

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

*Дослідження трибологічних характеристик біорозкладних
гідролічних олів*

Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2-го курсу
група МТВАм 24-1
Шифр


Підпис

Максим ПЕТРОВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н, доцент
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

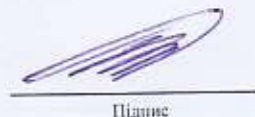
Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис

Олег МАКОВКІН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва


Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 5 . 12 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

факультет інженерії, транспорту та архітектури
кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
світньо-кваліфікаційний рівень магістр
напряму підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»
світньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

13 жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Петрову Максиму Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

Тема роботи «Дослідження трибологічних характеристик біорозкладних гідравлічних олив».

Рівень роботи Бабак Олег Петрович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

Строк подання студентом роботи на кафедру 1 грудня 2025 року

Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, ефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Стан питання та завдання дослідження;

2 Методичний підхід до дослідження протизносних властивостей біорозкладних гідравлічних олив;

3 Результати проведеного дослідження

Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на флайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітки
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2025</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10. 2025</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>1.12. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	<i>5.12. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12. 2025</i>	

Студент

Керівник роботи



Максим Петров

ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Олег Бабак

ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Бака
Петров
характери
Бака
матеріалів
відпрацю
напрямом
Цей про
середови
У п
використо
матеріалів
У
біорозклад
експериме
У тр
описано ре
кульковій
побудован
Випу
галиць та
Клю
ЗНОСОСТ

Реферат

Бакалаврську випускную роботу виконав студент 2 курсу, група МТВАм-24-1 Петров Максим Олександрович на тему: «Дослідження трибологічних характеристик біорозкладних гідравлічних олив».

Бакалаврська робота присвячена порівнянню різних типів мастильних матеріалів, які використовуються для змащення вузлів тертя. Переробка відпрацьованих масел з подальшим їх використанням у вузлах тертя стає важливим напрямом в умовах екологічних, економічних та ресурсних викликів сучасності. Цей процес пропонує безліч переваг, як промисловості, так навколишнього середовища.

У першому розділі проведено огляд основних мастильних матеріалів, які використовуються в вузлах тертя машин. Проведено також огляд мастильних матеріалів первинного та вторинного використання.

У другому розділі було проведено огляд протизносних властивостей біорозкладних гідравлічних олив. А також було описано методику проведення експерименту.

У третьому розділі було описано проведення експерименту. Також було описано результати, які ми отримали внаслідок проведення експерименту на чотири кульковій машині тертя. За результатами проведення експерименту було побудовано порівняльні таблиці та внесені данні в них.

Випускна робота складається з 70 сторінок, містить у собі 12 ілюстрацій, 18 таблиць та 25 джерел.

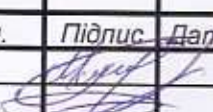



Ключеві слова: ОЛИВА, ПРИСАДКА, ГІДРАВЛІЧНЕ МАСТИЛО, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ПЛЯМА, ЕКСПЕРИМЕНТ.

Петров

абак

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. Стан питання та завдання дослідження.....	8
1.1. Класифікація мастильних матеріалі	8
1.2. Статистичні показники споживання мастильних матеріалів та класифікація олив відповідно до міжнародних стандартів.....	11
1.3 Методи покращення мастильних характеристик змащувальних матеріалів.....	12
1.4 Проблеми та недоліки використання мастильних матеріалів з нафтопродуктів та можливі альтернатив.....	14
1.5 Огляд наукових досліджень спрямованих на розробку біорозкладних мастильних матеріалів нового покоління.....	16
1.6 Досвід використання рослинних олив як функціональних присадок.....	19
1.7 Різновиди гідравлічних мастил.....	20
1.8 Цілі та завдання досліджень.....	22
2. Методичний підхід до дослідження протизносних властивостей біорозкладних гідравлічних олив.....	25
2.1 Опис обладнання та послідовність проведення випробувань на чотиришаровій машині тертя.....	25
2.2 Послідовність роботи та опис цифрового мікроскопа.....	34

КРМ ТВАМ 25.24325.000 ПЗ				
Імн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
Розроб.		Петров		
Перевір.		Бабак		
Реценз.				
Контр.		Маковкін		
Затверд.		Личаст		
Дослідження трибо логічних характеристик біорозкладних гідравлічних олив			Літ.	Арк.
			4	71
ХНУ група МТВАм 24-1				

3.Результати проведенного дослідження.....	37
3.1 Оцінка відтворюваності отриманих результатів.....	37
3.2. Дослідження протизносних властивостей нафтових гідравлічних олив та чистих рослинних мастил.....	39
3.3 Перевірка працездатності біорозкладних присадок для рослинної оливи.....	45
3.4 Визначення оптимального процентного вмісту присадок у рослинному маслі.....	57
3.5 Результати проведенного дослідження.....	63
Висновки.....	65
Список використаних джерел.....	68
Додатки.....	70

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докum	Пілпис	Дата		5

Вступ

У більшості сучасних технічних систем і машин існують механізми, призначені для передавання енергії від джерела до виконавчих елементів. У різних конструкціях для цього можуть застосовуватися троси, передавальні механізми, муфти та інші ланки. Проте у великій кількості промислових, транспортних і спеціальних установок ключову роль у передаванні потужності відіграє саме гідропривід, робота якого забезпечується гідравлічною рідиною.

Гідросистеми сьогодні є невід'ємною частиною техніки — від автотранспорту й авіації до важких навантажувачів, пресів, дорожньо-будівельної техніки та підйомних кранів. Такий широкий спектр застосувань зумовлює значну різноманітність умов, у яких гідроприводи повинні стабільно функціонувати. Це, своєю чергою, висуває підвищені вимоги до властивостей гідравлічних рідин, які забезпечують ефективну та безперебійну роботу системи.

Гідравлічна рідина має відповідати одночасно кільком ключовим характеристикам: бути практично нестисливою, не утворювати повітряних домішок і пінних структур, мати низьку температуру застигання, зберігати стабільність при високих робочих температурах, а також забезпечувати надійне змащування рухомих вузлів. Саме останній критерій спричинив поширення гідравлічних масел, які традиційно виготовляються з продуктів переробки нафти.

Попри свою ефективність, нафтові гідравлічні масла мають низку суттєвих недоліків. Найважливішим з них є негативний вплив на довкілля та потенційна шкода для людини. Зважаючи на глобальне загострення екологічних проблем і посилення природоохоронних норм, уряди країн та

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		6

міжнародні організації дедалі частіше запроваджують обмеження щодо використання традиційних мастильних матеріалів у промисловості.

У зв'язку з цим зростає необхідність пошуку екологічно безпечних альтернатив, здатних замінити традиційні нафтові гідравлічні масла без втрати експлуатаційних характеристик. Особливо важливим є забезпечення високих протизношувальних властивостей, адже саме вони визначають довговічність та надійність гідравлічних систем.

Саме тому виникає потреба у детальному вивченні можливостей використання біорозкладних гідравлічних масел, які потенційно можуть поєднувати екологічну безпечність та високі функціональні показники. На основі цих міркувань і сформульовано головну тему даної роботи — дослідження протизношувальних властивостей біорозкладних гідравлічних масел та їх перспектив у промисловому застосуванні.

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докum	Пілпис	Дата		7

1. Стан питання та завдання дослідження

1.1. Класифікація мастильних матеріалів

У сучасних машинах та механізмах майже завжди наявні вузли тертя, де контактуючі поверхні здійснюють відносний рух. Для зниження сил тертя, запобігання приварюванню та зменшення інтенсивності зношування у таких вузлах застосовуються різноманітні мастильні матеріали. Класифікація мастил може здійснюватися за кількома ознаками, серед яких найбільш поширеними є агрегатний стан, призначення та походження.

Мастильні матеріали поділяються на такі групи:

Тверді мастила. Найпростішим і найвідомішим представником є графіт, що складається більш ніж на 99% з вуглецю. Завдяки своїй шаруватій кристалічній структурі графіт легко розщеплюється між пластинами, які ковзають одна відносно одної при навантаженні. У результаті на поверхні тертя утворюється тонка плівка, що значно знижує коефіцієнт тертя. Часто тверді мастила застосовують спільно з полімерними зв'язувальними речовинами, які забезпечують надійну фіксацію мастильного шару на поверхні деталі.

Такі мастила ефективні у вузлах, що працюють при високих навантаженнях, низьких швидкостях обертання та в умовах, коли використання рідких або пластичних мастил неможливе.

Рідкі мастила.

Це найбільш поширена група мастильних матеріалів, які відзначаються високою проникністю і здатністю утворювати надтонку мастильну плівку навіть у вузьких зазорах. Як правило, рідкі мастила виробляють на основі нафтових олив, синтетичних компонентів або їх композицій. Окрім зниження тертя, рідкі мастила виконують низку важливих функцій:

- відведення тепла від робочих поверхонь;
- виведення продуктів зношення до системи фільтрації;

					<i>KPM МТВА 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		8

- антикорозійний захист металів;
- забезпечення герметизації у ряді гідравлічних систем.

Консистентні (пластичні) мастила.

Ця група займає проміжне положення між рідкими та твердими мастилами. Вони здатні поводитися як тверде тіло при низьких навантаженнях, але переходять у більш пластичний стан під дією певної механічної сили.

У типовому складі консистентного мастила 70–90% становить базова олива, яка забезпечує мастильний ефект, а 8–20% — згущувач, що визначає консистенцію.

Пластичні мастила широко застосовують у морській техніці, де постійний контакт із водою робить використання рідких мастил неефективним.

Газоподібні мастила.

До цієї групи належать: повітря, азот, вуглекислий газ, кисень, а також дрібнодисперсні аерозолі рідких мастил. Газоподібні речовини виконують здебільшого охолоджувально-мастильну функцію та запобігають зварюванню поверхонь тертя при надвисоких температурах. Їх застосування обмежене, але вони незамінні у високошвидкісних вузлах з мінімальними зазорами, де рідкі мастила не можуть циркулювати.

