77МК-1.

Триботехнічну характеристику робочих поверхонь зразків гільз циліндрів і поршневих кілець проводили на випробувальному комплексі, створеному у відділі ЕРМ. Обладнання складається з сучасної фрикційної машини 77МК-1 та системи автоматичного керування для встановлення навантажень та реєстрації результатів.

Зразки піддавали 10-годинному випробуванню на стирання. Як мастильні середовища використовували базові та композиційні оливи з різними концентраціями присадок гліцерату міді.  $\text{Cu}_3(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$  Об'ємний вміст 0.1-60%. Базове масло та композитне масло були оброблені МП [7]. Сполучний матеріал зразка СЧ18. Найчастіше використовується для основного з'єднання деталей двигунів серій ГАЗ і КРАЗ, які встановлюються на МСГТ і ТЗ. Дана установка дозволяє імітувати роботу трибомуфти «гільза циліндра-поршневе кільце» дизеля внутрішнього згорання. Умови роботи для склеювання зразків найбільш наближені до реальних умов (фізична модель).

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Сучасна фрикційна прилад 77МК-1 дозволяє досліджувати динаміку процесів тертя та зношування, визначати основні триботехнічні властивості та визначати раціональні режими цих процесів. Загальний вигляд пристрою та його кінематична схема показані на рисунку. 2.2 і 2.3.

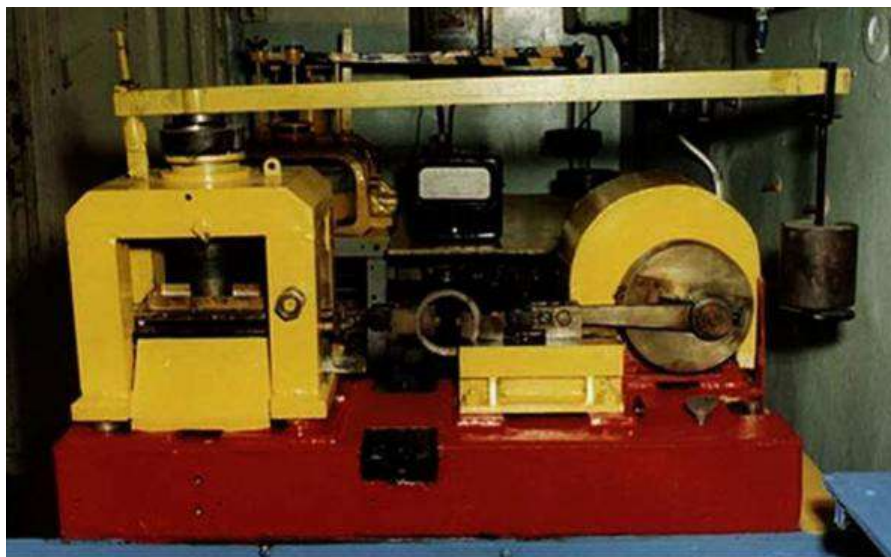
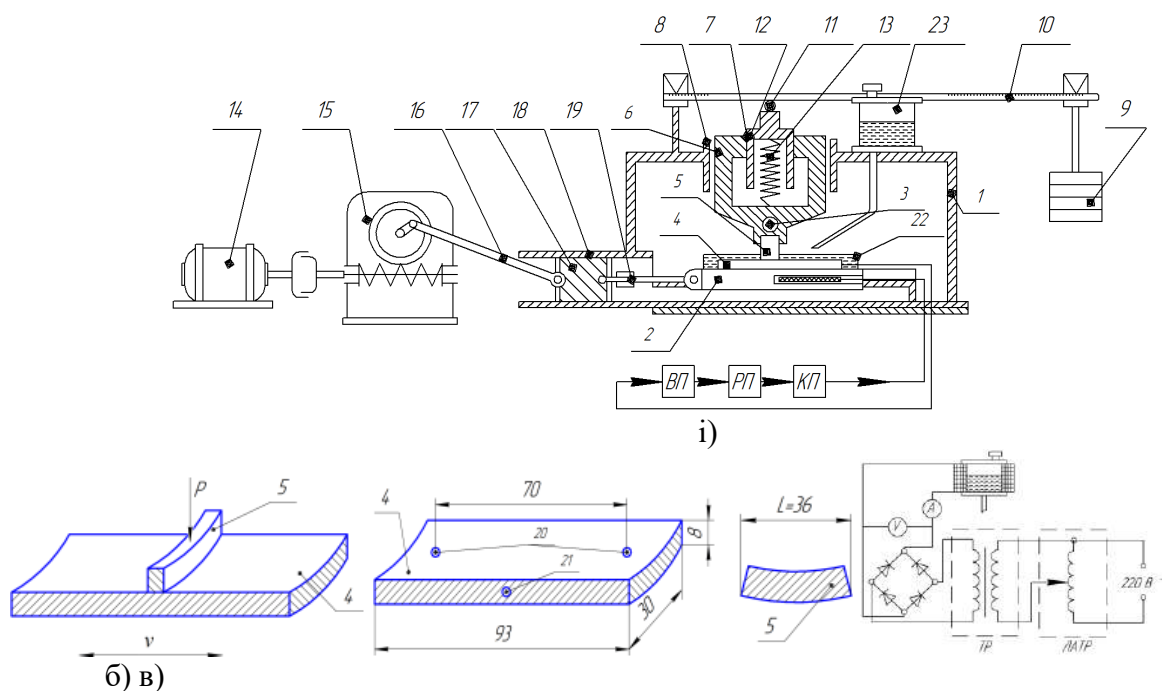


Рисунок 2.2 – Огляд модернізованої машини тертя 77МК-1



б) в)

ВП – Вимірювальний прилад. РП, КП - прилади регулювання та керування

Рисунок 2.3 – Кінематична схема обладнання для дослідження процесів тертя і зношування в трибосистемі «гільза-поршневе кільце»: сучасні машини тертя 77 МК-1 (а), зразок і його розміри (б), схема переробки нафти магнітне поле (с)

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Основними вузлами установки є: трибосистема (проба спряжена)"Гільза циліндра - поршневе кільце"), системи приводу та системи вимірювання та регулювання.

Обладнання (рис. 2.3. а) складається з основного корпусу 1. завантажувального пристрою, гірки 2. печі 3 і деталей, що забезпечують змащення. Досліджуваний «рукав» 4 закріплений на предметному склі, а зразок «кільце» 5 закріплений на дні склянки 6 завантажувального пристрою, разом вони знаходяться в масляній бані 22. в яку поміщається рифоркат 23 буде зроблено. Штифт 7 не дозволяє склу обертатися навколо вертикальної осі і може рухатися тільки вздовж осі завдяки направляючій корпусу 8. Навантаження 9 важелем 10 передається через сталеву кульку 11 на верхню втулку 12. а потім через пружину 13 на скляний корпус і «кільце».

Прилад тертя 77МК-1 приводиться в рух від електродизеля 14 за допомогою черв'ячного редуктора 15 і шатуна 16. який з'єднує шестерню зі стрижнем 17 вузла тертя. Стрижень і напрямні ковзання є частиною труби 18. Шток з'єднаний із затвором карданом 19.

У нижній частині чашки 6. де закріплений зразок «поршневого кільця», є отвір для нагрівача 3. Заданий діапазон температур тертя підтримується автоматично. Сигнал від мідно-константової (МК) термопари, встановленої в отворі під поверхнею тертя «гільзи», через пристрій керування подається на вимірювальний пристрій (ВП) з регулюючим пристроєм (РП). (СР) впливає на подачу струму (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Огляд вимірювально-контрольної частини модернізованого обладнання 77 МК-1

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

До системи вимірювання та контролю входять такі прилади, як вольтметр ГОСТ 1845-52. амперметр ГОСТ 8711-78. тахометр ІО-30. регулятор потужності.

Технічні характеристики машини тертя 77 МК-1: Потужність приводу – 1 кВт максимальне навантаження на важіль 20.0 Н. Кількість поворотів повзунка двічі за 1 хвилину. дорівнює 108.

Випробування зразків у базових і композиційних маслах проводили як у мастильній ванні, так і в проточному методі. Відпрацьоване масло витекло в ємність, розташовану в корпусі машини.

77 МТ-1 використовує повзун з більшою свободою, ніж інші фрикційні машини із зворотно-поступальним рухом, що дозволяє швидше обкатувати зразок. Крім того, видалення зразка та повторна інсталяція виконувалися без додаткової практики.

Випробовували зразок, вирізаний з рукава (рисунок 2.3. б). Зразок «кільце» — відрізок кільця довжиною 35—38 мм, зразок «гільза» (рис. 2.3. б) — паралелепіпед із циліндричною верхньою поверхнею. У цьому зразку просвердлені два отвори 20 для кріплення до предметного скла та один отвір 21 для кріплення термопари. Усі сторони зразка «рукав» плоскі, за винятком верхньої поверхні, яка з'єднується зі зразком «кільце». Схема модифікації композиційного масла МП представлена на рисунку. 2.3 дюйма

З режимом зворотно-поступальний рух зразка модифікували за такими параметрами: навантаження  $p=10\text{...}160$  МПа. Швидкість «рукавної» проби  $v=0.5\text{...}10.0$  м/с; концентрація добавки  $\text{Cu}_3(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$   $||=0.1\text{...}60\%$ . Величина напруженості магнітного поля  $H$  змінювалася в діапазоні  $(0\text{...}40)\cdot 10^3$  А/м. Стертість зразків визначали зважуванням на аналітичних вагах ВА-21 з точністю до 0.1 мг.

За результатами випробувань вивчена залежність фрикційних технічних властивостей від факторів: Величина напруги в МП. Вміст присадок в композитному маслі. температура, навантаження на трибопару зразка і швидкість відносного переміщення зразка; Визначено залежність величини зносу,

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

тривалості припрацювання, моменту тертя і температури зони тертя від перерахованих факторів і тривалості випробування.

Крім вищезазначених досліджень, для визначення режиму тертя ми визначили споживану потужність на тертя та зношування в сучасній установці на зразку сполучених пар «гільза циліндра-поршневе кільце» та виміряли споживану потужність. Блок вимірювання використовується для вимірювання дизеля постійного струму (рисунок 2.4). Протягом періоду обкатки потужність фіксувалася кожні 5 хвилин і порівнювалася з потужністю в режимі холостого ходу.

2.4.3 Експериментальна імітаційна фізична модель і метод тестування для дослідження основних кон'югатів СРГ на комплексі.

Крім лабораторних досліджень на приладх тертя СМЦ-2 і 77МК-1 проводилися також випробування обладнання, що імітує реальні процеси, що спостерігаються при роботі головної муфти дизеля внутрішнього згорання. Загальний вигляд модельної установки наведено на малюнку. 2.5 складається з поршневого компресора Forte FL-24. гідропневматичної системи.



Рисунок 2.5 – Огляд експериментальної імітаційної фізичної моделі поведінки головних кон'югатів DVZ

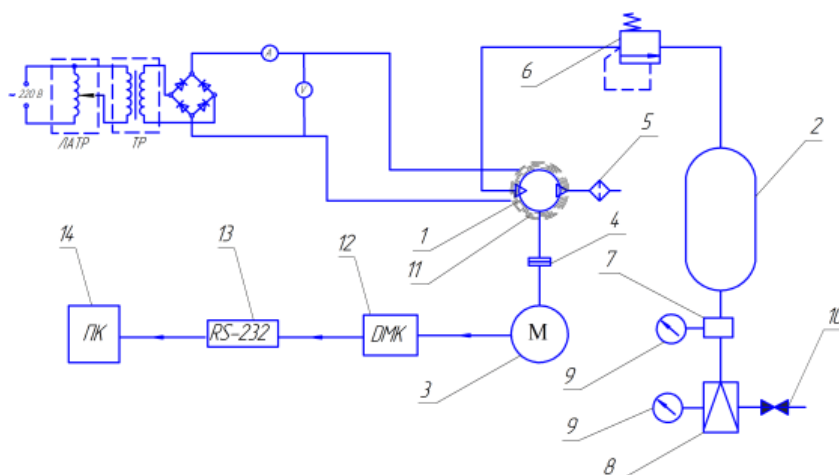
Засобом навантаження компресора є ресивер, який завдяки редукційному клапану протягом 50 хвилин змінює тиск повітря в діапазоні від 10 до 50 МПа з

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

інтервалом 1 МПа. Муфту «гільза циліндра-поршневе кільце» і масло обробляли магнітним полем постійного струму. Величина магнітного поля регулювалася відповідно до характеристик потужності, тобто сили МП, яка змінювала струм, що подається на котушку. За допомогою автоматизованого випробувального комплексу оцінено ефективність низькоенергетичного фізико-хімічного модифікаційного впливу на трибозв'язок моторної оливи та компонентів компресора. Загальна картина показана на малюнку. Принципова діаграма показана на рисунку.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд тестової установки для дослідження роботи головних муфт вузлів компресора Форте ФЛ-24.



- 1 – компресор, 2 – ресивер, 3 – електродвигун, 4 – приводний вал компресора;  
 5 – повітряний фільтр, 6 – зворотний клапан, 7 – 8 – редукційний клапан,  
 9 – манометр рідини, 10 – випускний клапан, 11 – магнітний активатор,  
 12 – аналого-цифровий перетворювач, 13 – інтерфейсний модуль,  
 14 – Комп'ютер

Рисунок 2.7 – Принципова схема випробувального комплексу для дослідження поведінки головних сполучень частин компресора

При дослідженні механічних втрат трибомуфт і визначенні режиму тертя використовувався універсальний вимірювальний прилад «Цифровий мультиметр ДМК», призначений для вимірювання, контролю, запам'ятовування і передачі одного або двох параметрів в ЕОМ. , і три трифазні мережі з однією нейтраллю і однією без неї. Цей прилад вимірює напругу, струм, потужність-активну потужність-загальну реактивну потужність, коефіцієнт потужності  $\cos \phi$ , частоту, струм і гармоніки напруги.

Для роботи програми дистанційного керування ПК і ДМК з'єднані через послідовний «інтерфейс RS-232», який є стандартним комунікаційним портом для ПК та інших систем управління. Активація послідовного обміну, Виведення інтерфейсу за допомогою кабелю вита пара виконано нижче. Підключіть клеми А і В до інтерфейсу конвертера, дотримуючись їх полярності.

Напруга, струм і потужність (активна, реактивна і сумарна) відображаються у вікні програми дистанційного керування мультиметром ДМК. На малюнку показано типовий вигляд сторінки, що містить дані з ДМК. 2.8. 2.9.

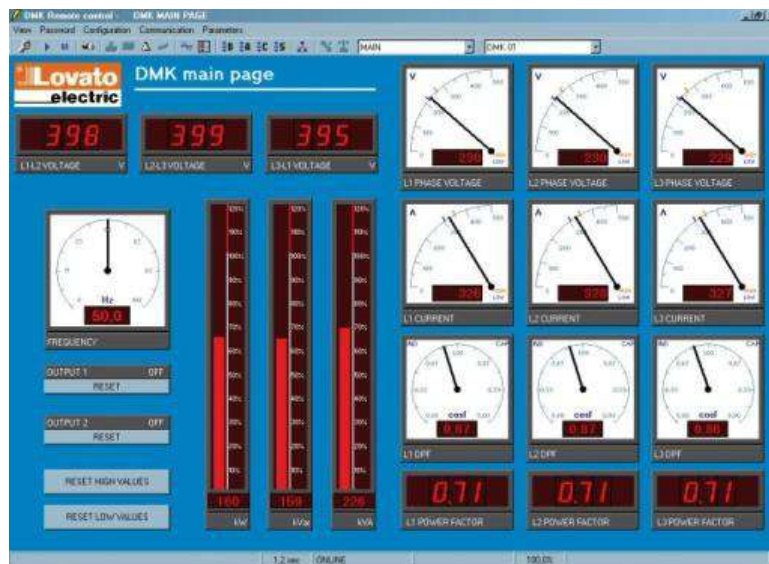


Рисунок 2.8 - Вікно програми дистанційного керування мультиметром ДМК іЕкран вимірювання напруги

Зверніть увагу на основні можливості програми дистанційного керування.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

- Графічне відображення показань мультиметра на ПК у вигляді «віртуальних» приладів (шаблони, стовпчасті діаграми, дисплеї, лічильники тощо).
- Періодично вибирайте набір визначених користувачем вимірювань і зберігайте їх на диску в різних форматах (MS-Access, ASCII text, MS-Excel).
- Застосувати порогову сигналізацію для вибраних вимірювань.
- Відображення графіків гармонічної напруги та вмісту струму, використовуючи дані, які підтримує мультиметр.

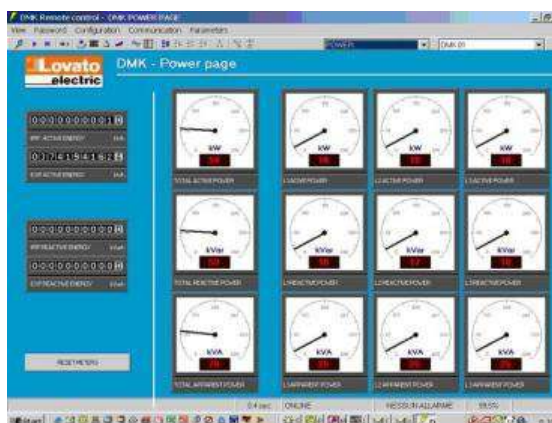


Рисунок 2.9 - Вікно програми дистанційного керування мультиметром ДМК іЕкран вимірювання потужності

Змінні періодично вводяться під керуванням програмного забезпечення, незалежно від того, яка сторінка відображається на екрані. Частота дискретизації встановлюється користувачем у налаштуваннях періоду дискретизації. Після кожного зразка вхідні дані порівнюються зі значенням налаштованого користувачем екстреного порогу (якщо доступний). Ці ж дані вносяться до бази даних журналу зі швидкістю, визначеною в налаштуваннях збереження.

Якщо встановлено опцію Зберегти тривогу, якщо одне з виміряних значень перевищує налаштований ліміт, значення буде введено в базу даних ще до закінчення періоду пам'яті. Очевидно, що якщо ви встановите період зберігання таким самим, як період вибірки, кожен зразок буде введено в базу даних із датою, часом і значеннями змінних відповідно до списку журналу даних.

Після кожного етапу випробувань компресор повністю розбирався. Деталі компресора (рисунок 2.10) ретельно очищали розчином бензину, просушували в

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

сушильній шафі і витримували не менше 30 хв. всередині ексикатора. Далі знімну фрикційну частину (кільце) зважували на аналітичних вагах WA-21 з точністю до 0.1 мг і проводили подальше мікрозважування.



а)

б)

в)

Рисунок 2.10 - Деталі компресора Forte FL-24: а - Гільза циліндра. б – Поршень. в - поршневе кільце

Додатково під час випробувань компресорів були відібрані та проаналізовані проби гідравлічної оливи для визначення основних показників та властивостей оливи (п. 2.5.2-2.5.3) [52. 53. 71].

Також було проведено дослідження характеру взаємодії досліджуваної моторної оливи з третювими поверхнями деталей КПП за методикою, зазначеною в п. 2.5.4.

2.4.4 Одноциліндрова установка для дослідження процесів тертя та зношування деталей КПП.

Дослідження процесів тертя і зношування головної муфти КШМ проводили на одноциліндровому агрегаті, виготовленому з деталі дизеля (рис. 2.11).

Частота обертання колінчастого вала одноциліндрового агрегату регулювалася електродвигуном з фазованим ротором шляхом зміни опору змінного реостата в колі ротора.

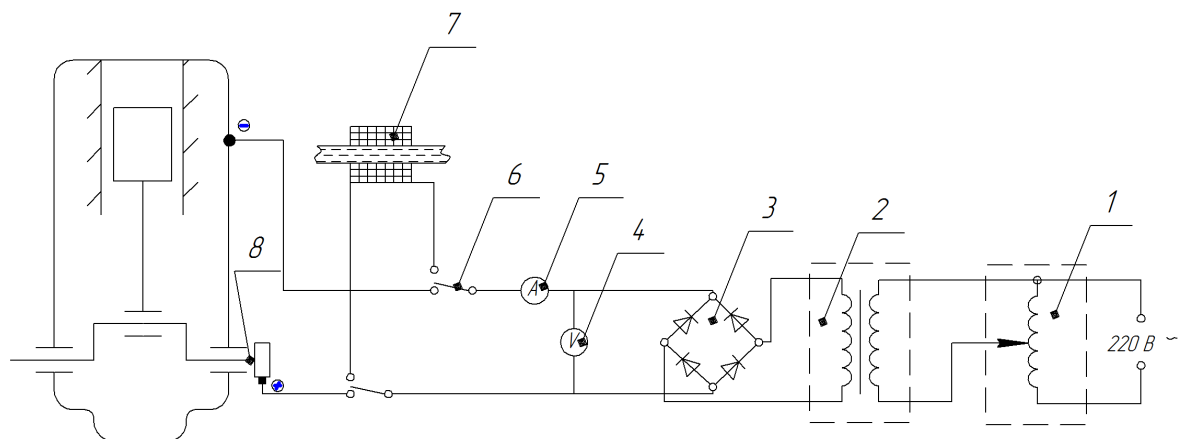


1 – рамка 2 – піддон з маслом; 3 – Одноциліндровий моторний відсік. 4 – масляний насос 5 – редуктор; 6 – клинопасова передача. 7 – Електродвигун з фазним ротором. 8 – Панель керування. 9 – Манометр

Рисунок 2.11 – Одноциліндрова установка для дослідження процесів тертя та зношування головної муфти КШМ.

Для подачі струму використовуються мідно-графітові щітки з пружиною, а маса корпусу блоку закриває щітки.

Силу струму в колі регулювали за допомогою дослідного трансформатора (рисунок 2.12).



1 - регулятор напруги; 3 - випрямляч струму; 4 – вольтметр; 6 – вимикач; 7 – Магнітний активатор. 8 – Струмоприймач

Рисунок 2.12 – Схема підключення джерел струму та модифікація композитного магнітного масла полем соленоїда

Напруга контролювалася приладом Ш4313. а струм амперметром класу Д-566. 0.2; Е514с1.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

На установці досліджено вплив модифікації моторного масла добавками та МП і частотою обертання колінчастого вала на режими тертя. Вплив вихідних характеристик магнітного поля на властивості композиційної оливи (розділ 2.5), ступінь зносу та зміни мікрогеометрії поверхонь тертя поршневого кільця (рис. 13. а) та гільзи циліндра (рис. 13. б).



а) б) в)

Рисунок 2.13 – Деталі установки одноциліндрового ЦПГ:  
а – гільза циліндра. б – Поршень. в – поршневе кільце

### 3. Теоретичне обґрунтування підвищення зносостійкості муфт ТСП

#### 3.1 Управління процесом зношування при модифікації масла додаванням присадок

Виходячи з результатів, отриманих в [65], граничний режим тертя підходить для зчеплення «гільза циліндра і поршневе кільце», і ефект присадок до моторного масла виявляється найсильнішим саме в граничних умовах. Тертя [23.45]. Для визначення модифікаційного впливу присадок на моторну оливу та тертьові поверхні рекомендовано побудувати модель режимів змащування та тертя цієї трибомуфти. За основу взято модель, представлену в [46]. Рівновагу поршневих кілець на шарі масла відносно стінок гільзи циліндра під дією зовнішніх і внутрішніх сил можна визначити за допомогою моделі пружно зв'язаних ділянок (рис. 3.1).

На кільце в радіальному напрямку діє стискаюча сила  $N_k$ . З'єднання кільця з канавкою поршня здійснюється силою тертя  $F_{к.тр}$ . Радіальний баланс кілець забезпечується силами реакції масляного шару  $N_{г-к, I}$  і  $N_{г-к, II}$  між «гільзою циліндра і поршневим кільцем» з боку навантаженої стінки циліндра (I) з боку від поршня. сила звільняє вантаж (II).

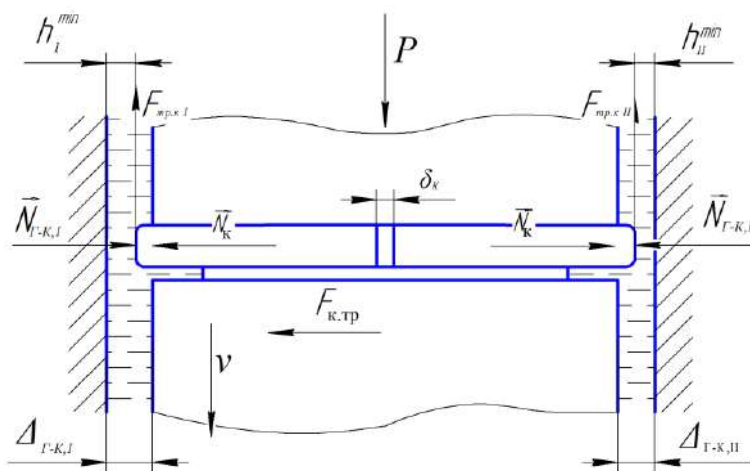


Рисунок 3.1 – Діаграма силового навантаження трибомуфти гільзи циліндра і поршневого кільця

В осьовому напрямку до кільця діє: тиск газу на вільну поверхню кільця.  $P$ , сила тертя кільця об стінку циліндра  $F_{тр.кI}$  і  $F_{тр.кII}$ .

За прийнятою схемою (рис. 3.6) можливі два випадки рівноваги кільця відносно стінки циліндра: 1) не вибрано зазор кільцевого замка;  $\delta_K > 0$ , 2) Вибрано проміжок Ringlock  $\delta_K = 0$ .

У першому випадку справедлива система рівнянь рівноваги для кільця.

$$\begin{cases} N_{\Gamma-K,I} + N_{\Gamma-K,II} = P \\ N_{\Gamma-K,I} - N_{\Gamma-K,II} = F_{к.тр} \end{cases} \quad (3.1)$$

Рівняння (3.1) показує гідродинамічну реакцію.  $N_{\Gamma-K,I}$  і  $N_{\Gamma-K,II}$ , визначити мінімальну товщину масляного шару.  $h_{\Gamma-K,I}^{\min}$  і  $h_{\Gamma-K,II}^{\min}$ :

$$\begin{cases} N_{\Gamma-K,I} = \frac{1}{2}(P + F_{к.тр}) \\ N_{\Gamma-K,II} = \frac{1}{2}(P - F_{к.тр}) \end{cases} \quad (3.2)$$

Залежить від цінностей  $h_{\Gamma-K,I}^{\min}$  і  $h_{\Gamma-K,II}^{\min}$  Ви можете визначити розмір зазору кільцевого замка.

$$\delta_K = \Delta_K - (h_{\Gamma-K,I}^{\min} + h_{\Gamma-K,II}^{\min}), \quad (3.3)$$

де  $\Delta_K$  – Установчий зазор з'єднання «гільза поршня»:  $\Delta_K = \Delta_{\Gamma-K,I} + \Delta_{\Gamma-K,II}$ .

Для значення, отриманого з рівняння (3.3).  $\delta_K > 0$ , у цьому випадку рішення вважається прийнятним. Інакше,  $-\delta_K \leq 0$ , прийняти  $\delta_K = 0$  Тобто зазор в кільцевому замку вибирається таким, щоб сума гідродинамічних реакцій перевищувала силу стиснення. якщо  $\delta_K = 0$  Тоді з рівняння (3.27) отримуємо:

$$h_{\Gamma-K,II}^{\min} = \Delta_K - h_{\Gamma-K,I}^{\min} \quad (3.28)$$

Оскільки перше рівняння (3.25) системи не має сенсу, ліва частина другого рівняння залежить лише від одного невідомого параметра.  $h_{\Gamma-K,I}^{\min}$ , тобто ми можемо його знайти, і за рівнянням (3.3) знаходимо це  $h_{\Gamma-K,II}^{\min}$ .

Відповідно до прийнятої моделі сполучення «гільза циліндра і поршневе кільце» передбачається три можливі режими тертя: Змішування та механіка рідин. Значення порівнюються для ідентифікації зазначеного режиму  $h_{\Gamma-K,I}^{\min}$  і  $h_{\Gamma-K,II}^{\min}$  грубий  $R_{кр}$  Поверхня спряженої дії.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

– У граничному режимі тертя кільце стикається зі стінкою гільзи циліндра по всій окружності.  $h_{\Gamma-K,I}^{\min} \leq R_{кр} \leq h_{\Gamma-K,II}^{\min}$  ;

– У режимі змішаного тертя кільце стикається зі стінкою гільзи циліндра однією ділянкою.  $h_{\Gamma-K,I}^{\min} \leq R_{кр} < h_{\Gamma-K,II}^{\min}$  ;

– У режимі гідродинамічного тертя кільце не торкається стінки циліндра.  $R_{кр} < h_{\Gamma-K,I}^{\min} \leq h_{\Gamma-K,II}^{\min}$  .

У прийнятій схемі пружно з'єднаних ділянок моделі «гільза циліндра і поршневе кільце» зовнішня окружність поршневого кільця значно перевищує його висоту, що призводить до бічних витоків масла до поршневого кільця. Витік масла в напрямку радіальної швидкості також незначний [80].

гідродинамічна реакція  $N_{\Gamma-K,I}$  і  $N_{\Gamma-K,II}$  У загальному випадку це інтеграл від гідродинамічного тиску  $p(x)$ . Гідродинамічний тиск масляного шару між поршневим кільцем і гільзою циліндра за заданих умов можна визначити з рівняння Рейнольдса для одновимірної течії в квазістаціонарній формі [43].

$$\frac{d}{dx} \left( h^3 \frac{dp}{dx} \right) = -6\eta v \frac{dh}{dx}, (3.4)$$

Використовуючи граничні умови, отримуємо:

$$p(0) = p_1, p(1) = p_2, i v > 0, p(0) = p_2, p(1) = p_1, i v < 0. (3.5)$$

Враховуючи призначення функцій  $h = h(x)$ , Рівняння (3.4) розв'язується чисельними методами. Результируючий гідродинамічний тиск  $p(x)$  приймає як позитивні, так і негативні значення. Відповідно до критерію Зоммерфельда негативні значення замінюються нулем.

Припускаючи, що розподіл гідродинамічного тиску  $p(x)$  уздовж півкіл кільця постійний, можна визначити опорну силу кожного півкола.

$$N_{зд} = 2r_k \int_0^{x_1} p(x)_{I,II} dx. (3.6)$$

Дослідженнями [43] встановлено, що зношування дизельних муфт у змішаних режимах тертя, особливо в режимах екстремального тертя, має

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

переважно липкий і механічний характер. При цьому в граничному режимі процеси тертя і зношування взаємопов'язані.

Скористаємося моделлю Дж. Арчарда [98.103]. Це пов'язує інтенсивність зносу з фактичною площею контакту (FCA).

$$\frac{u_V}{L} = \frac{1}{3} \cdot k_{\zeta i} A_{\phi}, (3.7)$$

де  $u_V$  – Високий рівень зносу.  $L$  – Шлях тертя;  $k_{\zeta n}$  – Коефіцієнт ймовірності зносу ( $k_{\zeta n} \approx 10^{-12}$ );  $A_{\phi}$  Фактична площа контакту.

При пластичній деформації поверхні тертя ( $A_{\phi} \approx N/\sigma_T$ ), маємо:

$$u_V = \frac{1}{3} \cdot k_{\zeta n} \cdot \frac{N}{\sigma_T} L, (3.8)$$

де  $N$  – Нормальне навантаження.  $\sigma_T$  Це межа текучості матеріалів, які можна носити.

Враховуючи шлях тертя,  $L = v \cdot t$ ,  $v$  – Швидкість ковзання деталей.  $t$  – Часовий і лінійний знос  $u_e = u_V/S_u$ ,  $S_u$  – область зносу і з (3.8) маємо:

$$u_e = \frac{1}{3} k_{\zeta n} \frac{N}{S_u \sigma_T} vt = \frac{1}{3} k_{\zeta n} \frac{p}{\sigma_T} v \cdot t, (3.9)$$

де  $p = N/S_u$  – Тиск у фрикційному контакті.

Слідуючи роботі Роува [32], для оцінки інтенсивності зношування в режимі критичного тертя використовується наступна формула:

$$\frac{u_V}{L} = k_{\zeta n} \frac{(1 + 3f_{gr}^2)^{1/2}}{\sigma_T} \cdot \frac{N}{v} \cdot \frac{d_a}{t_a} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), (3.10)$$

де  $f_{gr}$  – Критичний коефіцієнт тертя. Його значення визначається на основі експериментальної кривої Херші-Стрібека.  $d_a, t_a$  – Діаметр області впливу та період основних коливань адсорбованих молекул.  $Q$  – теплота адсорбції;  $R$  - універсальна газова плита,  $R = 8,31 \cdot 10^3$  Дж/К · моль;  $T$  Це абсолютна температура всередині трибопари. значення  $d_a, t_a, Q, R$  – Цитата з фізичного довідника [92].

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Після деяких перетворень рівнянь (3.8) і (3.9) отримано рівняння для об'ємного і лінійного зносу.

$$u_V = k_{zn} (1 + 3f_{\pi}^2)^{1/2} \frac{p}{\sigma_T} \cdot t \cdot \frac{d_a}{t_a} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot S_u \cdot (3.11)$$

$$u_e = k_{zn} (1 + 3f^2)^{1/2} \frac{p_H}{\sigma_T} \cdot t \cdot \frac{d_a}{t_a} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot \frac{L}{S_u} \cdot (3.12)$$

Отримане рівняння враховує параметри адгезійного механізму в граничній плівці масла і може бути використане у випадках змішаного тертя і граничного тертя, наприклад модифікації масла добавками.

Враховуючи факт модифікації моторного масла добавками і його вплив на стан змащення і тертя даної муфти, формула для розрахунку сили тертя і величини зносу кільця, а також величини зносу на кільці врахувати зміни. Вимірюють в'язкість і змочувальну здатність масла. При цьому поліпшуються властивості масла, знижується коефіцієнт тертя, мінімізується знос робочих поверхонь деталей ЦПГ.

Найважливішою умовою для встановлення рідинного змащування є створення внутрішнього тиску в шарі мастила, тому, щоб задовольнити цю умову, бажано сформувати масляний шар у формі кінчного клина. Різниця значень вхідного і вихідного зазорів муфти в масляному пласті визначає перерозподіл тиску. В результаті графіки швидкості ковзання шару на вході, центрі спряженості та на виході відрізняються.

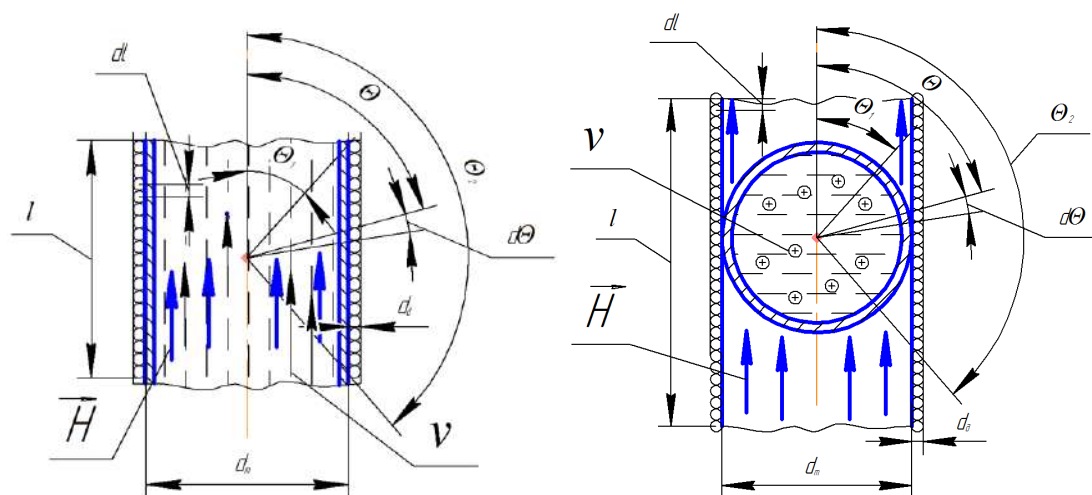
### **3.2 Зміна властивостей при обробці композиційного моторного масла струмом і магнітним полем**

3.2.1 Оцінка напруженості магнітного поля струму, що використовується при обробці моторного масла.

У цьому дослідженні магнітне поле котушки (соленоїда) з обмотками на циліндричній поверхні використовувалося для обробки базових масел і

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

композиційних масел у поздовжньому магнітному полі (рис. 3.2 а) і поперечному магнітному полі (рис. 3.2 б).



а) б)

Рисунок 3.2 – Схема розрахунку напруженості поздовжнього (а) і поперечного (б) магнітних полів котушки (солєноїда)

При цьому число витків на одиницю довжини циліндричної поверхні становить:

$$n = \frac{N}{l}, \quad (3.13)$$

де  $N$  – Загальна кількість витків;  $l$  – довжина солєноїда.

За умови:  $l \gg 2r_k = d_k$ , де  $d_k$  – діаметр циліндричної котушки, то крайовими ефектами магнітного поля солєноїда можна знехтувати [06]. давайте приймемо це  $d_k \gg d_m$ , де  $d_m$  – Діаметр трубопроводу, по якому подається моторне масло.

Розрахуємо напруженість магнітного поля в центрі солєноїда з одношаровим поворотом на осі у випадку тонкостінного трубопроводу.  $d_o = d_m$  Обробка моторного масла здійснюється поздовжніми або поперечними магнітними полями.

На основі діаграми. 3.7 Елементи довжини котушки:

$$dl = \frac{r \cdot d\Theta}{\sin \Theta}. \quad (3.14)$$

У цьому випадку коефіцієнт кількості витків одного шару дорівнює:

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$dN = n dl = n \frac{r \cdot d\Theta}{\sin \Theta}. (3.15)$$

На підставі закону Біо-Савва-Лапласа елементів напруженості магнітного поля отримуємо:

$$dH = \frac{I r_0^2}{2(r_0^2 + h^2)^{3/2}} \cdot n \frac{r \cdot d\Theta}{\sin \Theta}, (3.16)$$

$$\text{де } (r_0^2 + h^2)^{3/2} = r^3; r = \frac{r_0}{\sin \Theta}. (3.17)$$

Враховуючи (3.16) у (3.17), отримуємо:

$$dH = \frac{In}{2} \sin \Theta \cdot d\Theta. (3.18)$$

(3.18) була вбудована в кут.  $\Theta_1$  і  $\Theta_2$ , маємо:

$$H = \frac{In}{2} \cdot (\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2). (3.19)$$

З фігури. 3.3 це:

$$\Theta_2 = \pi - \Theta_1 \text{ і } \cos \Theta_1 = \frac{l}{2 \cdot \sqrt{(r_0 + r)^2 + \frac{l^2}{4}}} = \frac{l}{2 \cdot \sqrt{(d_m + d_o)^2 + l^2}}, (3.20)$$

де  $l$  – Довжина котушки (соленоїда).  $d_m$  – діаметр трубопроводу;  $d_o$  це діаметр дроту.