Мастильні матеріали спеціалізуються під конкретні групи технічних задач. До основних категорій належать:

Моторні оливи — використовуються в двигунах внутрішнього згорання та забезпечують змащування, охолодження, очищення та захист від корозії.

Трансмісійні мастила — призначені для редукторів і коробок передач.

Компресорні мастила — застосовуються у поршневих і ротаційних компресорах.

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		9

Мастила багатоцільового призначення — універсальні склади для широкого спектра промислових механізмів.

За походженням мастила поділяють на:

Мастила природного походження — виготовляються з рослинних або тваринних жирів. До кінця XIX століття саме вони були основними мастильними матеріалами, наприклад, оливкова олія чи тваринний жир використовувалися для змащування механізмів.

Синтетичні (штучні) мастила — отримують шляхом хімічного синтезу. Першу синтетичну оливу було розроблено у 1873 році американським лікарем Джоном Еллісом. Масове виробництво синтетичних мастил почалося у 1974 році, коли компанія Mobil представила перше синтетичне масло для широкого кола споживачів.

Мінеральні мастила — отримуються під час переробки нафти. Сьогодні вони становлять більшість технічних олив і широко застосовуються завдяки доступності та технологічності виробництва.

Біорозкладні мастила (додаткова сучасна група) — виготовляються на основі модифікованих рослинних олій. Вони набувають популярності через екологічну безпечність та здатність частково замінювати нафтові оливи у промисловості.

У сучасних умовах посилення екологічних стандартів і необхідності зменшення впливу мастильних матеріалів на навколишнє середовище особливу увагу приділяють біорозкладним мастилам. Вони здатні забезпечувати ефективне змащування, знижувати зношування та одночасно розкладатися під дією природних процесів без накопичення токсичних речовин. Розвиток технологій модифікації рослинних олій дозволив значно покращити їхні стабільність, окислювальну стійкість та антифрикційні характеристики.

Саме дослідженням протизношувальних властивостей таких сучасних екологічних мастильних матеріалів присвячено подальші розділи роботи.

					<u>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</u>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		10

1.2 Статистичні показники споживання мастильних матеріалів та класифікація олив відповідно до міжнародних стандартів.

З кожним роком попит на мастильні матеріали як в Україні, так і в країнах Європейського Союзу демонструє стале зростання. Це пов'язано з розвитком автомобільної промисловості, зростанням обсягів вантажних і пасажирських перевезень, розширенням машинобудівного сектору та збільшенням кількості промислового обладнання, яке потребує регулярного технічного обслуговування.

У Європі виробництво мастильних матеріалів охоплює широкий спектр підприємств — від великих транснаціональних корпорацій до локальних виробників, що спеціалізуються на вузьких сегментах ринку. Серед ключових гравців є такі компанії, як Shell, TotalEnergies, BP/Castrol, Fuchs, а також численні європейські заводи, які забезпечують потреби промисловості та транспорту. В Україні функціонує декілька підприємств, що виготовляють моторні, трансмісійні, гідравлічні та індустріальні оливи, зокрема у співпраці з міжнародними брендами.

Важливо зазначити, що офіційна статистика не завжди повністю відображає реальний обсяг споживання мастильних матеріалів, оскільки певна частка ринку припадає на тіньовий сегмент або імпорт маловідомої продукції. У європейському контексті такі випадки суворо контролюються завдяки якісній сертифікації та екологічним вимогам, тоді як український ринок все ще перебуває на етапі активної стандартизації та боротьби з неякісною продукцією.

Оскільки мастильні матеріали застосовуються у величезній кількості механізмів — від легкових автомобілів до промислових редукторів, компресорів і гідросистем — необхідність їх чіткого класифікування є критично важливою.

Різні умови експлуатації (температурні коливання, навантаження, швидкість рухомих частин, конструкційні особливості двигунів і агрегатів)

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		11

вимагають використання олив з конкретними параметрами. Тому були розроблені міжнародні стандарти, які дозволяють надавати кожному мастильному матеріалу характеристичний індекс.

Виробники транспорту та обладнання вказують у технічній документації рекомендовані оливи — їх маркування, клас в'язкості та рівень експлуатаційних властивостей. Це спрощує вибір мастильного матеріалу для споживача та гарантує правильну роботу техніки.

1.3 Методи покращення мастильних характеристик змащувальних матеріалів.

Хоча основна класифікація мастильних матеріалів базується лише на двох ключових параметрах — в'язкості та експлуатаційних характеристиках, до будь-якого сучасного масла висувається набагато ширший комплекс вимог. Серед них — здатність підтримувати чистоту деталей завдяки диспергувальним властивостям, що дозволяють утримувати забруднення у зваженому стані та запобігати утворенню шламів. Не менш важливою є термоокиснювальна стабільність, тобто стійкість оливи до руйнування при тривалому впливі високих температур. Від мастильних матеріалів очікують виражених протизношувальних характеристик: олива має формувати міцну мастильну плівку, здатну працювати в умовах як низьких, так і підвищених температур, а також при різних швидкостях зсуву.

До обов'язкових вимог належить низька корозійна активність і здатність захищати металеві поверхні від хімічного впливу продуктів згоряння та навколишнього середовища. Важливу роль відіграє і стійкість до старіння, адже в процесі експлуатації мастило поступово змінює свої властивості під дією тепла, кисню та механічних навантажень. Олива повинна бути сумісною з матеріалами ущільнень, які застосовуються в техніці, не руйнувати їх і не спричиняти втрату еластичності. Виробники

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		12

також зважають на стабільність продукту під час транспортування, низький рівень випаровуваності та мінімальну схильність до утворення піни, що може порушувати роботу системи змащування.

На практиці базові оливи далеко не завжди мають весь комплекс необхідних властивостей. Тому основою для більшості готових мастильних матеріалів є базове масло, у яке вводять спеціальні компоненти — присадки. Їхнє призначення може бути як вузьким, тобто спрямованим на коригування одного конкретного параметра, так і комплексним, коли один тип присадки впливає на кілька характеристик одночасно. У виробництві застосовуються антиокиснювальні, протипінні, антикорозійні, мийні, антифрикційні, в'язкісні та депресорні присадки, що знижують температуру застигання оливи.

Антиокиснювальні компоненти уповільнюють або повністю гальмують процеси окиснення: вони можуть взаємодіяти з пероксидами, що утворюються під час термічного розкладання, або ж руйнувати активні радикали. Фактично такі присадки працюють або на попередження причин окиснення, або на нейтралізацію його наслідків. Найпоширенішими є сполуки першого типу, зокрема просторово-утруднені феноли та ароматичні аміни. У багатьох рецептурах вони одночасно виконують функції антикорозійних та протизношувальних компонентів, що підвищує ефективність готового продукту.

Протипінні присадки додаються для зменшення схильності мастильного матеріалу до утворення стійкої піни, яка порушує циркуляцію оливи. Їхнє застосування особливо актуальне в тих випадках, коли у складі використовуються активні мийні компоненти, що можуть провокувати появу бульбашок під час роботи двигуна або промислового обладнання. Депресорні присадки, у свою чергу, дозволяють значно знизити температуру застигання оливи. Це робить можливим використання мастильних матеріалів у регіонах

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		13

із дуже холодним кліматом або за умов, коли техніка працює в низькотемпературних середовищах.

Переважає більшість присадок вводиться у склад готових олив безпосередньо на заводах-виробниках. Формули розраховуються на основі лабораторних досліджень, випробувань та відповідності вимогам міжнародних стандартів. Однак на ринку присутні й присадки, які продаються кінцевим користувачам у вигляді окремих товарів. Існують компанії, що спеціалізуються виключно на їх виробництві. Незважаючи на те що ефективність таких добавок часто піддається критиці й нерідко ставиться під сумнів дослідницькими лабораторіями, попит на них продовжує зберігатися, що свідчить про зацікавленість споживачів у можливості додаткової корекції властивостей мастильних матеріалів.

1.4 Проблеми та недоліки використання мастильних матеріалів з нафтопродуктів та можливі альтернативи

Починаючи з кінця ХХ століття численні наукові дослідження підтвердили, що людська діяльність спричиняє масштабне забруднення довкілля і потенційно може призвести до екологічної катастрофи. Одним із ключових чинників такого негативного впливу стали відходи, що утворюються під час переробки нафти. До цієї категорії належать автотракторні оливи, різні види палива та інші похідні, які за своїм хімічним складом відносять до небезпечних речовин. Небезпечними вважають сполуки, що навіть у порівняно малих кількостях викликають негативні фізіологічні зміни в організмі людини. Причина цього прихована у складній природі сирової нафти: до 90% її об'єму становлять рідкі вуглеводні, смолисті компоненти, нафтеніві кислоти та інші органічні речовини.

Вплив вуглеводнів на живі організми є вкрай небезпечним. Вони здатні порушувати роботу нервової системи, спричиняти патології крові та

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		14

кровоносної системи, чинити токсичний вплив на органи травлення й уражати тканини головного мозку. Крім того, у нафті та її продуктах містяться канцерогенні компоненти, які підвищують ризик розвитку онкологічних захворювань, зокрема злоякісних пухлин, різновидів лейкемії та раку легень.

Негативні наслідки торкаються й екосистем. Нафтопродукти отруюють ґрунти, спричиняють загибель рослин та тварин, погіршують якість поверхневих і підземних вод. Значна частина глобального забруднення морських екосистем пов'язана саме з видобутком нафти на шельфі: приблизно 40% нафтових забруднень Світового океану виникають через аварії, витоки та технічні втрати під час морського видобутку. Саме тоді, коли масштаби проблеми стали очевидними, наприкінці ХХ століття було розпочато активні пошуки альтернативних екологічно безпечних мастильних матеріалів. У сучасній науці такі матеріали отримали назву біорозкладних або швидкорозкладних мастил.