Підстановка (3.16) і (3.17) у (3.19) дає рівняння для розрахунку поля соленоїда від одного витка шару.

$$H = In \cdot \cos \Theta_1 = \frac{I \cdot N}{\sqrt{(d_m + d_o)^2 + l^2}}; H = \frac{I \cdot N}{\sqrt{(d_m + d_o)^2 + l^2}}. (3.21)$$

Для багат шарових котушок  $n_1$  Сила магнітного поля дорівнює:

$$H = \frac{I \cdot N \cdot n_1}{\sqrt{(d_m + (2n_1 - 1)d_o)^2 + l^2}}. (3.22)$$

Експериментальні дослідження авторів даної роботи [65] та їхні власні дослідження показують, що поздовжнє магнітне поле (ЕМП) струму має більш ефективний вплив на параметри та властивості базових і композиційних

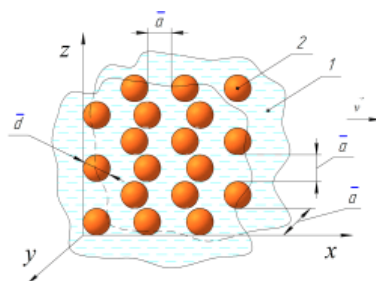
					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

моторних олів. Горизонтальний вплив ЕРС значно слабший, тому в деяких випадках відбувається навпаки, і переважає вертикальний вплив МПЕС.

### 3.2.2 Діелектрична проникність композитного масла, обробленого магнітним полем.

Під впливом магнітного поля неполярні молекули базової олії рухаються, створюючи струм поляризації або зміщення. Полярні молекули базових масел прагнуть обертатися так, щоб їх осі збігалися з напрямком, перпендикулярним до дії МПЕС, що викликає появу поляризованих зарядів і поляризацію молекул базової олії [12.154]. Чим більша кількість поляризованого заряду, що утворюється в двигуні, тим більша діелектрична проникність базової оливи [57]. Діелектрична проникність змінюється не тільки в залежності від терміну служби моторного масла, але і від присадок, доданих в масло.

Для оцінки зміни діелектричної проникності моторної композиційної оливи при зміні МПЕС розглянемо спрощену модель композиційної оливи, в якій частинки добавки мають форму кульок середнього діаметра.  $\bar{a}$  Розташований у вузлі прямокутної сітки на середній відстані.  $\bar{a}$  Розташуйте їх один за одним у кожному рядку (рис. 3.3).



1 – базове масло 2 – дисперсна фаза (добавки);

Рисунок 3.3 – Модель рівномірно розподіленої нафти адитивні частинки

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Кожна окрема 1D, 2D і 3D локальна область композитного масла розглядається як елемент конденсатора. При цьому ємність одного лінійного ланцюга композитного масла для кожної координатної осі становить:

$$C_x = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon \bar{d}^2}{4N\bar{a}}, (3.23)$$

де  $N$  – Кількість додаткових частинок уздовж кожної осі  $N_x = N_y = N_z = N$ ;  $\varepsilon$  – Діелектрична проникність базової олії;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м - електричний стіл.

Електроємність двовимірної системи  $C_{xy}$  Композитне значення масла дорівнює:

$$C_{xy} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon \bar{d}^2}{4\bar{a}}. (3.24)$$

Композитна масляна тривимірна система  $C_{xyz}$  Можна уявити це як паралельне з'єднання  $N$  конденсаторів по ємності.  $C_{xy}$ , Іншими словами:

$$C_{xyz} = C_{xy} \cdot N = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon \bar{d}^2}{4\bar{a}} \cdot N. (3.25)$$

З іншого боку, місткість  $C_{xyz}$  дорівнює:

$$C_{xyz} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon' \cdot N^2 \bar{d}^2}{4N(\bar{d} + \bar{a})} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon' \bar{d}^2 \cdot N}{4(\bar{d} + \bar{a})}, (3.26)$$

де  $\varepsilon'$  – Діелектрична проникність моторного масла з добавками.

Зрівняйте праві частини рівнянь (3.24) і (3.25). отримати:

$$\varepsilon' = \frac{\bar{d} + \bar{a}}{\bar{a}} \cdot \varepsilon. (3.27)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для тривимірних конструкцій співвідношення лінійних параметрів  $\bar{a}$  і  $\bar{b}$  можна вказати через параметри гучності.  $V$  – Загальна кількість моторного масла з добавкою і  $V_0$  – Загальна кількість добавок.

$$\left(\frac{\bar{d} + \bar{a}}{\bar{a}}\right)^3 = \frac{V}{V - V_0}. \quad (3.28)$$

Розділіть чисельник і знаменник у правій частині рівняння (3.28) на значення  $V$ , ми маємо:

$$\left(\frac{\bar{d} + \bar{a}}{\bar{a}}\right)^3 = \frac{1}{1 - c_V}, \quad (3.29)$$

де  $c_V = V_0/V$  - Вміст присадок в маслі.

Рівняння (3.52) враховує (3.29), а також враховує поправочний коефіцієнт за рахунок магнітного поля.  $k_H$ , виглядає так:

$$\varepsilon' = \left(\frac{1}{1 - c_V}\right)^{1/3} \varepsilon \cdot (1 - k_H), \quad (3.30)$$

де  $k_H$  - визначається експериментально ( $0 \leq k_H < 1$ ).

З рівняння (3.30) видно, що зі збільшенням вмісту присадок в маслі спостерігається збільшення значень параметрів.  $\varepsilon'$  Однак із покращенням MPES рівень діелектричної проникності композитного масла дещо знижується.

Таким чином, композитні моторні оливи змінюють свої діелектричні властивості і, отже, значення діелектричної проникності залежно від природи базової оливи, пакету введених присадок і способу їх модифікації фізичними (магнітними) полями. Крім того, діелектрична проникність може

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

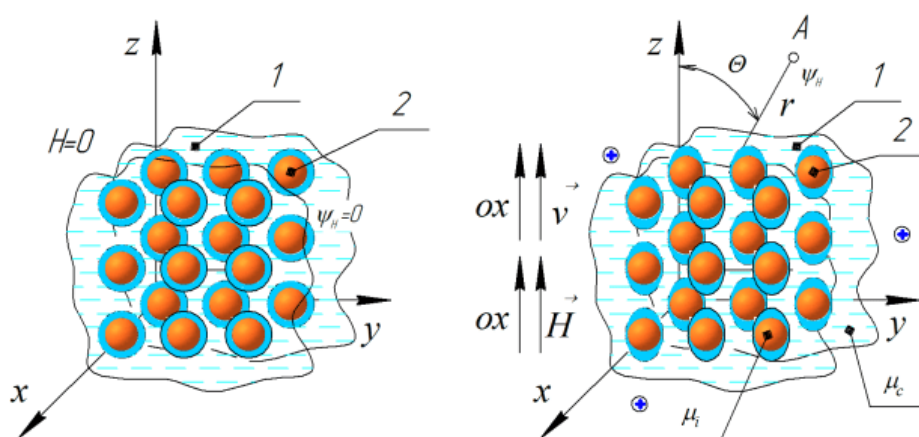
використовуватися як параметр, який може контролювати стан модифікованих і немодифікованих масел.

### 3.2.3 Магнітна проникність при переробці базових масел і композиційних масел.

Структурні зміни нафти, обробленої MPES, в основному пов'язані з її магнітною проникністю[69.106].

Для моделювання впливу магнітного поля на композитне масло передбачається, що металовмісні частинки добавки не змішуються між собою і змочуються маслом (рис. 3.4 а). При дії магнітного поля на композиційну оливу спостерігається така структура [27.151]: Мокра оболонка частинок добавки деформується і приймає форму витягнутого сфероїда (рис. 3.4б), що змінює стан оливи. я буду. Макроскопічні властивості нафти: підвищена магнітна проникність по всій нафті.

Розглянемо проникну нафту в навколишньому середовищі  $\mu_c$  Область об'ємом  $V$ , що містить  $n$  малих сфероїдів, кожен з об'ємом  $V_0$  частинок добавки (дисперсної фази) з магнітною проникністю.  $\mu_i$ . Система знаходиться в сильному однорідному магнітному полі  $\vec{H}$  При цьому всі еліпсоїди орієнтовані великими півсями вздовж магнітного поля (рис. 3.4б).



а) б)

1 – базове масло 2 – дисперсна фаза (добавки);

Малюнок 3.4 –Модель комплексної нафти як дисперсійної системи:

а) Без магнітного поля. б) за наявності магнетизму

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

## Поле (дисперсійне середовище)

Зрозуміло, що для однорідного магнітного поля рівняння виконується в кожній точці заповненого маслом простору.  $\text{rot } \vec{H} = 0$  Тому в цій області можна ввести скалярний потенціал магнітного поля.  $\psi_H$ . Магнітний потенціал одного малого еліпсоїда з металовмісною добавкою у віддаленій точці  $A r$  Він дорівнює:

$$\psi_{H0} = -Hz + \frac{p_m}{r^2} \cos \theta, (3.31)$$

де  $p_m$  – адитивний еліпсоїдальний магнітний момент, що визначається рівнянням [6].

$$p_m = \frac{\left(\frac{\mu_i}{\mu_c} - 1\right) H V_0}{1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_c} - 1\right) N_e}, (3.32)$$

де  $N_e$  – коефіцієнт розмагнічування і може бути розрахований за формулою, наведеною в [69].

Прикладаючи магнітне поле одночасно з введенням металовмісних присадок, можна покращити експлуатаційні характеристики моторних олів [57] і робочі аспекти головної муфти дизельних двигунів. На додаток до ефекту комбінації добавки та магнітного поля, що посилюється таким чином, більше частинок зносу, головним чином заліза, буде циркулювати в мастилi разом з добавкою. Завдяки силам адгезії поверхнево-активних речовин (ПАР) в мастилi ці частинки у вигляді комплексних сполук циркулюють в масляній системі, а під дією магнітного поля частинки добавки переміщуються в зону трибопари . , відновити їх.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

## 4. Результати експериментальних досліджень впливу модифікації моторного масла на двигун

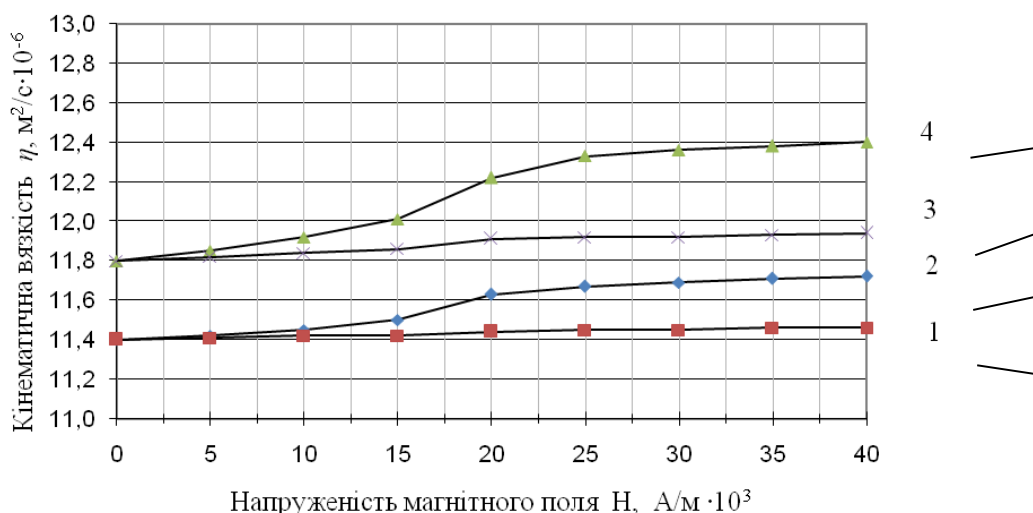
### 4.1 Зміна показників і властивостей базової моторної оливи внаслідок модифікування добавками та обробки магнітним полем

#### 4.1.1 Вплив модифікації моторного масла на фізико-хімічні показники.

У процесі модифікації базової моторної оливи обробку проводили як поперечними, так і поздовжніми МП, тобто векторами напруженості магнітного поля.  $\vec{H}$  Він орієнтований вертикально і в тому ж напрямку, що й швидкість руху масла. Основні фізико-хімічні показники базових масел і композиційних масел без обробки та з МП обробкою визначали за методикою, зазначеною в розділі 2.5.

На рисунку наведено результати дослідження залежності кінематичної в'язкості від напруженості питомого магнітного поля. 4.1.

З фігури. 4.1 видно, що модифікаційний ефект поздовжнього магнітного поля ефективніший, ніж модифікаційний ефект поперечного магнітного поля. Це узгоджується з результатами [65]. Тому в подальших дослідженнях модифікацію масла проводили тільки поздовжнім МП.



1. 3 – Обробка базових М10-ДМ і композитних масел поперечним МП ( $i_B=4\%$ ); 2.

4 – поздовжня МП обробка базової М10-ДМ і композитної олії ( $i_B=4\%$ )

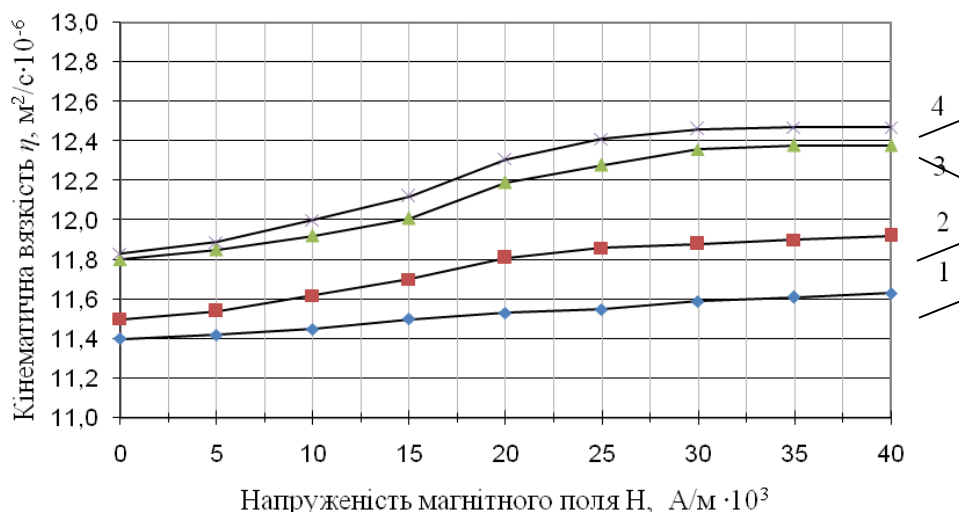
Рисунок 4.1 – Залежність кінематичної в'язкості базової оливи М10-ДМ через величину напруги і характер ів.

Отримані результати (рис. 4.1. криві 1. 2) можна пояснити структурним впливом МП на нафту як рідкий діелектрик. Його диполі переважно орієнтовані в площині, перпендикулярній до поздовжнього напрямку МП [06], 157.

Вплив МП на зміну кінематичної в'язкості моторної оливи посилюється при додаванні гліцерату міді (рисунок 4.1. криві 3. 4). Це пояснюється тим, що частинка має додатковий дипольний момент і таким чином збільшує свій структурний потенціал. в базове масло. Про це свідчать результати дослідження залежності кінематичної в'язкості від напруги МП при різних рівнях концентрації добавки гліцерату міді (рисунок 4.2).

Змінюючи концентрацію добавки (рис. 4.2. криві 2. 4), можна підсилити ефект модифікації за рахунок впливу МП.

Крім того, виявлено, що запропонована конструкція пристрою для активації масла (джерело МП) досягає свого чудового ефекту при більш високих значеннях, з напруженістю магнітного поля  $(20...28) \cdot 10^3$  А/м. При цьому значенні рівень масляного індикатора практично не змінюється.



1 – Базове масло М10-ДМ2 - 4 – комплексне масло відповідної концентрації  $i_B=2\%$ ;  $i_B=4\%$ ;  $i_B=6\%$

Рисунок 4.2 – Залежність кінематичної в'язкості базової оливи М10-ДМ від величини напруги в поздовжньому МП

Базовий М-10 G2k і зміна середньої кінематичної в'язкості моторного масла в кожному стані М10-ДМ Комплексні масла наведені в таблиці. 4.1.

Таблиця 4.1 – Зміна кінематичної в'язкості моторної оливи при переробці МП ( $H = 2.5 \cdot 10^4$  А/м)

двигун оливковий	Середня кінематична в'язкість при температурі 10.0°C, мм <sup>2</sup> /с		зміни в'язкості, %
	До МП обробки	Після обробки МП	
Базоба, М-10Г2к	110.0	11.24	2.2
Базовий М10-Г2к + гліцерат міді (сV = 4%)	11.40	1204	5.6
Базоба, М-10ДМ	11.40	11.73	2.9
Основний М10-ДМ + гліцерат міді (сV = 4%)	11.80	12.68	5.8

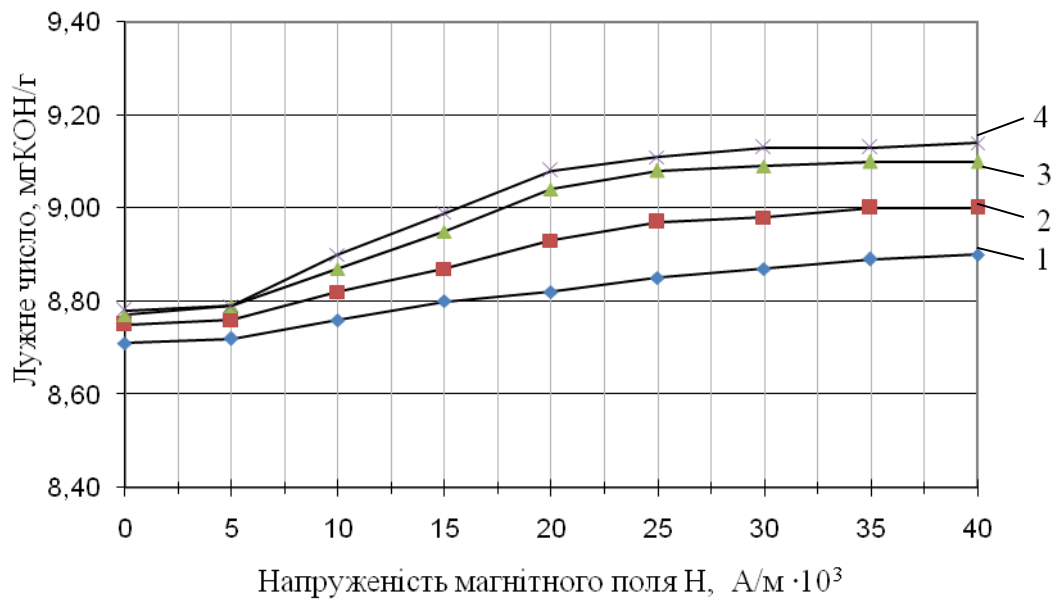
Встановлено, що при обробці МП середня кінематична в'язкість базової оливи М-10Г2к збільшується на 2.2%, а середня кінематична в'язкість М-10ДМ збільшується на 2.9%. Іншими словами, ефект риформінгу МП залежить від складу базової олії. масло.