Постало питання: які природні оливи є більш придатними — тваринного чи рослинного походження? Практичні дослідження показали, що рослинні оливи мають кращі експлуатаційні властивості й є економічно вигіднішими. Їх виробництво не потребує утримання тваринних господарств, що є дорожчим та складнішим у порівнянні з вирощуванням олійних культур. Проте одним із головних недоліків рослинних олив залишається обмежений температурний діапазон, у якому вони зберігають стабільні мастильні властивості.

Попри це, природні мастила активно застосовують у техніці, що безпосередньо контактує з довкіллям. Наприклад, на основі рапсової оливи виготовляють біорозкладні мастила для змащування ланцюгів бензопил, двигунів водних мотоциклів чи катерів, а також для мастила в сільськогосподарських машинах. У таких двигунах окремої системи змащування немає, тому мастильний матеріал подається у вигляді паливно-

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		15

мастильної суміші. Під час роботи двотактних двигунів олива згоряє разом із паливом, утворюючи продукти згоряння, серед яких вуглеводні та дрібнодисперсний дим. Кількість димових викидів у таких двигунах часто наближається до рівня димності дизельного двигуна. Додатково ситуацію ускладнюють менш ефективна продувка двотактних двигунів, інтенсивне утворення нагару та підвищена температура згоряння суміші, яка в деяких випадках перевищує температуру горіння бензину.

Біорозкладні рослинні мастила застосовують також у спортивних автомобілях, зокрема в автоперегонах. Для цього використовують двигуни з удосконаленою системою охолодження та сухим картером, а після завершення перегонів мотор повністю розбирають і очищають від залишків мастила та продуктів згоряння. Одним із відомих виробників таких спеціалізованих мастил є компанія Mobil.

Можливість використання природних олив пояснюється їх хімічним складом: наявність спиртів, складних ефірів і вільних жирних кислот забезпечує формування міцної захисної плівки на поверхнях тертя. За своїми властивостями така плівка інколи не поступається навіть високоякісним синтетичним мастилам, а в окремих випадках перевершує їх за екологічною безпечністю.

1.5 Огляд наукових досліджень спрямованих на розробку біорозкладних мастильних матеріалів нового покоління.

Одним із найбільш перспективних рослинних масел, які сьогодні застосовуються для виготовлення екологічно безпечних мастильних матеріалів, є рапсове масло [16]. Порівняння його властивостей із традиційними нафтовими мастилами показує, що рапсова олива не потребує введення в'язкісних присадок, тоді як у мінеральні мастила такі добавки обов'язково додаються. Крім того, вона добре сумісна з матеріалами

					<i><u>KPM МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		16

ущільнень, має достатню деемульгувальну здатність, а за показниками піноутворення, протизношувальних властивостей та антикорозійної стійкості у ряді випадків навіть перевищує нафтові аналоги [12].

Водночас рослинні масла у чистому вигляді не можуть повністю замінити синтетичні мастила. Це підтверджують дослідження, проведені у низці університетів, зокрема в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені П. Василенка. Під час випробувань порівнювали властивості різних рослинних масел (рапсового, соняшникового та касторового) з широко застосовуваними у тракторній техніці синтетичними мастилами (МС-20, Такт-2Т, Пуск-2Т). Окремі показники рослинних олив виявилися кращими за синтетичні, однак досягти повного домінування за всіма параметрами не вдалося. Саме тому для практичного використання біорозкладних масел необхідно вводити комплексні функціональні присадки, які впливають одночасно на кілька властивостей. Такий підхід є економічно вигідним та зручним для виробників і споживачів.

Сьогодні значна увага приділяється використанню багатофункціональної присадки Valena. За даними виробника, ця добавка стабілізує властивості масел протягом тривалого періоду експлуатації, зменшує коефіцієнт тертя та знижує температуру в контактних зонах тертя [17]. Ефективність таких тверджень була перевірена, зокрема, в Московському державному агроінженерному університеті імені В. Горячкіна. Дослідження, проведені з використанням рапсової оливи з різними концентраціями «Valena» (0,6–1,1%), показали, що найнижчий коефіцієнт тертя — 0,024 — досягався за концентрації 0,9%, при якій також фіксувалися мінімальні показники зношування зразків. Отримані результати перевищили характеристики поширеного мастильного матеріалу М-10-В2, який часто застосовують у тракторній техніці [11].

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		17

Попри значні переваги біорозкладних мастил, залишається проблема їх швидкого окиснення, тобто «старіння» та втрати мастильних властивостей. Для розв'язання цього питання вчені Російського державного університету нафти й газу ім. І. М. Губкіна спільно з Національним бюро стандартів (Гейсберг, Меріленд, США) запропонували використовувати дифеніламін як антиоксидант [18]. Речовина є екологічно безпечною та не погіршує біорозкладність оливи.

Ще однією проблемою рослинних масел є їх природна кислотність, яка може спричиняти корозію металів. Як показано у роботах Ю. С. Заславського, для усунення цього впливу ефективним є використання трикрезилфосфату — повністю біорозкладної присадки, яка не знижує екологічності мастильного матеріалу [19].

У країнах Європейського Союзу впровадження біорозкладних масел відбувається значно швидше через жорсткіші екологічні вимоги та політику EU Green Deal, що передбачає зменшення використання продуктів нафтохімічного походження. Підприємства, які виробляють альтернативні палива й технічні мастила на основі рапсу та його похідних, активно працюють у Німеччині, Австрії, Франції, Швеції та США [20]. На європейському ринку широко доступні антиокислювальні, загуснювальні та багатофункціональні присадки до рослинних мастил, сертифіковані за стандартами OECD 301, EU Ecolabel та DIN V 51524.

У Німеччині вже кількасот автозаправних станцій продають рапсовий метиловий ефір (RME), який використовується як компонент біодизелю та як сировина для виготовлення мастильних матеріалів. Біомастила активно впроваджуються у сільськогосподарській техніці, лісозаготівельних машинах, ланцюгових боронах, гідравлічних системах і навіть у муніципальному транспорті. За даними концерну Fuchs Petroclub AG, можливість заміни 6–10% нафтових мастил на біорозкладні аналоги вже підтверджена на практиці, і цей показник постійно зростає.

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		18

Для України, яка активно розвиває вирощування олійних культур та курс на євроінтеграцію, така технологія є особливо актуальною. Розширення виробництва біомасел здатне зменшити залежність від імпорتنих нафтових продуктів, надати нові можливості аграрному сектору та покращити екологічну ситуацію відповідно до вимог ЄС.

1.6 Досвід використання рослинних олив як функціональних присадок

Окрім застосування рослинних масел з додатковими присадками, у практиці також зустрічається змішування рослинних олив з нафтовими. Причини для цього можуть бути різними. В одних випадках немає можливості повністю перейти на біорозкладне або синтетичне масло, проте є потреба підвищити екологічність мастильного матеріалу. В інших ситуаціях отримана суміш демонструє кращі властивості, ніж кожен із компонентів окремо — як нафтове, так і рослинне масло [2].

Історично перші експерименти зі змішуванням рослинних і нафтових олив були проведені ще в 1899 році англійським інженером Чарльзом Чірсом Вейкфілдом, який пізніше заснував компанію Castrol. Комбінація нафтових, рослинних та синтетичних компонентів дозволила отримати мастило з високою ефективністю для черв'ячних передач, що підвищувало їхній ККД на 2–6% [2]. Для використання у двигунах внутрішнього згоряння особливо рекомендують додавання соєвої оливи, яка покращує антифрикційні властивості мастила.

Серед власників дизельних автомобілів інколи обговорюють використання касторової оливи для очищення двигуна або зменшення його забруднення. Зазвичай йдеться про часткове додавання рослинного масла до основного мастила або повну заміну палива на рапсову оливу. Проте в цій сфері проведено обмежену кількість досліджень, тому науково підтвердити ефективність таких практик складно [22]. Водночас компанія Scania вже

					<u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		19

представила гібридний вантажний автомобіль, що працює на суміші біопалива з рапсовою оливою та електроприводі, демонструючи практичну можливість застосування таких технологій у промислових умовах [3, 4].

Не всі експерти вважають використання рослинних олив доцільним навіть з екологічних міркувань. Дослідження, проведені спеціалістами заводу ARIAN, показали, що рапсова олива у складі моторних мастил при високих температурах піддається термічному розкладанню та деградації, що є характерним для більшості рослинних олив [5]. Тому оптимальніше застосовувати їх для систем з меншими навантаженнями, наприклад, для змащення автоматичних трансмісій, де температура і тиск у вузлах тертя значно нижчі. Крім того, критики, зокрема Л. М. Останін, звертають увагу на можливе збільшення утворення продуктів коксування при змішуванні рослинних і синтетичних мастил [5], що потребує додаткового контролю та врахування в рецептурах.

У європейських країнах подібні технології активно досліджуються та впроваджуються в умовах суворих екологічних стандартів. Так, у Німеччині, Швеції та Австрії застосування біомастил і змішаних олив у комерційних та аграрних транспортних засобах проводиться з урахуванням безпеки двигунів, стабільності оливи та екологічної відповідності.

1.7 Різновиди гідравлічних мастил.

Як уже зазначалося, рідкі мастильні матеріали виконують не лише функцію змащення, але й можуть використовуватися як робочі рідини у гідросистемах та інших технічних пристроях. Основне завдання робочої рідини — передача механічної енергії від джерела до робочого органу. Для цього до масел і рідин висуваються певні вимоги: вони повинні мати оптимальний в'язкісний індекс, тобто забезпечувати стабільну в'язкість у широкому температурному діапазоні; проявляти антиокиснювальні

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		20

властивості; захищати деталі гідросистем від корозії; легко проходити через фільтри; володіти хорошими протипінними властивостями; зменшувати зношування вузлів тертя; бути сумісними з матеріалами ущільнень та інших деталей системи.

Робочі рідини поділяються на чотири основні типи: мінеральні масла, водомасляні емульсії, спеціальні суміші та синтетичні рідини.

Мінеральні масла виготовляють шляхом глибокої переробки нафти з додаванням присадок, концентрація яких становить від 0,05 до 10%.