При додаванні добавки гліцерату міді (сV = 4%) Обробка МР збільшує кінематичну в'язкість цільових базових олив на 2.6% і 5.8% відповідно. Збільшення кінематичної в'язкості композиційних моторних олив можна пояснити зміною міцелоутворюючої структури частинок добавки під час магнітної обробки.

Подібні дослідження були проведені при вимірюванні таких показників, як лужність і щільність під час комплексного риформінгу нафти.

На малюнку показано, як змінюється лужність моторного масла М10-ДМ внаслідок денатурації магнітного поля. 4.3.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53



1 – Базове масло М10-ДМ2 - 4 – комплексне масло відповідної концентрації  $i_B=2\%$ ;  $i_B=4\%$ ;  $i_B=6\%$

Рисунок 4.3 – Залежність від лужності базового масла М10-ДМ від величини напруги в поздовжньому МП

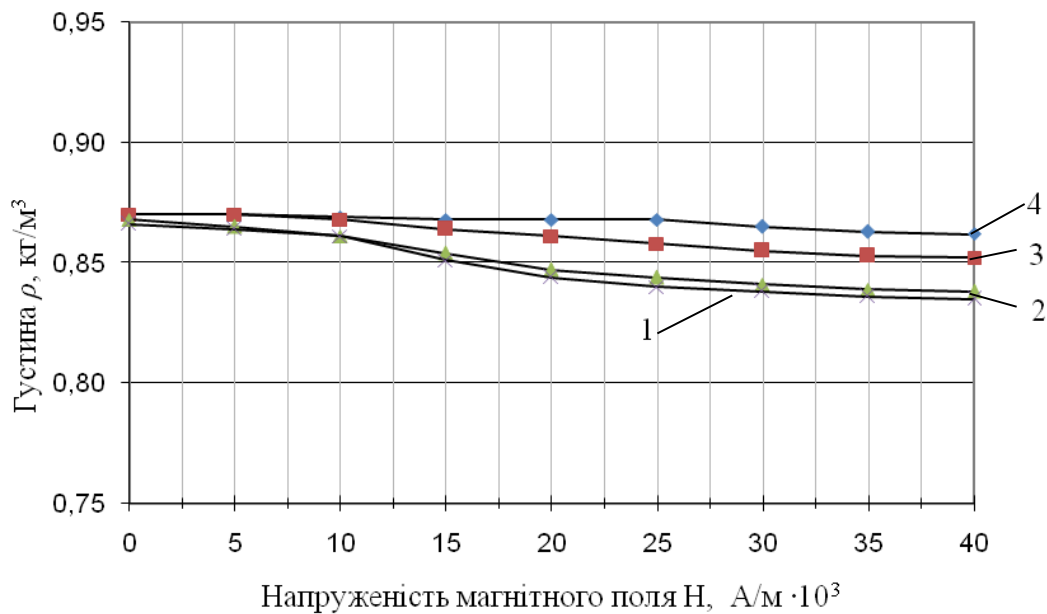
У таблиці наведено зміну лужного числа внаслідок комплексної модифікації базових олив марки М-10Г2к і марки М-10ДМ, які мають різний хімічний склад і в'язкісно-температурні характеристики. 4.2.

Таблиця 4.2 – Зміна числа лужності моторного масла під час обробки МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

двигун оливковий	Середнє число лужності, мг КОН на грам олії		Зміна лужності, %
	До МП обробки	Після обробки МП	
Базовий М10-Г2к	6.10	6.23	2.1
Базовий М10-Г2к + гліцерат міді (сV = 4%)	6.50	6.75	3.8
основний М-10ДМ	8.71	8.91	2.3
Основний М10-ДМ + гліцерат міді (сV = 4%)	8.77	9.13	4.0

Властивості досліджуваних масел мають тенденцію до підвищення, але ступінь підвищення змінюється в залежності від базової олії.

На рисунку наведено результати дослідження змін густини та напруги МП при модифікації модифікованої базової олії М10-ДМ додаванням гліцерату міді в різних концентраціях. 4.4.



1 – Базове масло М10-ДМ 2 - 4 – комплексне масло відповідної концентрації  $vV=2\%$ ;  $vV=4\%$ ;  $cV=6\%$

Рисунок 4.4 – Залежність від густини базової олії М10-ДМ від величини напруги в поздовжньому МП

Щільність базових масел і композитних масел має тенденцію до незначного зниження через вплив МР, але в деяких випадках величина зміни невелика.

Тому обробка базових і композиційних моторних олів з використанням поздовжнього МП впливає на їх структуру та перцептивно змінює їх фізико-хімічні параметри. Тобто збільшення кінематичної в'язкості, збільшення лужності, зниження щільності і т.д.

#### 4.1.2 Змочуваність моторного масла.

Основним показником, пов'язаним з фізико-хімічними властивостями масла, є його здатність змочувати металеві поверхні. Цей показник оцінювався на роботі. Що стосується зміни кута мокрого краю композитного масла, швидкості

поширення масла на поверхні тертя та його коефіцієнта поверхневого натягу, Розділ 2.3.

Оскільки під час використання мідьвмісних добавок на робочій поверхні деталей КПП утворюється шар міді, дослідження змочуваності проводили також на поверхнях зразків, які попередньо були покриті шаром міді.

У таблиці показано характер зміни кута змочування для різних поверхонь зразків і методів модифікації масла. 4.3.

Таблиця 4.3 – Вплив модифікації масла на величину критичного кута змочування ( $H = 2.5 \cdot 10^4$  А/м)

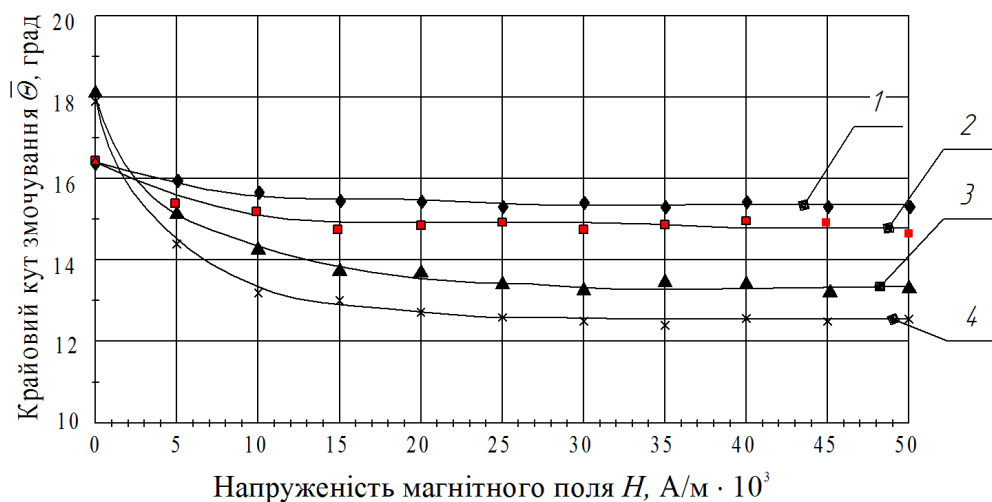
моторне масло	Середнє значення кута змочування $\alpha$ , град			
	Зразок СН-18 Без покриття		Зразок Ш-18 з мідненням	
	до Обробка МП	задній Обробка МП	до Обробка МП	задній Обробка МП
Базоба, М10-G2k	15	13	14.5	12
Композит, ( $cV = 4\%$ )	18	15	16	13

Отримані результати показують, що базове масло має менший кут змочування, а композитне масло має більший кут змочування. Водночас при магнітній обробці олії як у першому, так і в другому випадках спостерігається незначне зменшення кута змочування поверхні зразка.

Результати дослідження також показують, що як для базових, так і для композитних масел, оброблених МП, зменшується кут змочування поверхні зразків із нанесеним шаром міді, тобто спостерігається додатковий позитивний ефект.

На рисунку наведено результати експериментального дослідження зміни кута змочування оригінальної базової оливи та композитної моторної оливи внаслідок натягу МР. 4.5.

Дані показують, що залежність кута змочування від натягу МП має тенденцію до зменшення. Крім того, ми виявили, що при напруженості магнітного поля, що перевищує  $(20 \dots 25) \cdot 10^3$  А/м, істотного впливу магнітного поля практично немає, і кут змочування можна вважати постійним.



1.2 -  $cV=2\%$ ; 3.4 - зразок СН-18 з мідним покриттям

Рисунок 4.5 – Залежність критичного кута змочування від напруги МП та концентрації добавки гліцерату міді в композиційній олії М10-ДМ.

Крім того, зауважте, що значення критичного кута змочування є функцією багатьох факторів, включаючи в'язкість і склад масла, температуру та час роботи масла. Матеріали та покриття деталей тощо.

На рис. 4.6 наведено результати дослідження коефіцієнта поверхневого натягу при зміні концентрації добавки гліцерату міді в композитному маслі.

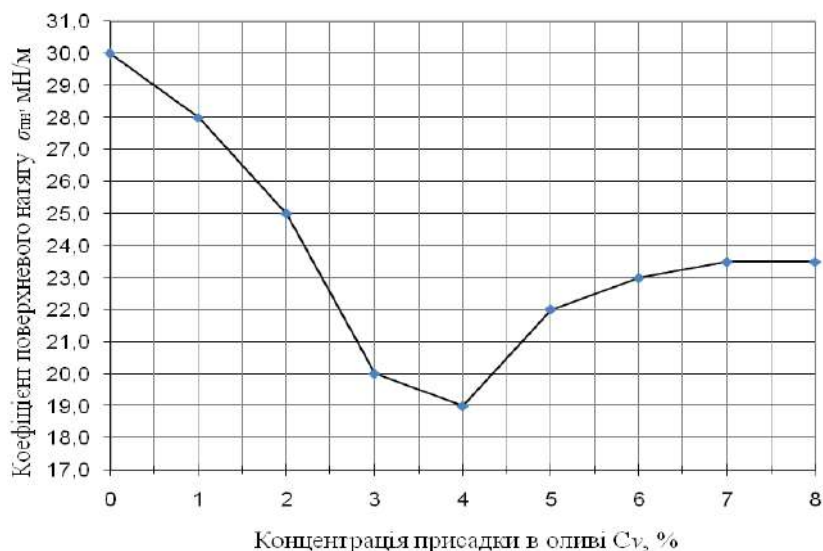
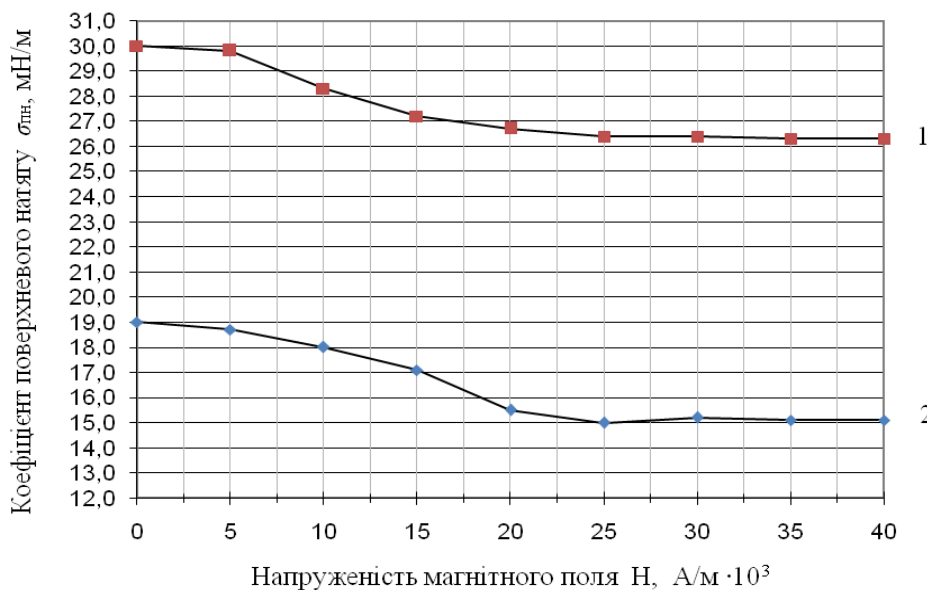


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнта поверхневого натягу моторної оливи М10-ДМ від концентрації добавки гліцерату міді.

Виявляється, отримані залежності є складними. Найбільш прийнятний діапазон концентрації добавок гліцерату міді становить від 3.5 до 4.5%. У той же час коефіцієнт поверхневого натягу також мінімізується.

На рисунку наведено результати дослідження коефіцієнтів поверхневого натягу базової олії та композиційної олії від натягу МП. 4.7.



1-базове масло М10-ДМ; 2 – Комплексне масло ( $\text{стор}_b=4\%$ ).

Рисунок 4.7 – Залежність коефіцієнта поверхневого натягу моторного масла від натягу МП.

Результати досліджень показують, що обробка магнітним полем базових масел і композитних масел знижує коефіцієнт поверхневого натягу. Крім того, при додаванні добавок спостерігається більший ступінь зменшення. У цьому випадку також присутня деяка адитивна концентрація ( $i_b= 3.5...4.5\%$ ) і напруженість магнітного поля ( $H=(2.3...2.8) \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ), то досліджувана величина залишається практично незмінною.

Таким чином, результати дослідження значень кута змочування та зміни коефіцієнта поверхневого натягу базових масел і композиційних масел під час переробки МП свідчать про те, що їх змочувальна здатність може враховувати процеси тертя і зношування муфт дизеля внутрішнього згоряння. частини дизеля.

#### 4.1.3 Діелектричні та магнітні властивості моторної оливи.

При вивченні фізико-хімічних показників і властивостей нафти вимірювали її діелектричну проникність і магнітну проникність за методикою, зазначеною в пункті 2.5.5.

Виміряні значення діелектричної проникності і подальший розрахунок середнього значення показані на малюнку. 4.8.



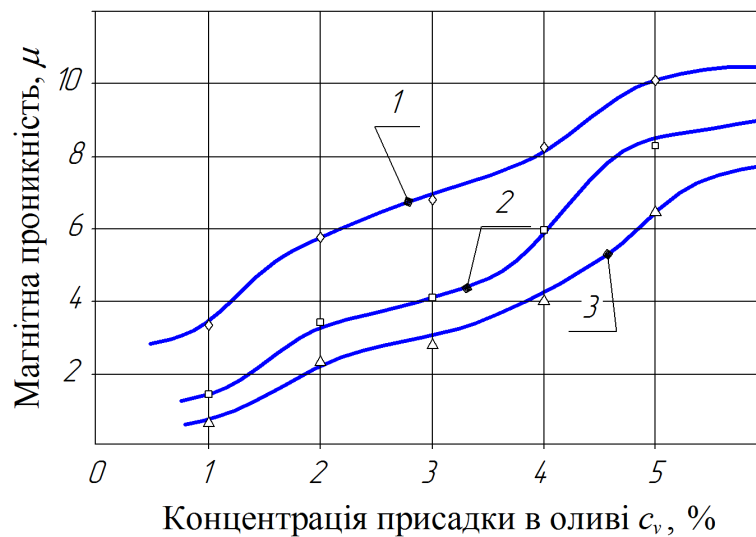
□ – Без обробки МР. ▨ – Оброблений МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Рисунок 4.8 – Середнє значення діелектричної проникності Масло моторне М10-ДМ

Встановлено, що обробка МР базової олії знижує діелектричну проникність олії на 0.5-10 %. Додавання присадок гліцерату міді знижує значення діелектричної проникності масла на 10-4.5% залежно від концентрації. Модифікація композиційного масла МР знижує діелектричну проникність на 1.3-50%.

Деформаційні властивості мікрокрапель, що оточують дисперсну фазу (частинки добавки) в магнітному полі, безпосередньо визначаються зміною магнітної проникності моторного масла.

Коли до масла додають добавки гліцерату міді, ефект екстракції крапель і, як наслідок, зниження швидкості розмагнічування та збільшення проникності масла стають більш вираженими. Встановлено, що магнітна проникність композитного масла зростає від вихідного значення зі збільшенням напруженості магнітного поля та зміною концентрації присадок. Вимірювання магнітної проникності як функції напруженості магнітного поля та зміни концентрації гліцерату міді показано на рисунку 4.9.



$$1 - H = 2,5 \cdot 10^4 \text{ А/м} \quad 2 - H = 1,2 \cdot 10^4 \text{ А/м} \quad 3 - H = 0$$

Рисунок 4.9 – Залежність магнітної проникності від вмісту добавки при різних значеннях напруженості магнітного поля

Встановлено, що проникність базової олії та композитної олії зростає зі збільшенням напруженості магнітного поля. Він також збільшується зі збільшенням концентрації добавки. Водночас проникність дисперсної фази присадок різної концентрації в олії значно відрізняється, ніж за її відсутності за однакового значення міцності МП. Тому в першому випадку (рис. 4.9. крива 1) крива залежності  $\mu(c_v)$  зростає, а в другому випадку (рис. 4.9. крива 2) крива залежності  $\mu(c_v)$  зменшується. Це пояснює те, що концентраційна залежність проникності досліджуваних композиційних масел під впливом МП згладжується.

Встановлено, що збільшення вмісту добавки гліцерату міді збільшує магнітну проникність у 8-10 разів, а збільшення напруженості магнітного поля збільшує магнітну проникність у 12-20 разів.

Отримані дані добре узгоджуються з обґрунтуванням (розділ 3.3.3) щодо різниці в ступеню деформації крапель олії з добавками та без них при зміні натягу МП.

Отже, встановлена особливість структурного впливу МП на моторні базові та композиційні оливи зумовлена процесом зміни їх діелектричної та магнітної проникності. Таким чином, можна ефективно контролювати зміни діелектричних

властивостей, магнітних властивостей і фізико-хімічних параметрів (таких як кінематична в'язкість, лужність, щільність тощо) моторного масла бути під контролем. .

## 4.2 Триботехнічні характеристики робочих поверхонь зразків, випробуваних на новітній приладі тертя СМЦ-2. 77МК-1.

Попередні випробування зразків проводили на приладх тертя СМЦ-2 та 77МК-1 для оцінки зміни характеристик поверхонь тертя деталей дизеля. При подачі масла в зону контакту досліджено процес його ознайомлення та визначено моменти і коефіцієнти тертя. Дослідження проводили з використанням базових і композитних масел, а також при обробці МП.

### 4.2.1 Знайомство зі зразковими спряженими площинами.

Експериментально фіксували процес припрацювання поверхонь тертя зразків трибомашини СМЦ-2 та 77МК-1 шляхом стабілізації значень температури, моменту тертя та рівноважної шорсткості зони тертя.

Видно, що процеси, що протікають в базовому маслі при зростаючих навантаженнях, відбуваються при високих температурах в зоні тертя. У реальному дизельному двигуні рівень навантаження  $P=8$  МПа був обраний з урахуванням умов використання деталей СNG.

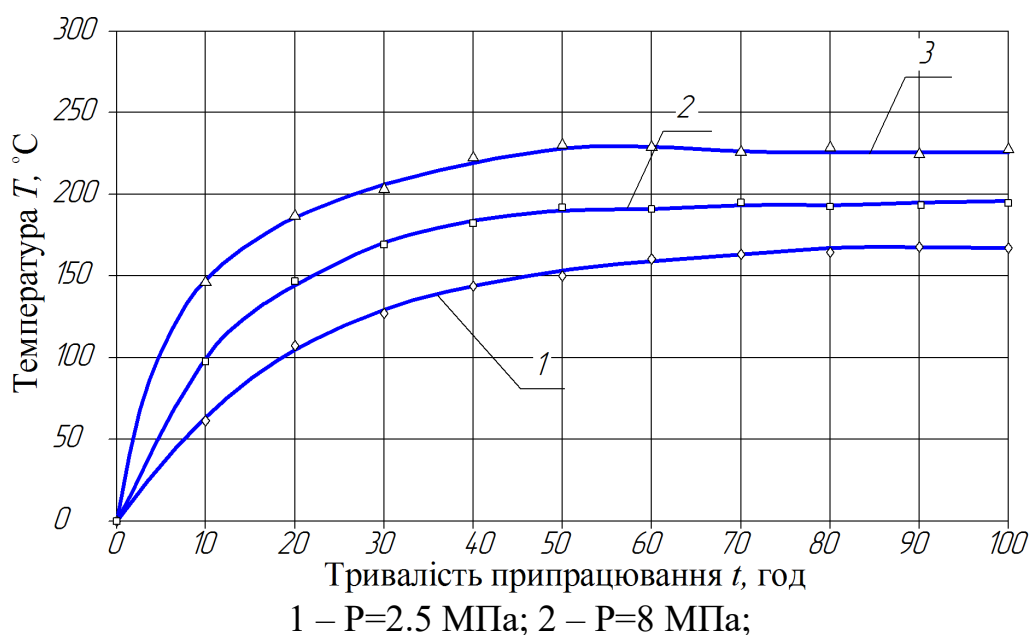


Рисунок 4.10 – Динаміка зміни температури на робочій поверхні

Під різні середовища базового моторного масла M10-G2k

Рівень навантаження ( $v=1$  м/с)

Таблиця 4.4 – Залежність температури (в секундах) від часу припрацювання ( $P=8$  МПа,  $v=1$  м/с) машини тертя СМЦ-2 в базовому маслі та композиційному маслі.  $b=4\%$ ) з наступним лікуванням МП ( $H= 2.5 \cdot 10^4$ )ранок)

Час випробування t, хв	Температура зони тертя T, °C			
	базове масло		композитне масло	
	Сирий	Оброблено МП	Сирий	Оброблено МП
10	145	142	136	128
20	166	160	150	140
30	178	167	160	147
40	187	172	165	148
50	193	180	160	148
60	197	181	159	147
70	197	181	157	148
80	198	181	156	147
90	198	180	157	148
10.0	198	180	157	148

У таблиці 4.4 наведені значення температури зони тертя в залежності від часу випробувань у разі фізико-хімічної модифікації моторного масла. Переробка базового масла МР. Додавання мідьвмісних присадок (комплексне масло). Переробка МП композитного масла.

Встановлено, що подача обробленої МП базової олії в зону тертя зменшує період припрацювання зразка на 10-18%. При подачі композиційного масла в зону тертя процес припрацювання відбувається в 1.1-1.7 рази, а при обробці МП - в 1.5-20 рази.

Втома поверхонь тертя зразків була експериментально скоригована шляхом стабілізації моментів сил тертя машин СМЦ-2 (табл. 4.5) і 77МК-1 (табл. 4.6).

Таблиця 4.5 – Залежність моменту сили тертя у % від часу припрацювання ( $P=8$  МПа,  $v =3.5$  м/с) машини тертя СМЦ-2 в середовищі базової оливи та композитної оливи ( $cV =4$ ) з подальшою обробкою МП ( $H= 2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Час	Момент тертя $M_{tr}$ , Н·м
-----	-----------------------------

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

випробування t, хв	базове масло		композитне масло	
	Сирий	Оброблено МП	сирий	оброблені
10	0.73	0.62	0.55	0.41
20	0.84	0.78	0.72	0.55
30	0.95	0.91	0.87	0.64
50	0.94	0.92	0.85	0.64
60	0.92	0.88	0.76	0.57
70	0.90	0.85	0.68	0.50

Таблиця 4.6 – Залежність моменту сили тертя від часу припрацювання ( $P=8$  МПа,  $v=35$  м/с) машини тертя 77МК-1 в середовищі базового масла та композитного масла ( $cV=4\%$ ). Потім обробка МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Час випробування t, хв	Момент тертя $M_{tr}$ , Н·м			
	базове масло		композитне масло	
	Сирий	Оброблено МП	Сирий	Оброблено МП
10	3.25	2.86	2.41	1.83
20	3.80	3.15	2.82	2.13
30	3.95	3.27	3.13	2.22
40	3.90	3.18	2.89	2.17

З таблиць 4.5 і 4.6 видно, що термін припрацювання залежить від умов, за яких здійснюється процес зношування. Обробка МППеріод обкатки композитних масел значно коротший і йде в тому ж порядку, що й дані в таблиці 4.4.

Характер зміни моменту сили тертя під час припрацювання вказує на наявність унікальних теплофізичних процесів, які відбуваються при появі тертя навіть у добре розтертих композитах. При терті в композиційному маслі припрацювання відбувається швидше і величина моменту сили тертя менша. Обробка МР модифікує як базову, так і композитну оливи та структурує їх, що призводить до швидшого періоду обкатки.

На початку операції склеювання зразка спостерігається велике значення моменту сили тертя. Це пов'язано з природою явища роботи на робочій поверхні. Поступове зменшення моменту тертя свідчить про перехід зразка муфти до стабільних режимів роботи. Зі збільшенням питомого навантаження з початку припрацювання спостерігається зменшення силової роботи і виділеного тепла в зоні контакту.

Особливості процесу припрацювання та періодичність зовнішнього тертя пов'язані з утворенням і руйнуванням вторинних структур, створених на поверхні тертя при її мідненні [89]. Про це свідчить зміна моменту сили тертя і коефіцієнта тертя з пройденим шляхом (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Залежність моменту тертя та коефіцієнта тертя від шляху для композиційного масла ( $cV = 4\%$ ), обробленого та необробленого МП ( $P=1.1$  МПа;  $v=0.34$  м/с;  $t_{пр}=270.0$  с) . )

Л□103, метри	MTR, Н□м		f	
	композитне масло		композитне масло	
	Сирий	Оброблено МП	Сирий	Оброблено МП
10	0.95	0.83	0.115	0.113
20	103	0.89	0.140	0.137
30	0.65	0.54	0.075	0.073
40	0.54	0.47	0.070	0.068
50	0.50	0.43	0.063	0.062
60	0.49	0.43	0.054	0.052
70	0.51	0.44	0.061	0.059

Видно, що після досягнення максимального значення моменту тертя зчеплення зразків, що експлуатувалися з композиційним маслом та необробленим МП, спостерігається подальше зниження до мінімального значення, характерного для стаціонарного режиму роботи. режим. За певних умов тертя. Крім того, олива, оброблена МР, має на 12-16% нижчий мінімальний рівень тертя, ніж базова олива, що демонструє ефективність обробки МР.

Аналіз табличних даних. 4.7 також видно, що зміна коефіцієнта тертя з пройденим шляхом має подібний характер зміни, як і момент сили тертя.

Крім заданих характеристик, на модернізованій приладі 77МК-1 вимірювали втрати потужності на тертя шляхом фіксації показників напруги та струму електродизеля постійного струму за допомогою вимірювальної частини обладнання (рис. 2.4).

Швидкість руху компресійного кільця, режим навантаження імітує режим припрацювання цього зразка фрикційної машини. Щоб порівняти втрату сили тертя, були проведені випробування в середовищі базового масла та композитного масла як без обробки, так і з обробкою МР. У таблиці наведено результати вимірювання втрат потужності дизеля постійного струму машини тертя 77 МК-1. 4.8.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Аналіз отриманих даних показує, що споживана потужність на тертя на 35-40% нижча в середовищі МР, модифікованому композитним маслом, порівняно з середовищем базового масла. Наявність мідного покриття та утворення регулярних мікронерівностей зменшують силу тертя під час склеювання відповідно.

Зазначимо, що зменшення сили тертя в цій муфті створює конфлікт між площею контакту та опором зсуву мікрорівномірності робочої поверхні. Разом модифікуючи масло, ця проблема вирішується, коли на тверду поверхню основного матеріалу зразка наноситься дуже тонка плівка м'якого металу (міді). При цьому опір зсуву в м'яких металах незначний і розмір площі контакту комплексу зразків також малий, оскільки навантаження сприймає тверда основа. Добуток цих значень залишається незначним. Це означає, що сили тертя мінімальні.

Результати дослідження режимів тертя при склеюванні зразків можна виразити у вигляді кривої Херші-Стрібека, тобто залежності коефіцієнта тертя від значення критерію Зоммерфельда (розділ 3.4).

Як видно, різні режими тертя в поєднанні з модифікацією масла знижують середнє значення коефіцієнта тертя в усьому діапазоні навантажень (табл. 4.9).

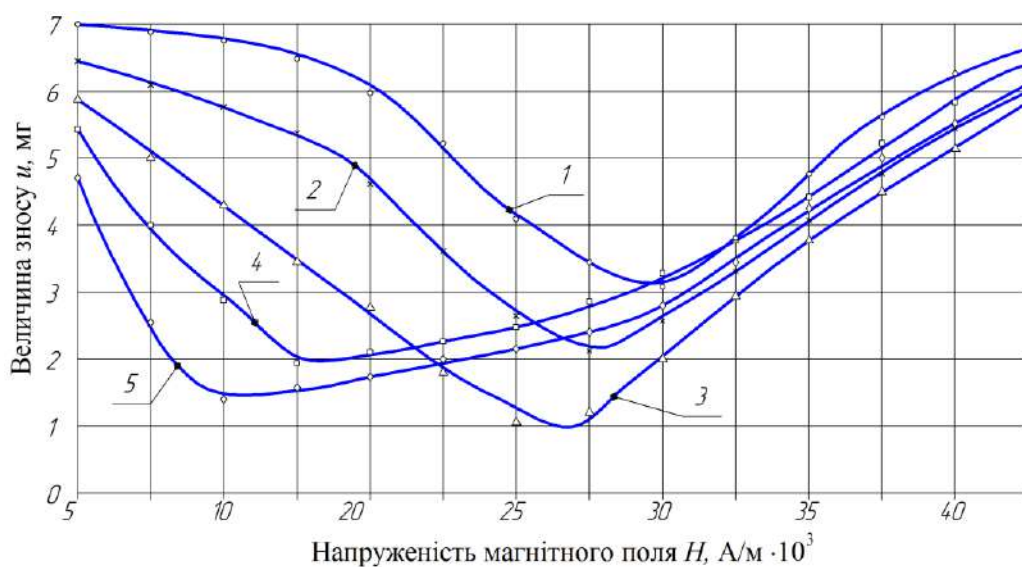
Таблиця 4.9 – Режими трибозв'язку та відносна зносостійкість зразка машини тертя 77МК-1 «Гільза циліндра – поршневе кільце».

№ зразка	Матеріал	Середній коефіцієнт тертя $f$ по режиму			Відносний довговічність
		механіка рідини	змішаний	дуже	
1	основний, М-10ДМ	0.009	0.017	0.140	10.0
2	композитний (4% гліцерат міді)	0.007	0.016	0.110	1.15
3	складний+ магнітне поле	0.004	0.013	0.080	1.23

Виявлено, що криві Херсі-Стрибека лежать дуже близько одна до одної і коефіцієнт тертя на цих ділянках зменшується. Змішана - 0.017-0.013 - 1.10...1.3 рази. Межа - 0.140 до 0.080 - в 1.5...1.8 рази.

При застосуванні МП-модифікованих композиційних олиव спостерігалось значне зниження коефіцієнта тертя у всьому діапазоні навантажень, особливо на найважливіших граничних режимах тертя. При введенні в моторну оливу добавки гліцерату міді спостерігається найбільше зниження коефіцієнта тертя в граничному режимі. ( $i_B=4\%$ ) Обробка напруги МП  $iH= 2.5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ .

Видно, що положення кривої залежить від концентрації гліцерату міді в базовій олії. Чим менша концентрація добавки, тим вище положення кривої залежності.  $u_m = f(H)$ . Крім того, характерною є наявність мінімального значення в межах кривої. Тобто для даної кривої існує оптимальний рівень міцності МП. Крім того, спостерігається така закономірність: Зі збільшенням концентрації добавки мінімальний знос зразка переміщується в область менших значень, а при зменшенні концентрації, навпаки, переміщується в область більших значень. МП напруга.



- 1 – Комплексне масло (стор<sub>B</sub>=1 %); Композитне масло (стор<sub>B</sub>=2%);  
 3 – Комплексне масло (стор<sub>B</sub>=4 %); 4 – Композитне масло (стор<sub>B</sub>=6%);  
 5 – Комплексне масло (стор<sub>B</sub>=8%)

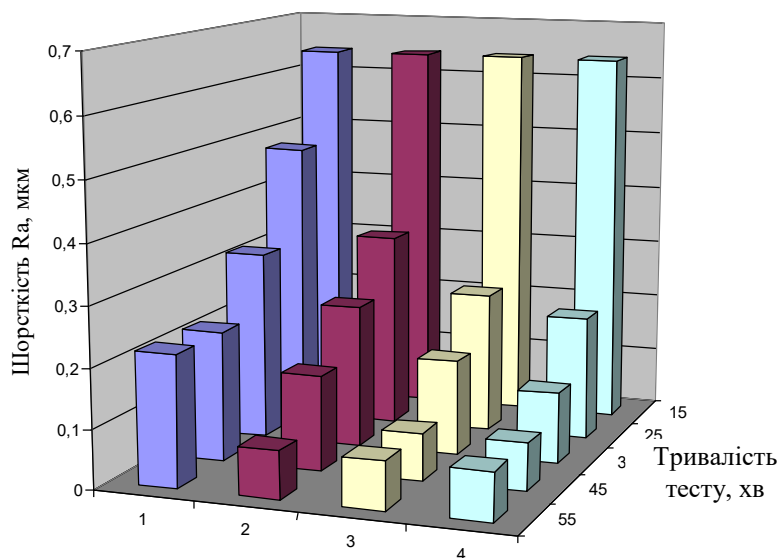
Рисунок 4.11 – Динаміка зміни величини зносу поверхні зразка в залежності від натягу МП при різних концентраціях добавки ( $P=8$  МПа;  $v=3.5$  м/с;  $t=10.0$  хв)

Примітно, що діапазон значень концентрації присадок для композиційно модифікованих МП масел такий, що найменший знос спостерігається при допустимих значеннях натягу МП. Діапазон концентрацій добавки гліцерату міді в олії становив 3.5–4.5 %, а діапазон напруги МР –  $(20-28) \cdot 10^3$  А/м. Найбільш прийнятними режимами є: Концентрація добавки -  $c_V = 40\%$  і напруга серед членів Сейму -  $H=2.5 \cdot 10^4$  А/хв.

#### 4.2.2 Мікрогеометрія поверхні тертя зразка.

Дослідження показали, що під час обкатки шорсткість поверхні змінюється і досягає збалансованого стану, в той же час мінімізуючи інтенсивність зношування. Результати дослідження представлені на рисунку. 4.12.

Отримані дані показують, що варіюючи шорсткість поверхні тертя можна концентрувати зсувну деформацію в шарі модифікованої олії з добавкою гліцерату міді та обробкою МП і контролювати процес зношування.



1 – Базове масло М-10Г2к; 2 – Базове масло, оброблене МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м). 3 – Комплексне масло ( $стор_B=4\%$ ); 4 – Композитне масло Оброблений МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Рисунок 4.12 – Динаміка зміни шорсткості поверхні тертя під час припрацювання зразка ( $P=8$  МПа,  $v=1$  м/с) у різних середовищах.

Крім того, комбінація фізичних і хімічних модифікацій має поверхнево-активні властивості і здатність навмисно утворювати тонкий шар антифрикційного металу (шар міді в цьому дослідженні) на поверхні тертя, особливо при значному терті що є. Процес балансування і зменшення шорсткості поверхні тертя в залежності від навантаження значно прискорює початковий знос.

Лабораторні дослідження показали, що зі збільшенням питомого навантаження збільшується шорсткість поверхні тертя в середовищі моторного масла. Шорсткість поверхні зменшується при випробуванні в середовищі модифікованого МР композитного масла, що містить гліцерат міді. Це пов'язано з тим, що активоване МП композитне масло взаємодіє з пластично деформованою поверхнею зразка, що призводить до адсорбційного зниження міцності поверхневого шару, а останнє сприяє згладжуванню та прискоренню мікрорівномірності. Формування збалансованої шорсткості робочої поверхні ( $Ra=0.08$  мкм).

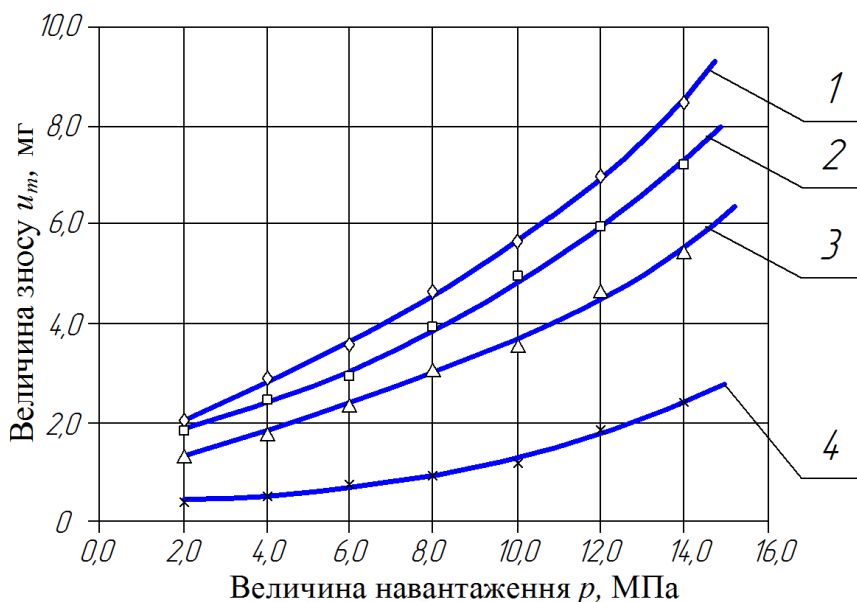
Таким чином, комбіноване застосування фізико-хімічної модифікації масла забезпечує зниження початкового зносу деталей при обкатці муфти і сприяє формуванню збалансованої мікрогеометрії поверхонь тертя. Утворюючи активне композитне масло та тонкий шар антифрикційного матеріалу поверх нього,.