Водомасляні емульсії являють собою суміш води та мінерального масла у різних пропорціях, наприклад, 100:1 або 50:1. У таких сумішах масло виконує функцію захисту гідросистеми від корозії та змащування вузлів тертя. Емульсії часто застосовуються у пожежо- та вибухонебезпечних системах, у системах великого об'єму, а також у робочих середовищах з температурою нижче 60°C.

Суміші — це мінеральні масла, змішані з компонентами на кшталт керосину або гліцерину, що дозволяє підвищити їх ефективність у точних механізмах або при роботі за низьких температур.

Синтетичні рідини містять у своєму складі силікони, хлор- та фторвуглецеві сполуки, поліфенольні ефіри. Такі рідини є найдорожчими, але водночас набувають все більшого поширення завдяки своїй негорючості, хімічній стійкості та стабільним в'язкісно-температурним властивостям.

Ці рідини широко використовуються у водному, авіаційному транспорті, у амортизаційних та гідротормозних системах, а також у гідравлічних передачах і приводах. У автомобільному транспорті вони застосовуються у будівельній, дорожній, лісозаготівельній та іншій спеціальній техніці [7]. Використання таких масел забезпечує надійний запуск і безпечну експлуатацію обладнання за різних температурних умов [8].

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		21

Для гідросистем лісозаготівельної техніки оптимальним варіантом є гідравлічне всесезонне масло ВМГЗ-45, яке загущене поліметакрилатною присадкою та містить антиокиснювальні, антикорозійні і протизношувальні компоненти. Його температура замерзання становить -45°C . Рекомендована область застосування — гідросистеми з тиском понад 25 МПа і температурою масла понад 90°C . Це масло використовують у північних і гірських районах Європи та Скандинавії для легких погрузчиків, екскаваторів, самоскидів і кранів. Для помірного клімату його застосовують переважно як зимове, а для північних — як всесезонне.

У авіаційній промисловості широке застосування отримало масло АМГ-10, яке виготовляють на основі глибоко деароматизованих низькозастигаючих фракцій, отриманих з продуктів гідрокрекінгу парафінових нафтових сумішей. До складу входять нафтові та ізопарафінові вуглеводні, загущувальні та антиокиснювальні присадки. Рекомендоване для гідросистем з будь-яким типом насосів, що працюють при тиску до 25 МПа та температурі масла понад 80°C . Використовується в авіаційній техніці та наземній спеціальній техніці, здатній експлуатуватися за температур від -60°C до $+55^{\circ}\text{C}$.

Сучасні європейські розробки також включають біорозкладні та синтетичні гідравлічні рідини, що відповідають стандартам EU Ecolabel, ISO 6743-4 та вимогам OECD щодо безпеки для навколишнього середовища. Це особливо актуально для регіонів з суворими кліматичними умовами та для техніки, що працює у водних і лісових екосистемах, де зниження екологічного впливу є пріоритетним.

1.8 Цілі та завдання досліджень.

Виходячи з попередньо викладених даних, метою цього дослідження є порівняння протизношувальних властивостей сучасних нафтових

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ доквм	Пілпис	Дата		22

гідравлічних масел та біорозкладних масел. Крім того, у межах роботи передбачається вивчення впливу біорозкладних присадок на протизношувальні характеристики біорозкладних масел, що дозволить оцінити ефективність додаткових модифікацій у поліпшенні їх експлуатаційних властивостей.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні завдання дослідження:

Обґрунтувати актуальність дослідження, показати необхідність використання екологічно безпечних масел та їх потенціал у промислових гідросистемах, включаючи перспективи зменшення впливу на довкілля та підвищення надійності обладнання.

Розробити алгоритм проведення експериментів із використанням машини тертя для визначення протизношувальних властивостей як нафтових, так і біорозкладних мастильних матеріалів. Алгоритм повинен враховувати різні режими навантаження, швидкості тертя та температурні умови для отримання репрезентативних результатів.

Провести експериментальні дослідження та порівняти протизношувальні властивості біорозкладних масел із характеристиками нафтових масел, що застосовуються у промисловості на сьогодні, з акцентом на зносостійкість і стабільність мастильного шару в умовах підвищених навантажень.

Вивчити вплив біорозкладних присадок на протизношувальні властивості рослинних мастил, оцінити, наскільки додаткові компоненти підвищують ефективність змащування та збільшують тривалість експлуатації вузлів тертя.

Сформулювати висновки щодо перспектив застосування біорозкладних масел у промислових гідросистемах та автомобільній техніці, включаючи оцінку їх економічної доцільності, екологічної безпечності та потенціалу для заміни традиційних нафтових мастильних матеріалів.

					<i>KPM MТBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		23

Реалізація даних завдань дозволить не лише порівняти ефективність біорозкладних і нафтових масел, а й оцінити практичні можливості впровадження біорозкладних присадок у сучасні гідравлічні та механічні системи. Дослідження сприятиме формуванню науково обґрунтованих рекомендацій для промислових підприємств та транспорту, що прагнуть поєднати високу надійність обладнання з екологічною безпекою.

					<u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		24

2. Методичний підхід до дослідження протизносних властивостей біорозкладних гідравлічних олив

2.1 Опис обладнання та послідовність проведення випробувань на чотиришаровій машині тертя

Дослідження виконували на кафедрі ТАМ, оскільки саме там встановлена чотиришарова машина тертя ЧМТ-1, яка дає можливість проводити випробування мастильних матеріалів за їхніми протизносними характеристиками. Це обладнання забезпечує відтворювані умови навантаження та дозволяє порівнювати різні типи олив за однаковими параметрами.

У якості випробувальних тіл застосовувалися стандартні кульки зі сталі діаметром 12,70 мм, що відповідають вимогам до експериментів на чотиришаровій машині тертя та забезпечують однакові геометричні умови контакту.

Для оцінювання протизносних властивостей були відібрані різні типи олив, які суттєво відрізняються за походженням та фізико-хімічними параметрами. До дослідження включено: гідравлічну оливу ВМГЗ-45, гідравлічну оливу АМГ-10, соняшникову рафіновану оливу, соняшникову нерафіновану оливу.

Такий набір зразків дозволяє порівняти традиційні мінеральні оливи з біологічними, які є екологічно безпечнішими та потенційно придатними для застосування у гідравлічних системах. Олива ВМГЗ-45

ВМГЗ-45 — це всесезонна загущена гідравлічна олива, що характеризується можливістю роботи при низьких температурах, маючи температуру застигання $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Згідно з класифікацією за ГОСТ, вона позначається як МГ-15-В, а її виробництво регламентується ТУ 38.101479.

Розшифрування маркування:

- МГ — мінеральна гідравлічна олива; 15 — клас в'язкості;
- В — експлуатаційна група оливи.

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		25

Основні технічні характеристики ВМГЗ-45:

- кінематична в'язкість при 40 °С — 13,50–16,50 мм²/с; індекс в'язкості — 160;
- температура спалаху — не нижче 135 °С; температура застигання — не вище –60 °С;
- густина при 20 °С — до 865 кг/м³;
- механічні домішки — відсутні.

Олива АМГ-10

АМГ-10 — авіаційна гідравлічна олива низької в'язкості, яка застосовується в гідросистемах, що працюють у широкому діапазоні температур. Кінематична в'язкість при 50 °С становить 10,0 мм²/с. Олива відзначається високою стабільністю та здатністю забезпечувати тонку мастильну плівку при низьких навантаженнях.

Рослинні оливи

Соняшникова рафінована та нерафінована оливи були включені в дослідження як потенційні біорозкладні альтернативи. Їх використання значно знижує екологічне навантаження, а природна хімічна структура забезпечує добрі мастильні властивості. Порівняння рослинних та мінеральних олів дозволяє визначити, наскільки біологічні мастила можуть конкурувати з традиційними у гідравлічних системах.

Позначення оливи відповідно до вимог ГОСТ — МГ-15-Б, а її виробництво регламентується стандартом ГОСТ 6794-75 [32, 33].

Розшифрування маркування:

- МГ — мінеральна гідравлічна олива; 15 — клас в'язкості;
- Б — експлуатаційна група оливи.

Основні технічні характеристики оливи АМГ-10:

- кінематична в'язкість — 10,0 мм²/с;
- температура спалаху — не нижче 93 °С;
- температура застигання — не вище –70 °С;

					<i>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		26

- густина при 20 °С — не більше 850 кг/м³;
- механічні домішки — відсутні.

АМГ-10 належить до низьков'язкісних гідравлічних олив спеціального призначення, що застосовуються переважно в авіаційних системах керування та приводах, де потрібна стабільна

робота в широкому температурному діапазоні. Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям вона забезпечує формування тонкої мастильної плівки та підтримує надійне змащування вузлів у режимах низьких навантажень і низькотемпературної експлуатації.

Опис використаного обладнання

Експериментальні дослідження проводили на установці ЧМТ-1 — чотиришаровій машині тертя (рисунок 1). Це високоточне лабораторне обладнання, призначене для визначення протизносних та антизадирних властивостей мастильних матеріалів.

Установка забезпечує створення контрольованого контактного навантаження між трьома нерухомими кульками та однією обертовою, що дозволяє достовірно оцінити інтенсивність зношування під дією заданого навантаження, температури та швидкості обертання.

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		27



Рисунок 1 – Загальний вигляд чотиришарової машини тертя

Чотиришарова машина тертя застосовується для визначення низки трибологічних характеристик трансмісійних і гідравлічних оливо, а також пластичних мастил. Крім того, обладнання може бути використане для порівняльної оцінки моторних оливо. Хоча умови роботи установки не

відтворюють реальних експлуатаційних режимів вузлів тертя, її можливостей цілком достатньо для попереднього аналізу властивостей мастильних матеріалів і відбору перспективних зразків для подальших досліджень.