#### 4.2.3 Коефіцієнт зношування та тертя поверхні зразка.

Дослідження величини та характеру зносу зразків у складному масляному середовищі МП корекція На додаток до зносу зразка в середовищі базового масла було показано, що на процес зносу суттєво впливають наступні фактори: Величина питомого навантаження, тривалість в'язучої дії, вміст присадок в маслі та ін. як величина напруги МП та її структурний вплив на диполі часток масла та добавки.

На малюнку показано результати дослідження окремих факторів. 4.13-4.14.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68



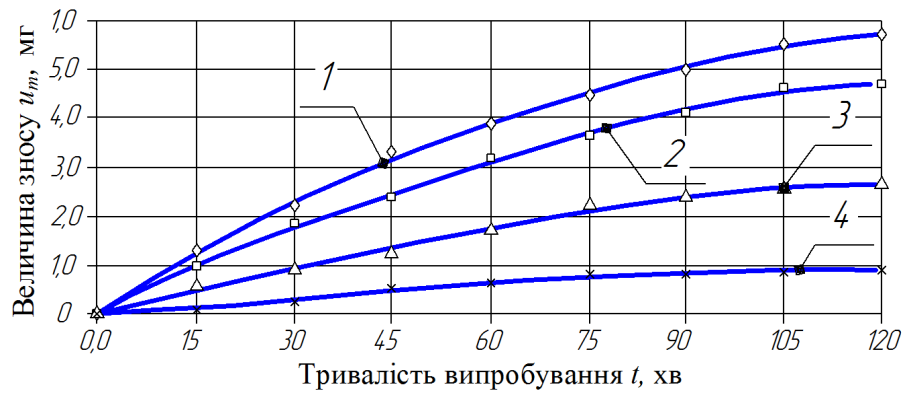
1 – Базове масло М-10Г2к; 2 – Базове масло, оброблене МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м). 3 – Комплексне масло ( $\text{стор}_B=4\%$ ); 4 – Композитне масло Оброблений МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Рисунок 4.13 – Залежність зношеної маси  $u_m$  зразка від навантаження  $p$  за умов  $n=35$  секунд-1;  $t=60$  хвилин. з різними маслами

Для всіх досліджуваних масел величина зносу зразків зростає зі збільшенням навантаження, але ступінь збільшення різна. Зразки гільз циліндрів, випробувані на приладі для стирання в композитному середовищі, показали менший знос порівняно з базовою оливою. ( $i_B=4\%$ ) Оброблена - в 2.5-40 рази, Необроблена - в 1.3-30 рази) МП ол. Навіть у середовищі МР-модифікованих базових масел з найбільш чутливими рівнями напруги знос знижується на 10-17%.

Це пояснюється зміною фізико-хімічних властивостей модифікованої МП оливи та нанесенням на поверхню тертя захисного шару міді. Обробка оливи на основі МР і композитних оливи створює кращі умови для процесу тертя, такі як прискорення припрацювання, зниження коефіцієнта тертя і отримання оптимальної мікрогеометрії.

Певні висновки стосуються також залежності величини зносу зразків гільз циліндрів від часу випробування (рисунок 4.14).



1 – Базове масло М-10Г2к; 2 – Базове масло, оброблене МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м). 3 – Комплексне масло ( $стор_B=4\%$ ); 4 – Композитне масло

Оброблений МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Рисунок 4.14 – Активаційна залежність зразків гільз циліндрів ( $P=8$  МПа;  $n=35$  с–1) з періодів тестування в різних середовищах

Встановлено, що знос зразків у певному маслі зростає за різними закономірностями та стабілізується через певний проміжок часу. При випробуваннях зразків з композиційним і композиційно модифікованим МП стаціонарний знос зразків зменшується в 1.5–20 і 30–50 разів порівняно зі зносом базового масла відповідно.

Характер зміни поведінки зразків як функції концентрації добавки гліцерату міді в маслах, які пройшли і не пройшли обробку МП, показано на рисунку 4.15.



▨ – комплексне масло; □ – Композитна олія, оброблена МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м);  $стор_B=10\%$ ;  $стор_B=30\%$ ;  $стор_B=4.5\%$  -  $стор_B=60\%$ ;  $стор_B=80\%$

Рисунок 4.15 – Діаграма залежностей для зразка операційгільза циліндра Від вмісту добавки гліцерату міді в композиційному маслі фрикційної машини 77МК-1 ( $P=8$  МПа;  $n=35$  с<sup>-1</sup>)

Результати показують, що при концентраціях добавки вище оптимального рівня хімічна енергія має пріоритет над трибохімічною енергією..

Розщеплення великих молекул олії, що повільно рухаються, і створення їхньої структури за допомогою МР збільшує рухливість деяких молекул олії та частинок добавки гліцерату міді. Оскільки магнітні поля є практично інерційними за своєю природою, увімкнення магнітного поля змінює в'язкість і змочуваність оливи, що негайно змінює коефіцієнт тертя на з'єднанні зразка частини СРГ.

Результати оцінки зносу муфти «роликів колодка» машини СМЦ-2 наведено на рисунку. 4.16.

Ми виявили, що модифікація масла за допомогою присадок зменшує знос, дозволяючи відносне зниження зносу до 23% порівняно з базовим маслом М10-ДМ. Найбільш ефективним методом фізичної модифікації є вплив МП на комплексні масла. При цьому відносний знос знижується на 25-35%.

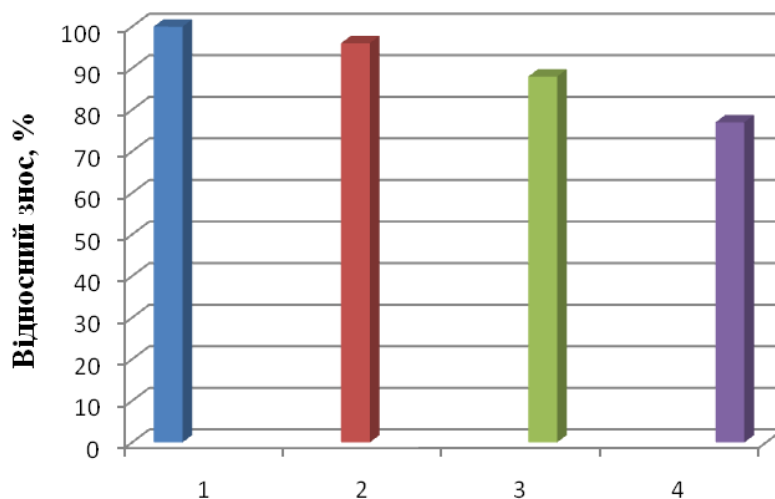
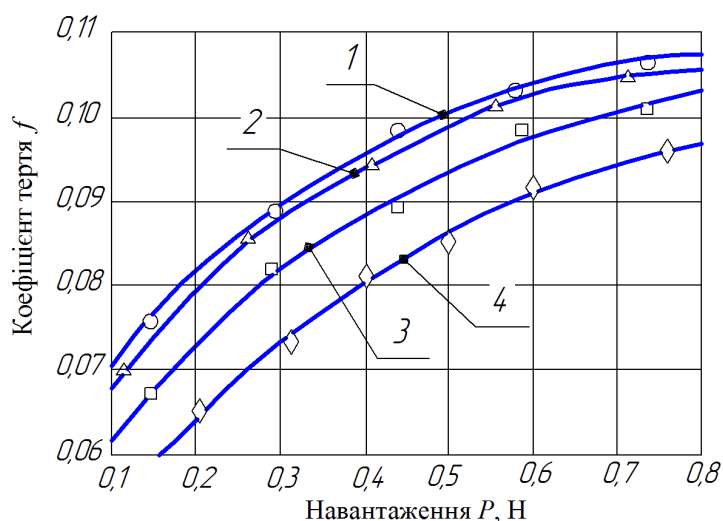


Рисунок 4.16 – Відносний знос зразка машини тертя СМЦ-2 з базовим моторним маслом М10-ДМ (1); базове маслофіксований МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м) (2);  $V=4\%$ ) (3); Композитне масло модифікації МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м) (4)

Результати залежності коефіцієнта тертя від навантаження та властивостей модифікації базової оливи наведено на рисунку. 4.17.



1 - базове масло М-10ДМ, 2 - базове масло модифіковане МП, 3 - композитне масло, 4 - композитне масло модифіковане МП ( $i_B=4\%$ ;  $H=2.5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ )

Рисунок 4.17 – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження в трибосистемі зразкової деталі КПП.

При додаванні в масло добавки гліцерату міді спостерігалось значне зниження моменту і коефіцієнта тертя в порівнянні з заданим показником базової олії, подальше зниження фіксувалось при зміні МП. Підтримуюча здатність масляної плівки збільшується в процесі модифікації.

Як видно з діаграми. 4.17. зниження коефіцієнта тертя порівняно з базовою оливою для модифікованого базового МП, композитного модифікованого МП і композитного модифікованого МП становило в середньому 8–10%, 20–38% і 35–40%. Отримані дані можна апроксимувати експоненціальною залежністю. Вважається, що дія МП посилює процес адсорбції масла на поверхні трибопари деталі.

Під час експерименту реєстрували навантаження, при якому відбувалося зчеплення поверхні. Результати порівняльного тесту на складність показані в таблиці. 4.10.

Навіть при модифікації масла додаванням до 0.1% добавки гліцерату міді показники трибологічних властивостей значно знижуються в порівнянні з базовим маслом, що свідчить про зниження зносу «масла». Покращено фрикційні технічні властивості зчеплення «Pad Roller» і поверхні автомобіля. Подальша

обробка МП оливи позитивно вплинула на триботехнічні властивості поверхні тертя та характеристики моторної оливи.

Таблиця 4.10 –Значення триботехнічних властивостей зразків муфт при застосуванні фізико-хімічної модифікації в поєднанні з моторним маслом і добавками( $cV = 4\%$ )та и парламенту( $H=2.5 \cdot 10^4 A/m$ )

навантаження, $F_n, H$	Результати випробування масла							
	базове масло				композитне масло			
	сирий		оброблені		сирий		оброблені	
	Момент тертя, МКр, Нм	коефіцієнт тертя, ф	Момент тертя, МКр, Нм	коефіцієнт тертя, ф	Момент тертя, Маунтл, Нью-Мексико	коефіцієнт тертя, ф	Момент тертя, МКр, Нм	коефіцієнт тертя, ф
72.5	0.133	0.0735	0.123	0.0720	0.118	0.0620	0.113	0.0526
137	0.323	0.0890	0.296	0.0816	0.282	0.0776	0.242	0.0680
210	0.534	0.0982	0.486	0.0895	0.474	0.0873	0.434	0.0794
284	0.738	0.1016	0.569	0.0784	0.691	0.0951	0.662	0.0886
354	0.966	0.1063	0.919	0.1011	0.919	0.1011	0.898	0.0995
420	схопив	схопив	схопив	схопив	1.171	0.1075	0.969	0.1021
530	схопив	схопив	схопив	схопив	схопив	схопив	схопив	схопив

Після введення добавки з одночасним впливом МП коефіцієнт тертя та зв'язуючий момент зразка «колодчастий ролик» дещо зменшилися, а опорна здатність масляної плівки значно зросла. Навантаження, при якому відбувалося зчеплення з поверхнею, зросло з 420 Н до 530 Н, або на 32.3%. Це перевищує відносну похибку вимірювання.

Вплив МП посилює адсорбційно-дифузійний процес, що призводить до утворення стійких «насичених» активних елементів добавки біля поверхні масла, з одного боку, і шару біля поверхні фрикційного зв'язку, з іншого боку.

Таким чином, дія МП на композиційні масла покращує триботехнічні властивості зразків трибопар за рахунок застосування міді при обкатці необроблених і необроблених композитних масел, покращує несучу здатність і покращує антифрикційні властивості. Я лікувалася МП. Для стабілізації трибологічних властивостей масла під дією МП необхідне оптимальне значення

напруженості поля.  $H=2.5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$  і необхідний час обробки до 3 годин. Подальша дія МП на оливкову олію не призводить до суттєвого підвищення значень досліджуваних показників, але утримує їх практично на одному рівні.

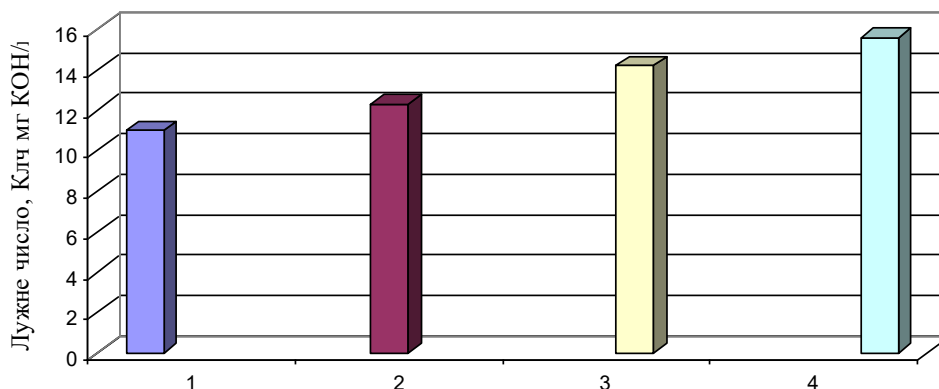
Основна дія МП проявляється вже в перші години роботи трибопарі і має досить тривалу післядію, підвищуючи значення протизадирних властивостей масла і показники опорної здатності трибопарі. спостерігалось протягом наступних кількох годин.

Дослідження, проведені на фрикційних приладах СМЦ-2 і 77МК-1. показують, що при обробці моторної оливи МП можна контролювати значення триботехнічних властивостей муфти зразок-деталь з урахуванням умов тертя.

### 4.3 Вплив фізико-хімічної модифікації масла на властивості поверхні тертя муфти вузлів компресора

#### 4.3.1 Зміни показників і властивостей риформату.

Результати фізико-хімічного аналізу (рис. 4.18) також підтвердили ефективність запропонованого комбінованого способу модифікації моторної оливи.



1 - базове масло, 2 – Базове масло, оброблене МП ( $H=2.5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ).

3 – Комплексне масло (стор<sub>в</sub>=4%); 4 – Композитне масло

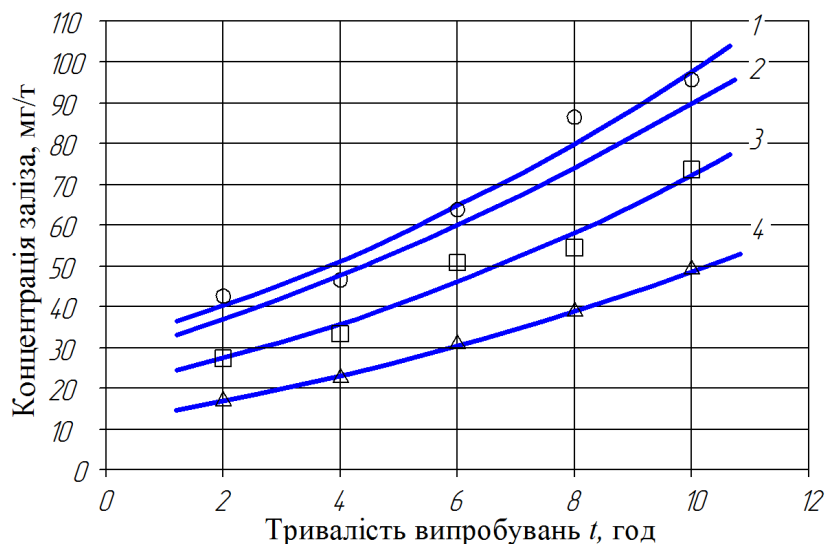
Модифікований МП ( $H=2.5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ )

Рисунок 4.18 – Лужні властивості масла під час випробування компресора (t=10 годин)

Було виявлено, що кислотно-лужні властивості гідравлічного масла були покращені. При цьому показник лужності збільшився на 10–15% порівняно з базовою оливою.

Зниження кінематичної в'язкості також спостерігалось в гідравлічній олії, модифікованій добавкою гліцерату міді та обробкою МР, але ступінь зміни був меншим, ніж у базовій олії.

Додатково був проведений спектральний аналіз масла на наявність основних елементів індикатора зносу в масляній системі компресора. Отримані результати дозволили побудувати залежність концентрації таких елементів, як залізо та алюміній, від періоду дослідження (рис. 4.19. 4.20).



1 - базове масло М-10ДМ, 2 – базове масло модифіковане МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м);  $B=4\%$ ); 4 – Композитне масло Модифікований МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

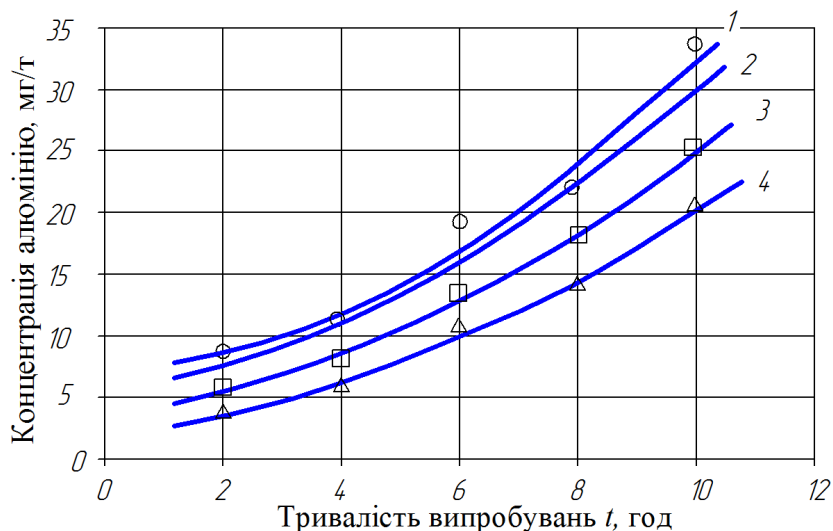
Рисунок 4.19 – Залежність концентрації заліза від часу випробування компресора

У порівнянні з базовими маслами концентрація заліза в маслах, модифікованих МП, знижена на 5-7%, при модифікації добавками - на 20-26%, а при комбінованій модифікації - на 50-80%.

Характерна крива розподілу вмісту алюмінію в олії наведена на рисунку 4.20.

Зверніть увагу на те саме, що на схемі. 4.19 Коли масла модифікуються шляхом додавання присадок або обробок МР, концентрація алюмінію в маслі також має тенденцію до зменшення.

Випробувана моторна олива М-10ДМ є сумішшю дистилатних і залишкових компонентів, а склад присадок - містить комплексні сполуки, тому до її складу, крім основних компонентів, входять інгібітори корозії, містяться ПАР, очищаючі диспергатори та інгібітори іржі. - Окислювальні, протизносні добавки, домішки води, кисню повітря. Це значно ускладнює інтерпретацію експериментальних результатів.