Відповідно до вимог ГОСТ 9490-75, за допомогою чотиришарової машини тертя визначають такі показники:

несучу здатність — за критичним навантаженням;

					<i>KPM MТBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		28

граничну навантажувальну здатність — за навантаженням зварювання;
протизносні властивості — за діаметром плями зносу;
протизадирні властивості — за індексом задирання.

Принцип дії установки полягає у створенні нормованих навантажень на зразки та подальшому вимірюванні величини зношування. Як випробувальні елементи використовують сталеві кульки діаметром $12,70 \pm 0,01$ мм відповідно до ГОСТ 3722, виготовлені зі сталі ШХ-15 згідно з ГОСТ 801. Для одного циклу випробувань застосовують чотири кульки, які утворюють пірамідальну схему контакту.

Три кульки нижнього ряду жорстко фіксуються в корпусі тримача та заливаються дослідною

оливою, що забезпечує мастильне середовище під час навантаження (рисунок 2). Четверта кулька піддається обертанню під заданим навантаженням, завдяки чому формується контактна пляма, за параметрами якої оцінюють зносостійкість

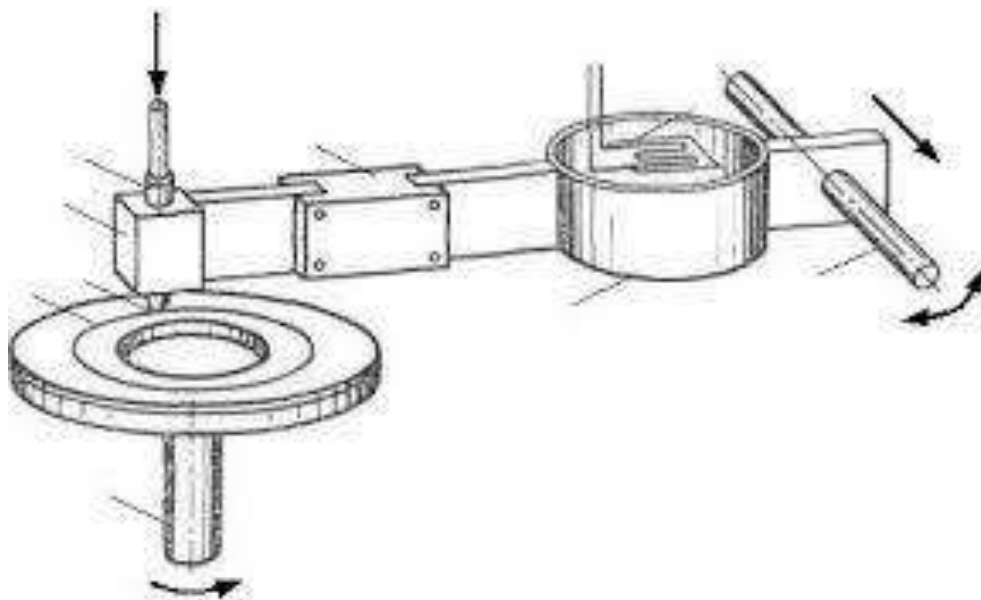


Рисунок 2 – Загальний вигляд корпусу

					<i>KPM МТВА 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		29

Четверта кулька, що утворює вершину піраміди, закріплюється у шпинделі машини. Під час випробування вона притискається до трьох нерухомих кульок під заданим навантаженням і приводиться в обертання електродвигуном, розташованим у верхній частині установки. Обертання відбувається з постійною кутовою швидкістю, що забезпечує стабільні умови контакту.

Тривалість випробування залежить від методики: вона може становити 10 секунд або 60 хвилин, що регламентується вибраним типом тесту та нормативною документацією. У разі, якщо під час роботи виникає момент тертя величиною (1180 ± 25) Н·см, система автоматично вимикає привід, запобігаючи пошкодженню вузла тертя та кульок.

У вузлі тертя (рисунок 3) передбачена можливість регулювання осьового навантаження в межах від 59 до 9800 Н. Значення зусилля встановлюється шляхом розміщення гиротримача з відповідним комплектом вантажів у визначену позицію на важелі. Правильне положення вантажів обирається згідно з розрахунковими таблицями, наведеними у ГОСТ 9490-75, що забезпечує

точність та повторюваність результатів.

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докum	Пілпис	Дата		30

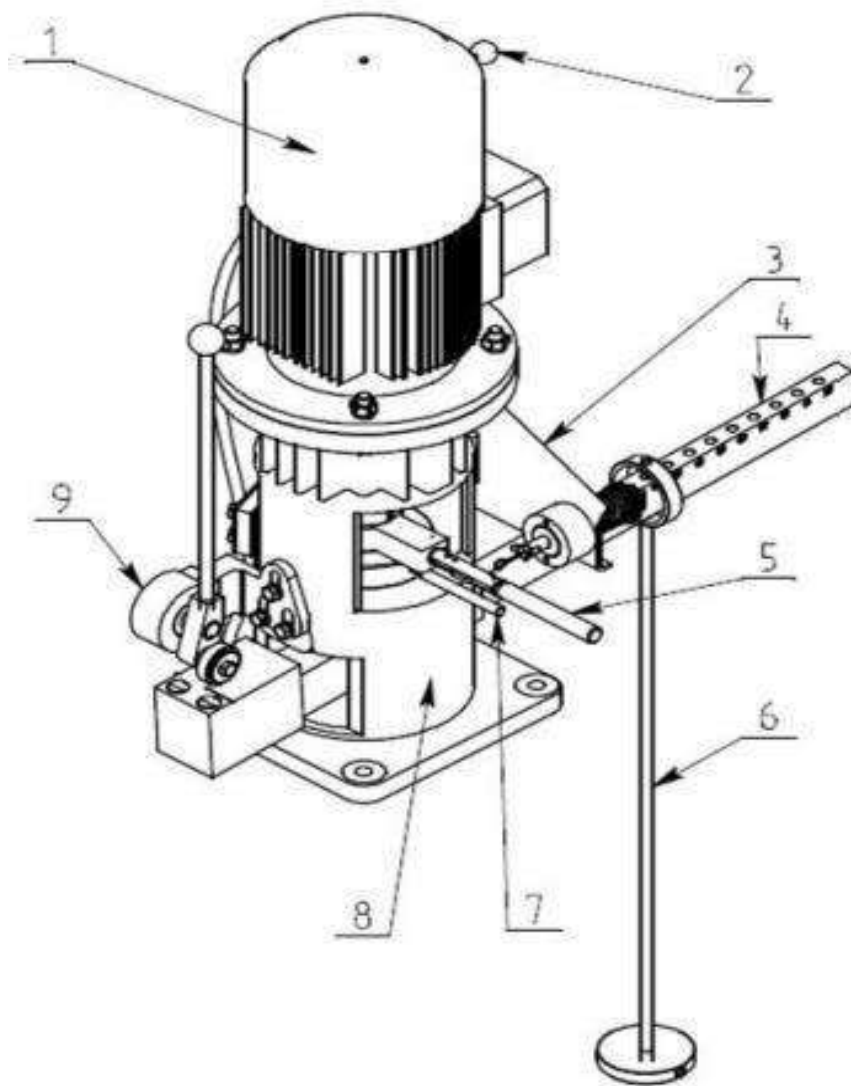


Рисунок 3 – Вузол тертя: 1 – електродвигун; 2 – ручний механізм розгальмовування; 3 – обмежувач крутного моменту; 4 – важіль для створення осьових навантажень; 5 – корпус кріплення кульок; 6 – тримач гир; 7 – підставка під корпус; 8 – корпус вузла тертя; 9 – опора для прикладання та зняття осьових навантажень.

Кожне випробування складається з серії вимірювань, при цьому для кожного нового визначення використовується свіжий зразок мастильного матеріалу та чотири нові кульки. Тривалість роботи машини при визначенні показника зношування становить 60 хвилин, причому осьове навантаження

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		31

залишається незмінним протягом всього циклу. Порядок проведення випробування:

Перед початком експерименту всі деталі машини ретельно промивають очищувальним розчином, що не залишає розводів або плям. Після очищення деталі повинні бути повністю сухими та чистими.

Кульки також підлягають очищенню та просушуванню для забезпечення правильного контакту і точності результатів.

Верхня кулька встановлюється в цангу, яка фіксується у кінцічному гнізді. Положення цанги контролюється квадратним кінцевиком, стрілка якого повинна бути спрямована вгору.

Чашка закріплюється на шплінтах на робочій поверхні машини. У корпус поміщається нижнє кільце.

У чашку укладаються три нижні кульки. Встановлюється верхнє кільце чашки. У чашку заливається випробуваний мастильний матеріал. Рівень матеріалу повинен збігатися з верхньою гранню верхнього кільця, забезпечуючи рівномірне мастильне середовище. На чашку встановлюється гайка, яка затягується спеціальним ключем. В корпус монтується знімна ручка для зручності переміщення.

Корпус разом з підставкою встановлюється у литий корпус машини.

У корпус чашки поміщається термopapa для контролю температурного режиму під час випробування. Захисний екран опускається в нижнє положення, що запобігає розбризкуванню матеріалу. Гиредержач встановлюється у необхідне положення на важелі, після чого на нього монтуються потрібні гирі для створення заданого осьового навантаження. За допомогою перемикача на панелі керування обирається режим роботи установки відповідно до типу випробування. Такий порядок дій забезпечує повторюваність вимірювань та точність визначення протизносних властивостей мастильних матеріалів, а також безпечну роботу установки протягом усього експерименту.

					<i>KPM MТВА 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докum	Пілпис	Лата		32

Важіль опори повертається в нижнє положення. Потім на панелі керування слід натиснути кнопку, а після цього натиснути «СТАРТ», щоб почати випробування.

Після завершення часу експерименту електродвигун автоматично відключається. Далі машину слід вимкнути, перевівши вимикач у положення «ВИКЛ».

Прикладене навантаження знімається шляхом повороту важеля опори у верхнє положення. Захисний екран піднімається в верхнє положення, забезпечуючи доступ до випробувальних елементів. Виймається термопара, що використовувалася для контролю температури під час експерименту. Корпус чашки разом із підставкою витягується з установки. Корпус чашки встановлюється на шплінти на робочій поверхні для подальшого розбирання.

Ексцентриковий валик обертається торцевим ключем на 180° (стрілка повинна бути спрямована вниз), після чого виймається цанга з верхньою кулькою. Верхню кульку видаляють через отвір у верхній частині цанги.

Ключем відкручується гайка, що фіксувала чашку. Гайка, верхнє та нижнє кільця, чашка, цанга та всі кульки очищуються від мастильного матеріалу, обезжирюються та ретельно висушуються перед наступним випробуванням.

Визначення показника зношування

Для оцінки протизносних властивостей нижні три кульки (основа піраміди) по черзі досліджуються під мікроскопом. Вимірюється діаметр плям зношування. Значення діаметра зносу визначається як середнє арифметичне двох послідовних вимірювань відповідних плям.

Результати вважаються достовірними з імовірністю 95%, якщо розбіжність між двома вимірюваннями не перевищує максимальнє значення для більшого результату, наведене на рисунку 4. Такий підхід дозволяє забезпечити повторюваність та точність вимірювань на попередніх етапах

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	Но докум	Пілпис	Дата		33

дослідження, а також надає можливість порівнювати ефективність різних мастильних матеріалів.

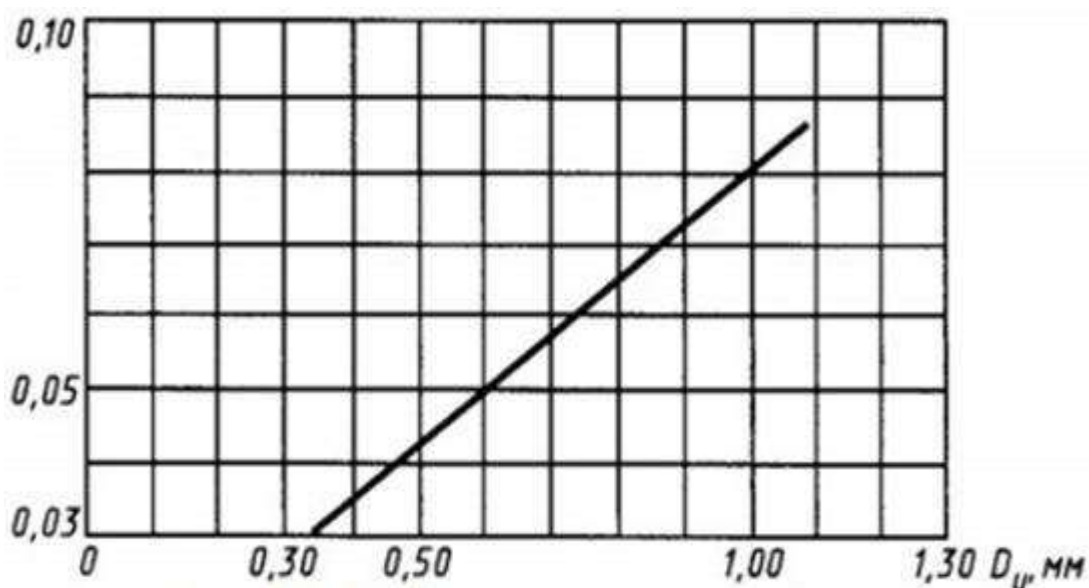


Рисунок 4 – Графічне зображення результатів експерименту

2.2 Послідовність роботи та опис цифрового мікроскопа

Цифровий мікроскоп використовується для детального вивчення поверхонь зразків та

вимірювання розмірів плям зношування після проведених випробувань. Перед початком роботи слід підготувати зразки, встановити їх на підставку мікроскопа та налаштувати освітлення й

масштаб камери. Це дозволяє отримати чітке зображення поверхні кульок і забезпечує точне визначення параметрів зношування.

Оскільки діаметр плям зношування зазвичай становить близько одного міліметра або менше, для їх точного вимірювання необхідне використання мікроскопа, який дозволяє визначати лінійні розміри об'єктів. У даному дослідженні застосовується електронний цифровий мікроскоп,

підключений до комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням для обробки та аналізу зображень (рисунок 5).

Програмне забезпечення мікроскопа дозволяє не лише отримати збільшене зображення поверхні кульок, а й виконувати точні вимірювання діаметра плям зношування, будувати профілі поверхні та зберігати дані для подальшого статистичного аналізу. Такий підхід забезпечує високу точність і повторюваність результатів, що особливо важливо при порівнянні різних типів мастильних

матеріалів та оцінці їх протизносних властивостей.



Рисунок 5 – Kromatech мікроскоп

					<u>KPM МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		35

Даний мікроскоп дозволяє отримувати зображення з збільшенням до 1000 разів, виводити його на екран монітора та виконувати вимірювання лінійних розмірів об'єктів. Цього цілком достатньо для аналізу зміни розмірів плям зношування залежно від типу використаного мастильного матеріалу або присадок.

Порядок роботи з цифровим мікроскопом:

- Перед початком роботи слід увімкнути комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням для мікроскопа.
- Запустити програму та вручну включити підсвітку предметного столика за допомогою перемикача на кабелі, підключеному до мікроскопа.
- На корпусі мікроскопа обрати необхідну кратність збільшення, повертаючи коронку, а у програмі на правій панелі виставити відповідну калибровку.
- Розмістити кульку на підставці предметного столика так, щоб пляма зношування була спрямована догори, та сфокусувати зображення, повертаючи шарнір опори.
- На верхній панелі програми зупинити зображення на паузу, натиснути кнопку з іконкою лінійки та провести через пляму зношування дві перпендикулярні лінії для визначення діаметра.
- Зберегти отримане зображення у папці програми для подальшого аналізу.

Після завершення вимірювань можна провести порівняльний аналіз плям зношування для різних мастильних матеріалів або присадок. Для цього визначають середнє значення діаметра плям, проводять статистичну обробку результатів і порівнюють ефективність кожного зразка. Такий підхід дозволяє оцінити протизносні властивості оливи та обрати оптимальний варіант для практичного застосування в гідравлічних системах і вузлах тертя.

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		36

3. Результати проведеного дослідження

3.1 Оцінка відтворюваності отриманих результатів

Для проведення дослідження та серії експериментів важливо впевнитися в їх відтворюваності. Методика перевірки відтворюваності експериментів добре відома та детально описана в науковій літературі [35].

Під відтворюваними експериментами розуміють такі досліди, у процесі яких у будь-який момент часу можна повернути об'єкт дослідження та вимірювальне обладнання у вихідний стан і повторити експеримент при тих самих умовах.

Для перевірки відтворюваності проводять кілька серій паралельних дослідів. Паралельні досліди — це експерименти, виконані кілька разів за однакових значень факторів. Результати таких дослідів фіксують у таблиці, де k — кількість паралельних повторень (зазвичай $k = 2 \dots 4$), а N — число серій паралельних дослідів.

Для кожної серії паралельних експериментів обчислюють середнє арифметичне значення функції відгуку, що дозволяє оцінити стабільність та точність вимірювань:

$$y_j^{\text{ср}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, j = 1 \dots N$$

Далі для кожної серії паралельних дослідів визначають значення дисперсії.

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - y_j^{\text{ср}})^2$$

Так як результати опытов являются величинами случайными, то значения функции цели в параллельных опытах в общем случае будут

					<u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u>	Анк
Змн	Анк	№ доквм	Пілпис	Дата		37

различными.

Далее нужно определить расчетное значение числа Кохрана G_p (критерий проверки воспроизводимости эксперимента), для этого находят максимальную из оценок дисперсии $\max S_j^2$ и относят к сумме S_j^2 :

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}$$

Значення критерію Кохрена наведені у спеціальних статистичних таблицях. Вони відповідають довірчій ймовірності $P=0,95$, $P=0,95$, при якій приймається гіпотеза про відтворюваність експериментів.

Параметр $p=1-P_p = 1 - P_p=1-P$ визначає рівень значущості, який відображає ймовірність помилкового відхилення гіпотези про відтворюваність.

Для розрахунку критичного значення G_{T,G_T} необхідно знати загальну кількість оцінок дисперсій NN та число ступенів свободи fff , пов'язане з кожною оцінкою, де $f=k-1$, $f=k-1$, а kkk — кількість паралельних дослідів у серії. Якщо виконується умова:

- $G_p \leq G_T, G_p \leq G_T, G_p \leq G_T$,
- то результати експериментів вважаються відтворюваними, а ряд оцінок дисперсій — однорідним.

У випадку, коли експерименти виявляються невідтворюваними, відтворюваність можна підвищити шляхом:

- виявлення та усунення джерел нестабільності у процесі проведення дослідів;
- застосування більш точних методів вимірювань та сучасного лабораторного обладнання.

Якщо ж забезпечити відтворюваність експерименту неможливо, математичні методи планування та обробки результатів до такого

експерименту застосовувати не слід, оскільки отримані дані можуть бути ненадійними і вводити в оману при аналізі.

3.2 Дослідження протизносних властивостей нафтових гідравлічних олиив та чистих рослинних мастил

Обчислюємо середнє арифметичне значення функції відгуку та оцінку дисперсії для кожної серії паралельних дослідів для оливи ВМГЗ-45 (див. таблицю 3.1).

Таблиця 3.1

№ досліджен ь	Досліди			y_j^3	S_j^2
1	2			3	4
1	0,921	0,917	0,920	0,919	$1,38 \cdot 10^{-6}$
2	0,962	0,915	0,916	0,931	0,0005
3	0,946	0,959	0,934	0,946	$6 \cdot 10^{-8}$
4	0,898	0,914	0,915	0,909	$3,1 \cdot 10^{-5}$
5	0,951	0,897	0,899	0,915	0,0006
6	0,899	0,959	0,924	0,907	$3 \cdot 10^{-5}$

В результаті обраховуємо

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}$$

У результаті розрахунку отримано значення критерію Кохрена $GP=0,521$ $G_P=0,521$ $GP=0,521$.