1 - базове масло М-10ДМ, 2 – базове масло модифіковане МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м);  $\delta_B=4\%$ ); 4 – Композитне масло Модифікований МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Рисунок 4.20 – Залежність концентрації алюмінію від часу випробування

Якщо енергії МР недостатньо для розриву міцних ковалентних зв'язків у багатокомпонентній системі, то можна припустити, що спостережувані ефекти зумовлені в першу чергу зв'язково-дисоціативними структурними процесами. Зовнішня дія МР в рухомому шарі рідини створює умови для формування нової структурної організації системи. З одного боку, відбувається процес порушення дистантного порядку у вихідному стані (процес дисоціації), а з іншого — процес

спонтанної організації просторово-часового порядку за рахунок утворення активних комплексів з некомпенсованими зв'язками. Це призводить до появи нових властивостей, наданих іншою складною макромолекулярною сукупністю частинок масла та присадок (процес асоціації).

4.3.2 Зміни триботехнічних властивостей робочих поверхонь деталей у риформованому масляному середовищі в модельному фізичному обладнанні (компресорі).

Дослідження проводили на фізичній моделі установки (компресор Forte FL-24) для моделювання реального процесу роботи головної муфти дизеля внутрішнього згоряння. Показником ефективності експлуатації є зношеність деталей трибомуфти, яка визначається за параметрами гідравлічної рідини (спектральний аналіз) та гравіметричними методами.

В результаті порівняльних випробувань були визначені абсолютні значення і відносні зміни маси фрикційної частини ЦПГ при випробуванні компресора в номінальному режимі (тиск = 10 МПа, частота обертання 230 хв-1) . ) Масло з модифікованими добавками, введеними після ретельного перемішування (сV = 4%), також виконано обробку МП. (Н=2.5·104А/м).

У таблиці наведено результати обстеження щодо зносу деталей компресора.  
4.11.

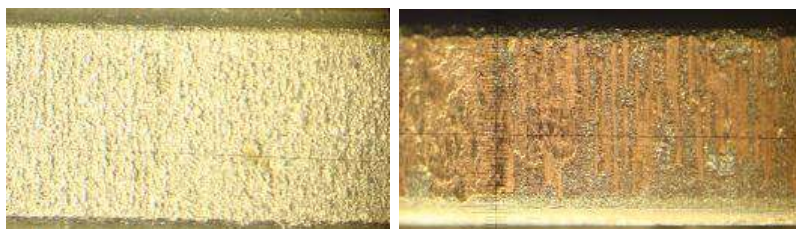
Таблиця 4.11 –Знос деталей компресора Форте ФЛ-24 (Р=0.4 МПа, Т=80 оС, t=10 годин)

моторне масло	Середнє зменшення маси третьових частин, мг				
	поршневе кільце			поршень	поршень палець
	верхній	нижче	оливкова олія		
основний М10-Г2к	2.84	1.63	2.11	6.88	305
Базовий модифікований МП(Н=2.5·104А/м)	2.56	1.48	1.88	6.27	2.76
композитний(сV = 4%)	1.56	1.32	1.26	5.94	2.32
композитний(сV = 4%)Модифікований МП (Н=2.5·104А/м)	1.43	1.25	1.35	505	209

З'ясовано вплив методів риформінгу масла на знос основних тертьових частин компресорів СПГ. Зокрема, додавання в масло добавки гліцерату міді позитивно впливає на властивості кілець і швидкість зношування. Швидкість зносу компресійних кілець знижується в 1.2-1.8 разів. У 1.5-1.6 рази більше кільця масляної ємності. Швидкість зносу поршня зменшується в 1.2 рази, а поршневого пальця – в 1.3 рази. Коротше кажучи, встановлено позитивний вплив удосконалень, які зменшують знос тертьових частин компресорів СПГ.

Найбільш ефективним є комплексний фізико-хімічний вплив модифікації нафти. Так, знос поршневих кілець, використання композитного масла, обробленого МР( $H=2.5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ), відповідно, зменшуються в 1.5...2.1 раза, поршня – в 1.4 раза, поршневого пальця – в 1.5 раза.

Крім того, однією з можливих причин зниження зносу деталей тертя є покращення триботехнічних властивостей поверхонь деталей тертя. На діаграмі. На рис.4.21 представлена металографічна структура поверхневого шару верхнього поршневого кільця компресора до та після комбінованої конверсії масла запропонованим способом.



а) б)

Рисунок 4.21 – Поверхневий шар верхнього компресійного кільця компресора до (а) і після (б) фізико-хімічної модифікації моторної оливи та комбінації присадок ( $i_b=4\%$ ) та и парламенту ( $H=2.5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ) ( $\times 70.0$ )

Таким чином, на основі проведених досліджень ми виявили, що введення добавки до металевого покриття гліцерату міді з подальшою обробкою МП можна запропонувати як найбільш прийнятний спосіб у поєднанні з фізико-хімічною модифікацією.

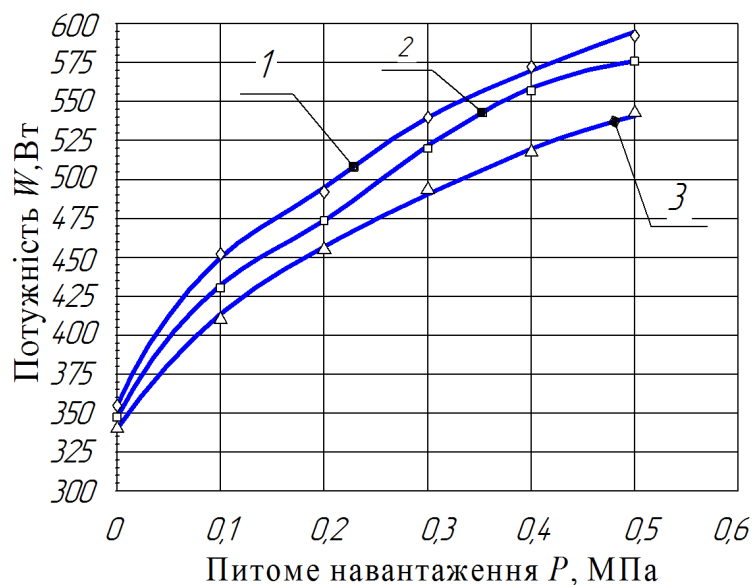
					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Знаючи також моменти і навантаження сил тертя в системі, можна визначити коефіцієнт тертя муфти «гільза циліндра — поршневе кільце» компресора. Змінюючи коефіцієнт тертя та критерій Зоммерфельда, можна виявити характерний режим тертя в конкретному сполученні частини СРГ у певний час.

Дослідження показали, що зниження потужності, споживаної компресором, також є позитивним в результаті модифікації базової оливи добавками та обробки МП (рис. 4.22).

Ми виявили, що споживання електроенергії має тенденцію до зниження на 7-12% при заданому навантаженні, коли компресор працює на рифорованій олії.

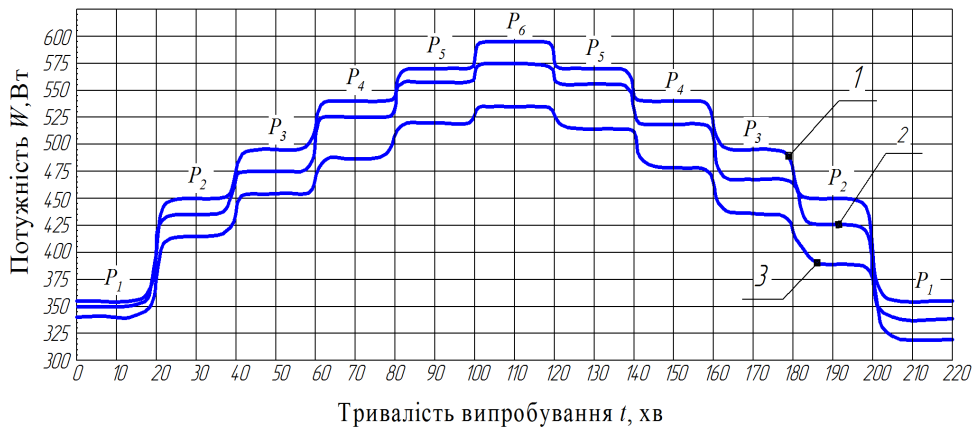
Результати цих досліджень свідчать, що модифіковані оливи з добавками та обробкою МП ефективні як у режимі навантаження, так і в режимі розвантаження, оскільки в обох випадках знижується рівень втрат сили тертя.



1 - базове масло М-10ДМ,2 – Комплексне масло (стор<sub>В</sub>=4%) – комбінована масляна модифікація МП (Н=2.5·10<sup>4</sup> А/м)

Рисунок 4.22 – Залежність споживаної потужності компресора від питомого навантаження

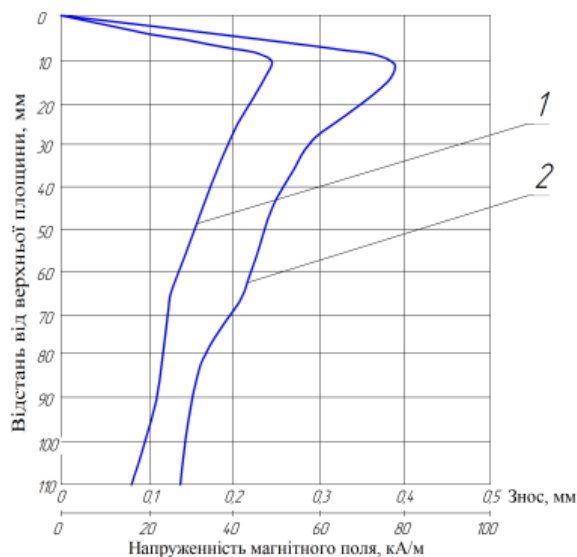
Ми також досліджували зміну потужності, споживаної компресором під час завантаження та розвантаження (рис. 4.23).



1 – Базове масло М-10ДМ, 2 – Комплексне масло (стор<sub>в</sub>=4%) – комбінована масляна модифікація МП (H=2.5·10<sup>4</sup> А/м)

Рисунок 4.23 – Зміна потужності компресора під час навантаження та розвантаження: P<sub>2</sub>=0.2МПа; P<sub>5</sub>=0.4МПа

У цьому дослідженні на компресор СРГ, що використовує композитну оливу, було накладено магнітне поле від соленоїда з конфігурацією швидкості обертання, яка відтворювала структуру зношування базової оливи, і дослідження показало, серед іншого, що картина зношування значно змінюється. Площа верхнього компресійного кільця (рисунок 4.24).



1 – Графік зносу робочої поверхні,  
2 – Графік напруженості магнітного поля

Рисунок 4.24 – Зміна значень напруженості магнітного поля в залежності від характеру зносу гільзи циліндра компресора Forte FL-24.

Змінюючи щільність числа витків, що містяться в обмотці котушки в залежності від робочої поверхні гільзи циліндра, можна контролювати характер зносу шляхом зміни напруженості магнітного поля на циліндричній поверхні, що створюється.

У той же час трибомуфти з нерівномірним режимом навантаження також відчувають нерівномірний знос локальних ділянок робочої поверхні. Це означає нерівномірність зносу. Щоб компенсувати цей тип зносу, необхідно знати фактичний характер зносу та розрахувати характер розподілу напруженості магнітного поля.

#### 4.4 Виявлення зміни електричного опору масляного шару в деталях муфти кожної деталі одноциліндрового дизеля та режим його тертя

Відомо, що зміна режиму тертя в трибомуфті «гільза циліндра – поршневе кільце» (рис. 4.25) може визначатися значенням критерію Зоммерфельда [56]. Однак для точного визначення режиму тертя необхідно знати товщину шару масла в зазорі, зміну тиску, втрату потужності на тертя або коефіцієнт тертя.

У даній роботі режим тертя також визначали за залежністю електричного опору масляного шару від значення критерію Зоммерфельда (рис. 4.25), згідно розробленої методики вимірювання (п. 2.6.5).

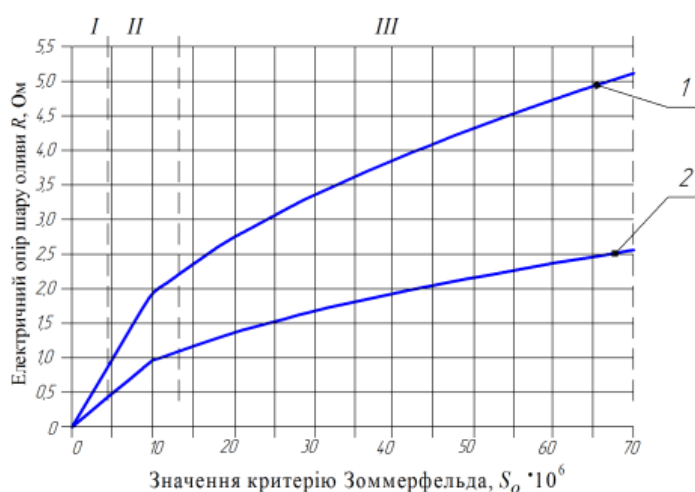
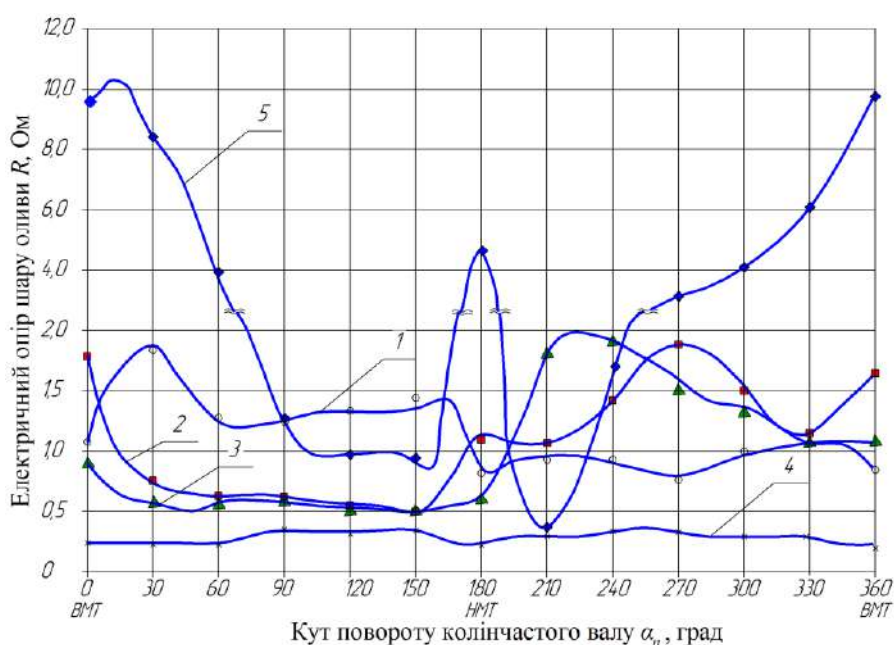


Рисунок 4.25 – Визначення режиму тертя трибомуфти «гільза циліндра – поршневе кільце» залежно від електричного опору шару моторного масла: 1 – базове масло, 2

–Комплексна модифікація масла МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)а - крайова зона тертя. II – Зона змішаного тертя. III – Зона рідинного тертя

Виявляється, кожному значенню критерію Зоммерфельда відповідає певне значення електричного опору. Показано, що композиційна модифікація моторних олив знижує електричний опір у різних режимах тертя порівняно з базовою оливою.

На рисунку наведено результати дослідження зміни мастилостійкості в зазорі муфти деталей КПП на дослідному поршні одноциліндрового агрегату. 4.26.



1 – сполучення «Верхнє компресійне кільце-гільза циліндра». 2 – Кон'югат «гільзи циліндра проміжного компресійного кільця». 3 – Кон'югат «гільзи циліндра нижнього компресійного кільця». 4 – З'єднання «масляного кільця та гільзи циліндра». 5 – Використання «гільзи поршневого циліндра»

Рисунок 4.26 – Зміна опору композитного шару ( $i_b=4\%$ )маслоМодифікований МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)У спряженні частини КПП за кутом повороту колінчастого вала ( $n=120$  хв-1.  $R_{max}=2.1$  мкм)

Дослідженнями встановлено, що найбільший електричний опір масляного шару спостерігається в муфтах «поршень-втулка», особливо в області верхньої мертвої точки і верхньої мертвої точки (рис. 4.26. крива 5); воно змінюється в

залежності від положення поршень. Поршень всередині гільзи. Після сходження поршня з верхньої мертвої точки і досягнення максимальної швидкості в діапазоні кутів повороту колінчастого вала від  $90^\circ$  до  $163^\circ$  спостерігається значне зниження електричного опору масляного шару. Така ж картина спостерігається при підйомі поршня з ВМК після трансляції в межах кута повороту колінчастого вала від  $198^\circ$  до  $224^\circ$ , після чого електричний опір зростає до максимального значення у ВМК.

Зміна загального електричного опору масляного шару вздовж муфт 1-4 має різні характеристики і залежить від кута повороту колінчастого вала. При русі поршня від ВМК до НДЦ максимальний опір масляного шару реєструється в муфті «Гільза циліндра верхнього компресійного кільця» (рис. 4.26. крива 1).

Дещо меншому значенню електричного опору масляного шару відповідає сполучення «середнє компресійне кільце-гільза циліндра» і «нижнє компресійне кільце-гільза циліндра» (рис. 4.26. криві 2. 3). Електричний опір масляного шару найменший у муфті "масляне кільце - гільза циліндра", яке суттєво не змінюється при зміні кута повороту колінчастого вала (рис. 4.26. крива 4).

На відміну від типового електричного опору масла в муфті «верхнє компресійне кільце — гільза циліндра» (рисунок 4.26. крива 1), електричний опір масла в муфті «середнє компресійне кільце — гільза циліндра» становить 10 е. ..20 разів нижче (рисунок 4.26. крива 2). Тоді різниця між загальним електричним опором і електричним опором масла в муфті «кільце-втулка» є електричним опором масла в муфті «поршневе кільце» (рисунок 4.26. крива 3). Він також значно перевищує електричний опір масла в «кільцевій муфті». Однак електричний опір масла в муфті «поршневе кільце» при русі поршня від ВМК до ВМК в 1.8 рази більше, ніж при русі від ВМК до ВМК. Зміна електричного опору масла в муфті «кільце-втулка» для подвійного ходу поршня має протилежний характер.