У даному випадку було проведено три серії експериментів, а загальна кількість серій становила шість ($N=6$ $N = 6$ $N=6$, $f=3-1$ $f = 3 - 1$ $f=3-1$).

Відповідно до даних, наведених у Додатку 1 [35], приймаємо критичне значення $G_T=0,616G_T = 0,616GT=0,616$.

Оскільки виконується умова $GP \leq GTG_P \leq G_TGP \leq GT$, результати експериментів можна вважати відтворюваними, а ряд оцінок дисперсій — однорідним.

Аналогічні перевірки проводяться для олив АМГ-10 (таблиця 3.2), рафінованої соняшникової олії (таблиця 3.3) та нерафінованої соняшникової олії (таблиця 3.4). Це дозволяє оцінити стабільність результатів та порівняти протизносні властивості різних мастильних матеріалів.

Таблиця 3.2

№ досліджень	досліди			y_j^3	S_j^2
1	1,15	1,09	1,10	1,11	0,009
2	1,02	1,08	1,08	1,06	0,007
3	1,18	1,13	1,13	1,15	0,007
4	1,14	1,08	1,09	0,10	0,006
5	1,02	1,08	1,08	1,06	0,08
6	1,17	1,16	1,14	1,16	0,01

Таблиця 3.2

№ досліджень	Досліди			y_j^3	S_j^2
1	0,71	0,65	0,68	0,68	0,004
2	0,70	0,66	0,68	0,68	0,002
3	0,69	0,61	0,68	0,68	$8 \cdot 10^{-5}$
4	0,70	0,64	0,69	0,69	0,002
5	0,70	0,67	0,67	0,64	0,003
6	0,69	0,69	0,68	0,69	$2 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 3.3

№ досліджень	Досліди			y_j^3	S_j^2
1	1,15	1,09	1,10	1,16	0,009
2	1,02	1,08	1,08	1,07	0,007
3	1,18	1,13	1,13	1,11	0,007
4	1,14	1,08	1,09	0,15	0,006
5	1,02	1,08	1,08	1,07	0,08
6	1,17	1,16	1,14	1,12	0,001

Таблиця 3.4

№ досліджень	Досліди			y_j^3	S_j^2
1	0,69	0,63	0,67	0,69	0,003
2	0,63	0,65	0,62	0,69	$2 \cdot 10^{-5}$
3	0,60	0,65	0,66	0,61	$5 \cdot 10^{-7}$
4	0,67	0,66	0,64	0,68	0,004
5	0,44	0,68	0,65	0,66	10^{-6}
6	0,63	0,66	0,64	0,61	10^{-6}

У результаті розрахунку отримано значення критерію Кохрена $GP=0,567$, $G_P = 0,567$, $GP=0,567$. Відповідно до даних, наведених у Додатку 1 [35], приймаємо критичне значення $GT=0,616$, $G_T = 0,616$, $GT=0,616$. Оскільки виконується умова $GP \leq GT$, $G_P \leq G_T$, $GP \leq GT$, результати експерименту можна вважати відтворюваними.

Отже, експерименти вважаються відтворюваними, а ряд оцінок дисперсій — однорідним.

У результаті дослідів, проведених за однакових умов, було визначено середній діаметр плями зношування для кожного зразка мастильного матеріалу (таблиця 3.5, рисунки 5–8).

Таблиця 3.5 результати експериментів з чистими мастилами

Мастило	ВМГЗ-45	АМГ-10	рафінована	нерафінована
Діаметр плями, (мм)	0,92	1,1	0,68	0,65