Відповідно до характеру зміни електричного опору в муфті між гільзою циліндра і поршневим кільцем електричний опір є мінімальним, коли поршень зупиняється в мертвій точці, і збільшується, коли поршень досягає своєї

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

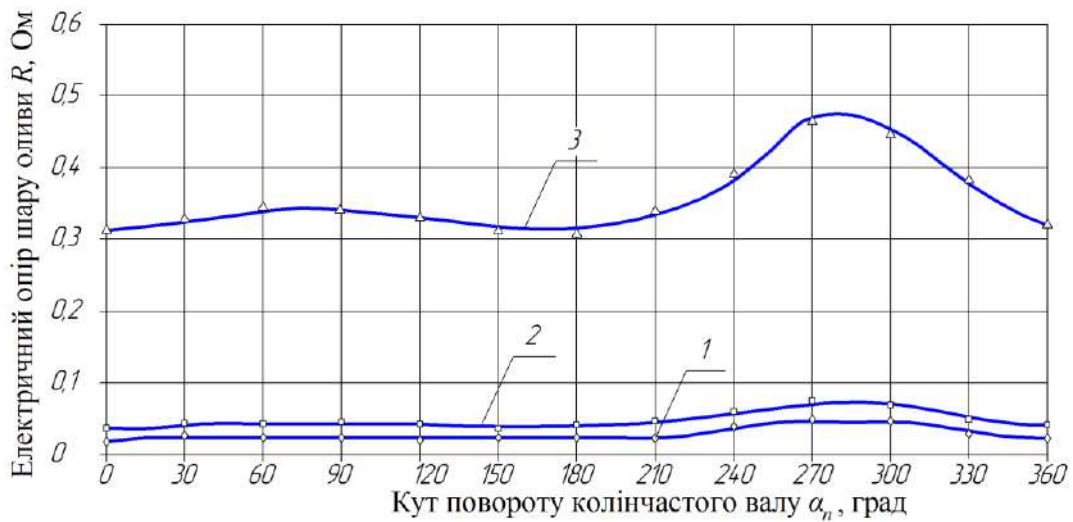
максимальної встановленої швидкості. Через те, що коли поршень досягає максимальної швидкості, рухаючись від верхньої мертвої точки до верхньої мертвої точки, електричний опір масляного шару в 1.5 рази більше, ніж коли поршень опускається від верхньої мертвої точки до верхньої мертвої точки. Зверніть увагу . Ці результати вказують на наявність ще одного масляного шару між стороною кільця та гільзою циліндра, коли поршень рухається від ВМК до ВМК. Появі розділового шару сприяє не тільки швидкісний режим, але і наявність масляного шару на поршні, по якому їздять кільця при русі від верхньої мертвої точки до верхньої мертвої точки. Що стосується інших кілець, коли поршень рухається від верхньої мертвої точки до нижньої мертвої точки, зворотне конічне кільце масляного піддону або нижнє кільце, ймовірно, забирає масло зі стінки гільзи циліндра, послаблюючи можливе змащування рідиною (Малюнок 1). 4.26. криві 2. 3 і 4).

Отримані дані показують, що під час подвійного ходу поршня досліджувані поверхні взаємодіють з різними режимами тертя, такими як граничне змащення, змішане змащення та гідродинамічне змащення. Режим обмеження тертя сприяє активації поверхні шляхом додавання гліцерату міді, посилюючи ефект зменшення тертя та втрати потужності.

Шорсткість робочої поверхні гільзи циліндра істотно впливає на позитивний ефект модифікації добавкою гліцерату міді та МП (рисунок 4.27).

При збільшенні шорсткості від 1.4 мкм до 2.1 мкм електричний опір шару масла в муфті «поршневе кільце-гільза циліндра» зростає в 1.6-1.9 раза, а при шорсткості  $R_{max}=3.2$  мкм - в 6.6 раза. -8.5 Масу. Порівняння з гільзою з шорсткістю 2.1 мкм (у момент досягнення поршнем максимальної швидкості) (рис. 4.27. криві 2 і 3).

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84



1 –  $R_{max}=1.4$  мкм, 2 –  $R_{max}=2.1$  мкм, 3 –  $R_{max}=3.2$  мкм

Рисунок 4.27 – Опір композитного шару ( $c_v = 4,0\%$ ) модифіковане масло МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м) зчеплення «гільзи циліндра і поршневого кільця» по куту повороту колінчастого вала і шорсткості гільзи ( $n=120$  хв-1)

Цю закономірність можна пояснити посиленням гідродинамічного ефекту при збільшенні шорсткості гільзи циліндра, що підтверджено теоретичними дослідженнями ПП. Усов [68], а експериментально використовували середні значення перепадів напруги і струму, отримані в муфті «поршневе кільце-гільза циліндра» з шорсткістю гільзи 1.4-3.2 мкм (додаток Б, табл. Б).

У режимі гідрозмащення ділянка поршневого кільця, що примикає до робочої поверхні гільзи циліндра, відділяється від неї тонким шаром масла. Оскільки товщина цього шару набагато тонша, ніж прилегла область, ефект обробки МП маслом більш виражений через менший електричний опір композитного шару модифікованого масла. При вході в зону змішаного тертя і зону критичного тертя відбувається механічна і фізико-хімічна активація області, прилеглої до гільзи циліндра.

Зверніть увагу на залежність отриманого коефіцієнта тертя від кута повороту колінчастого вала (рисунок 4.28).



1 - базове масло, 2 -Комплексна модифікація масла МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м).

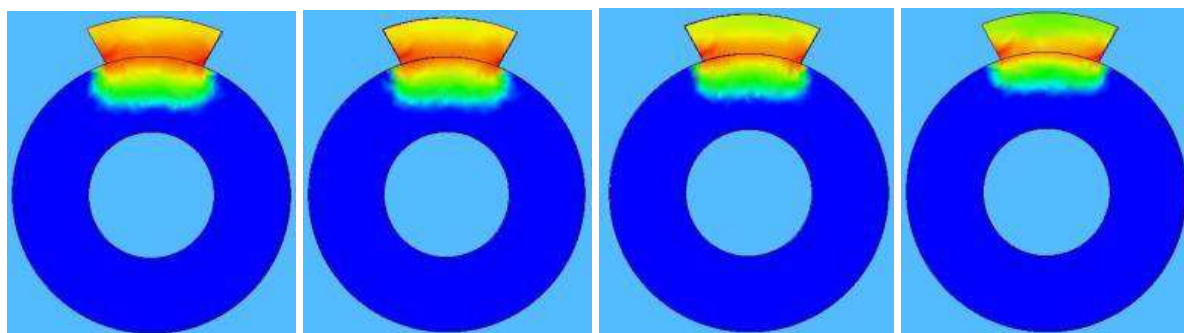
Рисунок 4.28 – Графік порівняння коефіцієнта тертя трибомуфти «Гільза циліндра – поршневе кільце» ( $n_{\text{кв}}=120$  хвилини-1)

Збільшення сумарного навантаження унеможливило збереження необхідної товщини клина масляної плівки матеріалу, а в досліджуваних муфтах реалізовано граничний режим тертя з коефіцієнтом тертя в діапазоні значень 0.09...0.125.

Це пояснюється наявністю шару масла поверх поршня в одноциліндрових агрегатах і високошвидкісним режимом руху, при якому поршень переходить в режим гідродинамічного тертя.

#### 4.5 Зміни поля напружень на з'єднанні деталей зразка і ЦПГ при заміні моторного масла

Локальний характер супряженого зношування досліджуваних зразків і деталей підтверджено дослідженнями поля напружень. Аналіз поля напруги та результати розрахунку були виконані методом скінченних елементів з використанням пакета COSMOSWorks, інтегрованого в систему САПР SolidWorks, і відповідно до методології, описаної в розділі 2.6.6. Характерний розподіл поля напружень у зв'язці зразка «роликів подушка» наведено на рисунку. 4.29.



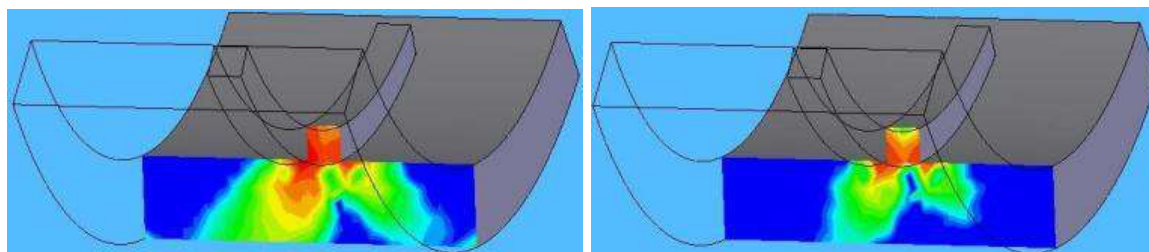
а) б) в) г)

а – базове масло, б – базове масло модифікації МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м);  
 с – Композитне масло ( $\text{стор}_B=4\%$ ); г – модифіковане комплексне масло  
 МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Рисунок 4.29 – Характерний розподіл поля напружень в перерізі муфти зразка «роликів колодка», випробуваного на приладі тертя СМЦ-2 в різних мастильних середовищах.

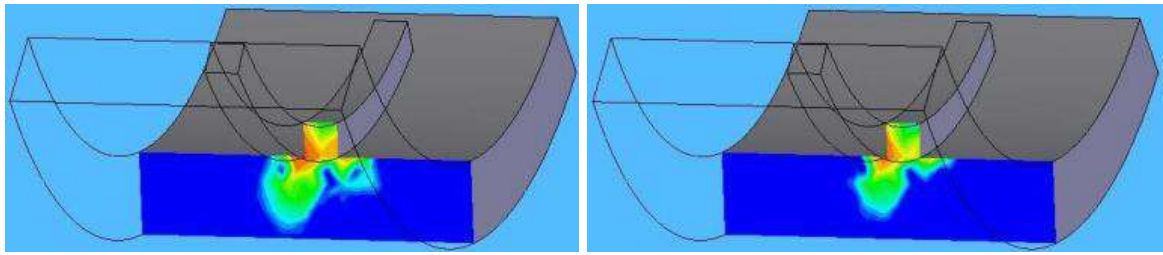
Видно, що максимальний рівень напруги зосереджений у вузькій зоні контакту зразка. Коли масло модифікується добавками і обробкою МР, напруга в цій зоні знижується. Це можна пояснити характером впливу фізико-хімічних модифікацій добавками та фізичними полями на властивості та якісні показники оливи, а також на триботехнічні властивості поверхневого шару зразків. Це підтверджується зменшенням інтенсивності та величини зношування, а також зменшенням моменту тертя. Моделювання підтверджує ефективність фізико-хімічної модифікації нафти, яка поєднує як додавання гліцерату міді, так і її обробку МП.

Результати дослідження зчеплення зразка «гільза циліндра-поршневе кільце» в умовах випробувань машини тертя 77МК-1 наведені на рисунку. 4.30.



а)

б)



В)

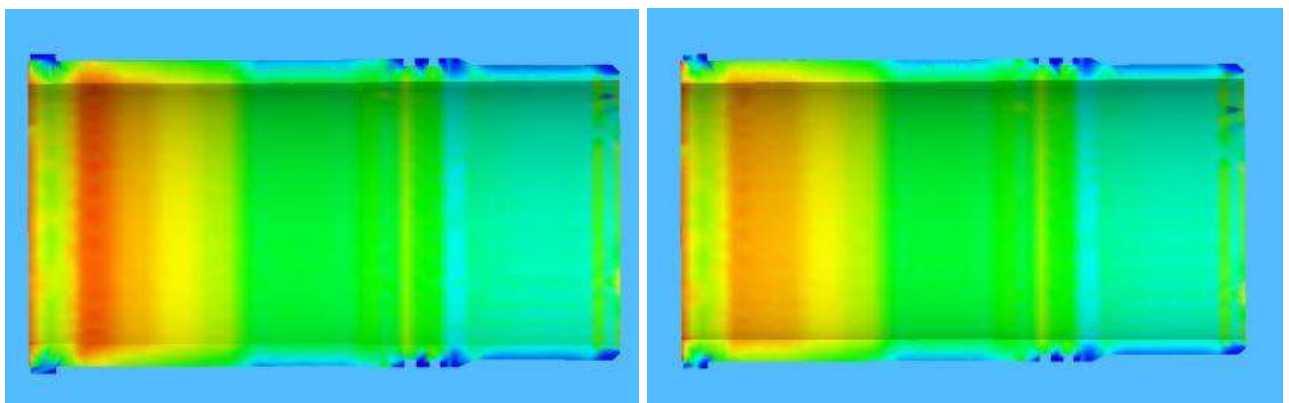
г)

а - базове масло, б – базове масло модифікації МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м);  
 с – Композитне масло ( $\text{стор}_B=4\%$ ); г – модифіковане комплексне масло  
 МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

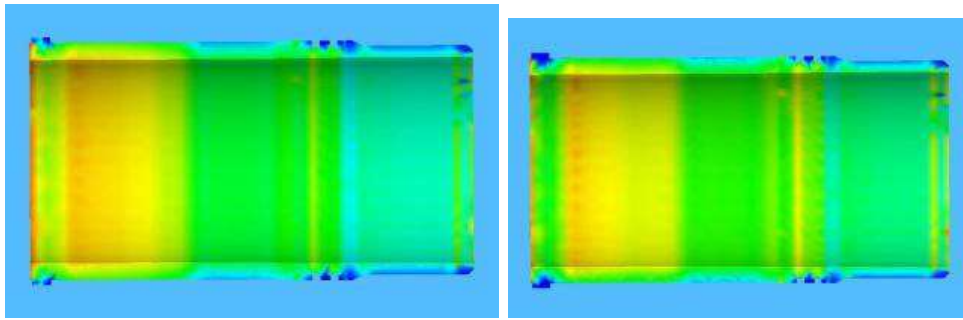
Рисунок 4.30 – Характерний розподіл поля напружень у поперечному перерізі сполученого зразка «гільза циліндра та поршневе кільце».

У цьому випадку варто відзначити, що розподіл напружень (рисунок 4.30. а) розвинув крайовий ефект у міру модифікації масла. (рис. 4.30. б), поступово зникають модифікація комплексних масел добавками (рис. 4.30. в) і обробка МП (рис. 4.30. г). Зазвичай це відображає характер локального процесу зношування, розподіл температурного поля та рівень моменту тертя. Результати дослідження методом моделювання свідчать про нерівномірний характер зношування цього з'єднувача та нерівномірне поле напружень на робочій поверхні гільзи циліндра.

Характерне поле напружень у поздовжньому перерізі робочої поверхні гільзи циліндра показано на рисунку. 4.31.



а) б)



CD)

а – базове масло, б – базове масло модифікації МР ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м);  
 с – Композитне масло ( $\text{стор}_B=4\%$ ); г – модифіковане комплексне масло  
 МП ( $H=2.5 \cdot 10^4$  А/м)

Рисунок 4.31 – Характерний розподіл поля напружень на робочій поверхні гільзи циліндра в поздовжньому перерізі

З отриманої фотографії напруженого стану видно, що найбільш напруженою зоною в гільзі циліндра є область верхньої мертвої точки, тобто область верхнього компресійного кільця. Про це також свідчать мікрометричні результати зносу гільз циліндрів. Розподіл напруги вздовж твірної втулки аналогічний розподілу величини зносу вздовж неї.

Як показують результати моделювання (рисунок 4.31), характером розподілу напружень на робочій поверхні гільзи циліндра можна керувати зміною дії, що впливає на показники та властивості масла. Найбільш ефективним є вплив на поверхню тертя шляхом поєднання обробки або застосування МП і фізико-хімічної модифікації оливи мідьвмісними добавками.

Таким чином, дослідження поля напружень у з'єднаннях зразків і деталях КПП підтверджує позитивний ефект обробки композиційним маслом і магнітним полем робочих поверхонь деталей з'єднань.

Тому, змінюючи параметри в поєднанні з фізико-хімічною модифікацією моторного масла, ми навмисно керуємо зчепленням зразка і деталі, значно знижуючи знос робочої поверхні та забезпечуючи рівномірність деталі з мінімальною лінійністю гладка поверхня. Модель носіння.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

## Висновок

1. Аналіз характеру зміни триботехнічних властивостей основних зв'язків компонентів двигуна показує, що поверхневу зносостійкість можна підвищити шляхом зміни властивостей моторної оливи шляхом модифікації поєднанням мідьвмісних присадок і магнітних полів. .

2. На основі механічних і теплових явищ у трибосистемі «поршень-кільце-гільза» процес утворення масляної плівки, зміни режимів тертя і втрати механічної потужності на тертя, зміни електричної і магнітної проникності масла, характеристики зношування частин було теоретично продемонстровано.

3. Досліди показують, що значний вплив магнітного поля на фізико-хімічні показники і властивості моторного масла досягається при досягненні напруги  $(20...28) \cdot 10^3$  А/м і додаванні добавки гліцерату міді правда. Додавати в концентрації 3.5-4.5%.

4. Зі збільшенням концентрації добавки відбувається модифікація композитного масла магнітним полем і мінімум зносу переміщується в нижню область, а зі зменшенням концентрації навпаки переміщується в область більшої напруженості магнітного поля. .

5. Комбінація фізичних і хімічних модифікацій масла в компресорі Forte FL-24 має тенденцію до зниження зносу поршневих кілець в 1.5-2.1 рази і знос поршнів в 1.4 рази. Поршневі пальці – по 5 шт.

6. В одноциліндровому агрегаті з дослідним поршнем підтверджено, що електричний опір масляного шару в муфті «гільза циліндра і поршневе кільце» в момент зупинки поршня в «мертвій точці» мінімальний. Максимальна швидкість виникає в момент досягнення максимальної швидкості.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

## Список літератури

1. Сажко, В. А. Електрообладнання автомобілів і тракторів : підручник/ В.А.Сажко;рец.:В.В.Рудзінський, С.К.Полянський,А.З.Філіпов.–К. : Каравела,2008.–400с.:іл.
2. Лудченко, О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. Організація і управління : підручник / О. А. Лудченко.–К. : Знання-Прес, 2004.–478с.:іл.
3. Бабіч, Б. С., Лущик В. В. Технічне обслуговування й ремонт металевих кузовів автомобілів: підручник/Б.С. Бабіч,В.В.Лущик.–К. :Либід,2001.–460с.:іл.  
Технологічне проектування автотранспортних підприємств : навч. посібник / С. І. Андрусенко, В. О. Білецький, П. І. Бортницький та ін. ; рец.: О. М. Коробочка, В. В. Рудзінський,В.В.Березняцький.–К. : Каравела, 2009.–368с.–(Українська книга)
4. Автомобілі.Тягово-швидкіснівластивості та паливна економічність : навч. посібник/В.П.Сахно,Г.Б.Безбородова, М.М.Маяк, С.М.Шарай.–К. : КВІЦ, 2004.–174с:іл.
5. Automobiles : навч. посібник з англійської мови/Н. І.Марченко,Н.О. Курносова, О. В. Забашта та ін.Житомир:ЖДТУ,2005.–256с.
6. Довідник водія. Добірка законодавчих актів для власників транспортних засобів/упорядкув. Є. К. Пашутинського.–К. : КНТ, 2005.–408с.
7. Мелничук,С.В. Гідравлічні системи автомобіля : навч. посібник.–Житомир : ЖДТУ,2004.–294с.:іл.
8. Дерех, З. Д., Душник В. Ф. Підручник водія. Основи керування автомобілем / З. Д. Дерех, В. Ф. Душник. –К. : Арій, 2008. –144 с. : іл.
9. Технічна експлуатація та надійність автомобілів : навч. посібник / Є.Ю. Форналчик, М. С. Оліскевич, О. Л. Мاستикаш,Р.А.Пело.–Лвів:Афіша, 2004.–492с.
10. Полянський, С. К., Коваленко, В. М. Експлуатаційні матеріали: підручник/С.К. Полянський,В.М.Коваленко.–К.:Либід, 2003.–448с.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

11. Окоча, А. І., Білокон, Я.Ю. Паливномастилні та інші експлуатаційні матеріали : підручник/А. І.Окоча,Я. Ю. Білокон.–К. : Центр. дух. култ., 2004.–448с.

12. Кисликов,В.Ф.,Лущик,В.В.Будова й експлуатація автомобілів : підручник.–5-тевид.–К. :Либідь, 2005.–400с.:іл.

					МРМТВА 24.23602.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92