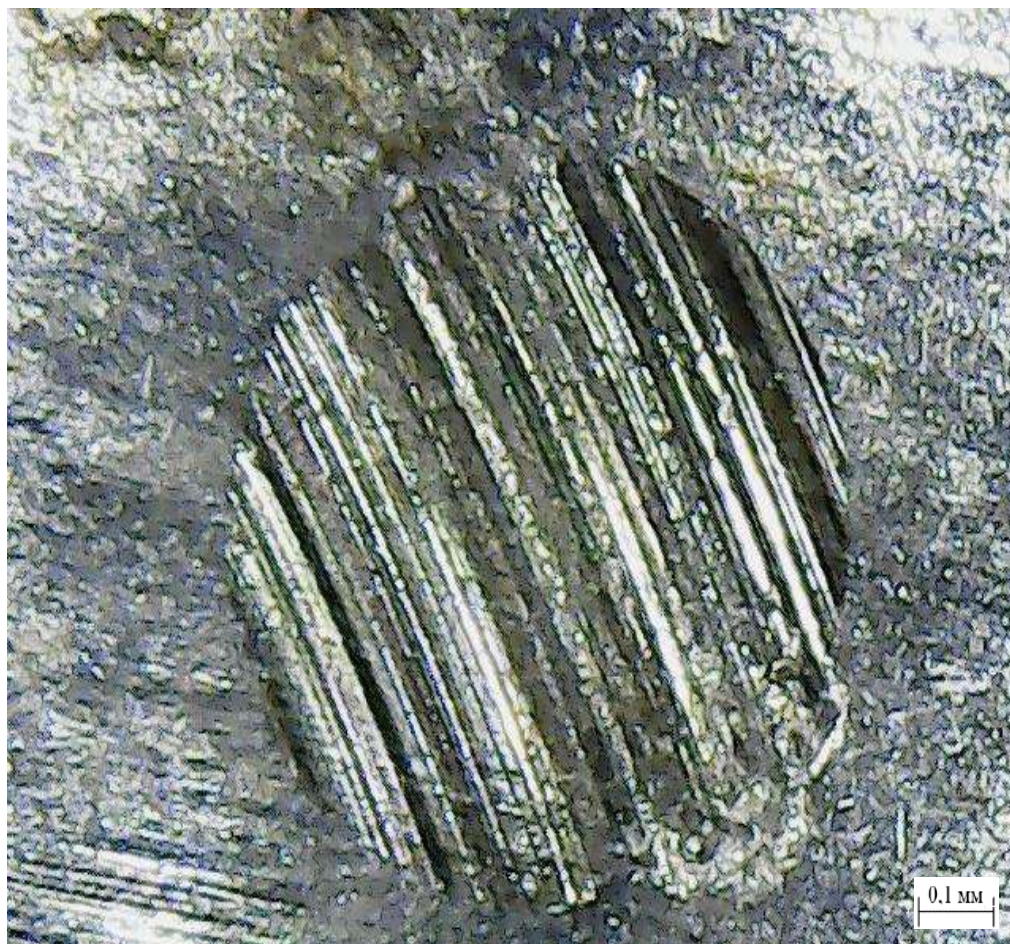


Рисунок 5 – пляма зносу при використанні мастила ВМГЗ-45

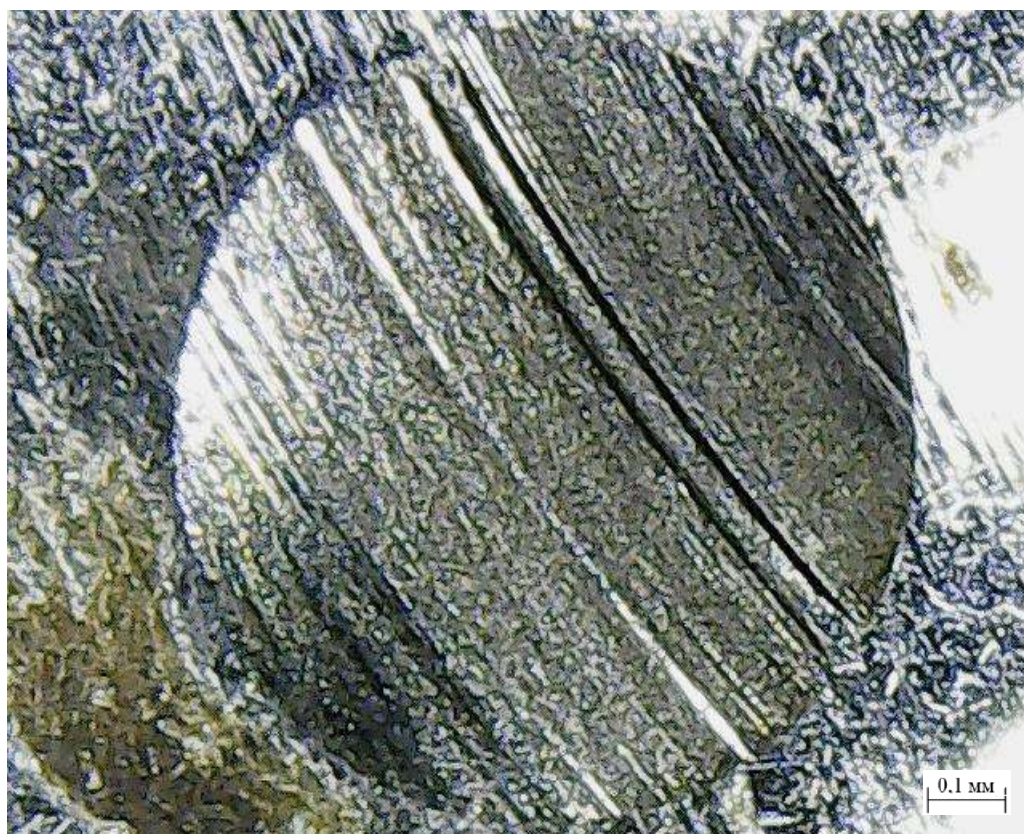


Рисунок 6 – пляма зносу при використанні мастила АМГ-10

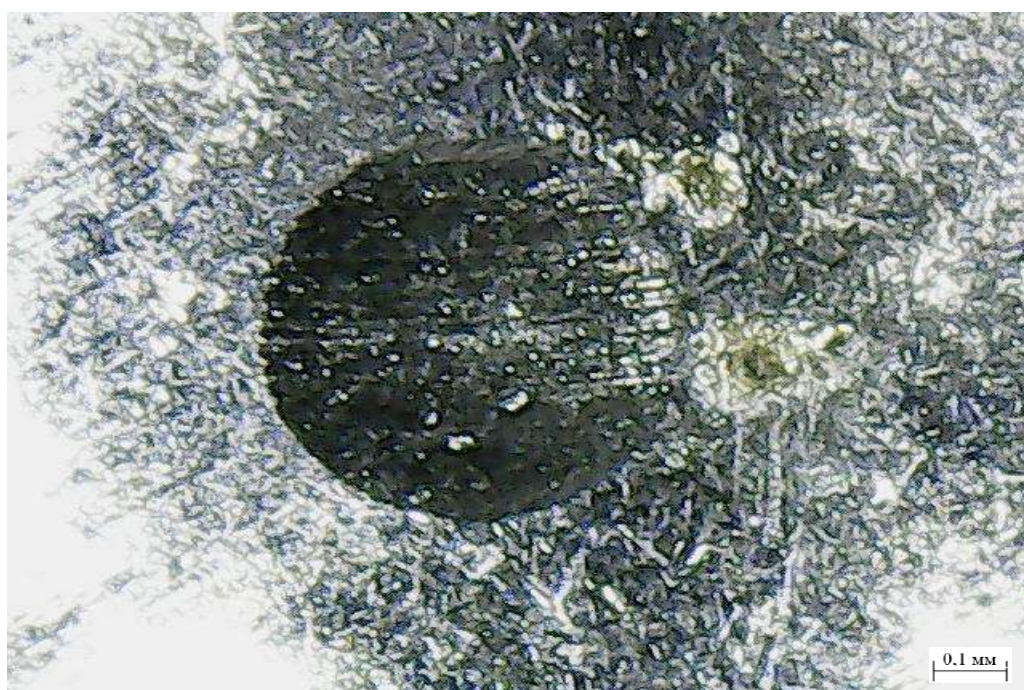


Рисунок 7 – пляма зносу при використанні нерафінованої соняшникової оливи

Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата

КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ

Анк

43



Рисунок 8 – пляма зносу при використанні рафінованої соняшникової оливи

Як показали результати проведених випробувань, сталеві кульки, що працювали у середовищі рослинних мастил, продемонстрували помітно менший рівень зношування порівняно з кульками, зануреними у традиційні нафтові індустріальні мастила. Різниця у величині зносів перевищила 25 %, що є досить суттєвим показником. Такий результат свідчить про те, що звичайні рослинні олії, зокрема соняшникова, можуть конкурувати з нафтовими мастильними матеріалами за параметром протизносної ефективності навіть без спеціальної обробки.

Водночас необхідно враховувати, що промислові нафтові мастила, які нині використовуються в техніці та механічних вузлах, містять комплекс функціональних присадок. Ці добавки вводять до складу мастил для

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		44

покращення їхніх експлуатаційних характеристик: підвищення термостабільності, зменшення окиснюваності, покращення протизносних та протизадирних властивостей, а також стабілізації в'язкісно-температурних параметрів. Завдяки цьому нафтові мастила демонструють високу надійність під час роботи в складних умовах та при підвищених навантаженнях.

Через наявність таких присадок пряме порівняння нафтових і рослинних мастил не є повністю коректним, оскільки рослинні оливи зазвичай випробовуються у «чистому» вигляді, без додаткових модифікаторів. Щоб поставити обидві групи мастильних матеріалів у рівні умови, виникає потреба у введенні до складу рослинних мастил спеціальних присадок, здатних ефективно працювати саме в їхній природній основі. Такі добавки повинні покращувати протизносні властивості, мінімізувати ризик окиснювання при підвищених температурах та забезпечувати стабільність під час тривалої експлуатації.

Отже, отримані результати досліджень підтверджують потенціал рослинних олив як екологічно безпечної та ефективної альтернативи нафтовим мастильним матеріалам. Водночас вони демонструють необхідність подальших робіт зі створення адаптованих присадок, які дозволять повністю розкрити можливості рослинних мастил у високонавантажених механізмах та зробити їх справді конкурентоспроможною заміною мастилам на нафтовій основі.

3.3 Перевірка працездатності біорозкладних присадок для рослинної оливи

Одним із ключових чинників під час добору присадок для біорозкладних мастильних матеріалів є не лише їхня ефективність у складі базової оливи, а й екологічна безпечність. Особливо важливо, щоб самі присадки були здатні до біологічного розкладання та не створювали

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		45

токсичного навантаження на довкілля. Саме тому для модифікації рослинних олив у даному дослідженні застосовуються спеціальні біорозкладні присадки, розроблені у державному університеті на кафедрі «ГАМ». До комплексу відібраних речовин входять:

- Присадка №1 – EDTA: складний ефір етилендіамінтетраоцтової кислоти (EDTA) зі спиртами C16–C18;
- Присадка №2 – ААЕ: складний ефір аконітової кислоти зі спиртами C16–C18;
- Присадка №3 – маслорозчинні похідні бензотриазолу;
- Присадка №4 – суміш складних ефірів малеїнової та фталевої кислот у співвідношенні 1:1.

Характеристика та екологічні особливості присадок

Етилендіамінтетраоцтова кислота (EDTA) є представником амінополікарбонівих кислот і широко відомою хелатуючою сполукою. Її здатність утворювати стабільні комплекси з катіонами металів робить EDTA ефективним реагентом у промисловості — від водопідготовки до очищення обладнання атомних реакторів та відбілювальних процесів у целюлозно-паперовому виробництві. EDTA характеризується низькою токсичністю для теплокровних організмів і під дією ультрафіолетового випромінювання поступово розкладається. Водночас хімічна стійкість її комплексів із йонами металів може спричинити потрапляння до водойм речовин, не властивих природним екосистемам, що потребує контролю за її кількістю у біорозкладних формуляціях.

Аконітова кислота — ненасичена трикарбонова органічна кислота, яка зустрічається у різних рослинних джерелах, зокрема у цукровій тростині, буряку, ялівці та деяких видах ягід. Найпростішим промисловим методом її отримання є термічне зневоднення лимонної кислоти при температурі 170–175 °С. Завдяки природному походженню та високій реакційній здатності аконітова кислота є перспективною сировиною для створення екологічно

					<i>KPM MТBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		46

безпечних поверхнево-активних речовин та мастильних присадок, сумісних із рослинними oliвами.

Малеїнова кислота являє собою органічну дикарбонову сполуку, яка в промислових масштабах синтезується шляхом гідролізу малеїнового ангідриду. Її також можна отримати з яблучної кислоти за допомогою реакції з ацетилхлоридом. Малеїнова кислота широко застосовується у виробництві фумарової кислоти, що використовується як харчова добавка E297, а також у синтезі полімерів, смол та поверхнево-активних речовин. У складі мастильних композицій вона може виступати як компонент модифікованих ефірів, що підвищують протизносні та антифрикційні властивості рослинних оливи.

Фталева кислота є найпростішою двоосновною ароматичною карбоною кислотою. У промислових процесах вона утворюється як побічний продукт при отриманні фталевого ангідриду, який широко застосовується під час синтезу полімерних матеріалів, пластифікаторів та інших органічних сполук. У природних умовах фталева кислота зустрічається значно рідше — її можна знайти у зелених частинах рослин та в насінних коробочках деяких видів маку. Використання фталевої кислоти в мастильних матеріалах пов'язане із створенням складних ефірів, що можуть покращувати змащувальні властивості та підвищувати термічну стабільність рослинної оливи.

Хоча відомостей про процес біологічного розкладання трьох останніх присадок наразі небагато, наявні літературні дані та їхній хімічний склад дають підстави припускати, що ці сполуки мають повну або майже повну біорозкладність. Це пояснюється тим, що вони синтезуються на основі речовин, природно присутніх у рослинній сировині, а отже, здатні розкладатися мікроорганізмами в природних умовах без утворення стійких токсичних залишків. Такий висновок також підтримується інформацією про

					<i>KPM MТBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		47

джерела їх отримання та структурні особливості, що характерні для органічних сполук природного походження.

У ролі базової основи для виготовлення дослідних мастильних матеріалів було обрано рафіновану рослинну оливу. Попередні експериментальні випробування засвідчили, що нерафінована олія демонструє дещо кращі протизносні властивості, однак різниця між результатами двох типів олив виявилася такою малою, що не виходила за межі експериментальної похибки. Водночас у нерафінованій олії міститься значна кількість природних домішок і біологічно активних речовин, поведінка яких у поєднанні з досліджуваними присадками не є достатньо вивченою. Це може призвести як до небажаних хімічних реакцій, так і до утворення нестабільних композицій, тому для забезпечення чистоти експерименту було прийнято рішення використовувати саме очищену рафіновану основу.

На початковому етапі дослідження відсутня впевненість у тому, чи будуть присадки взагалі проявляти протизносні або стабілізуючі властивості у складі рослинної оливи, оскільки більшість традиційних присадок розробляється саме для нафтових мастил. Крім того, невідомо, яким буде характер їх взаємодії з тригліцеридами та іншими компонентами рослинної основи. З огляду на те, що рекомендована концентрація протизносних присадок для мастильних матеріалів коливається у межах від 0,1 до 3 %, для дослідів було обрано усереднене значення — 2 %, що дає змогу оцінити ефект без ризику надмірної модифікації оливи.

Після введення присадок у рослинну оливу були проведені серії триботехнічних випробувань, що дозволили оцінити зміни в характеристиках змащування та протизносних властивостей. Результати досліджень, а також проведені контролі для перевірки повторюваності та достовірності отриманих даних детально наведені у таблицях 3.6–3.10 та на графічних матеріалах, представлених на рисунках 9–12. На їх основі можна робити

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		48

висновки щодо ефективності кожної присадки, її впливу на працездатність рослинної оливи та можливості подальшого використання в екологічно безпечних мастильних матеріалах.

Таблиця 3.6-присадка номер 1 (2%)

№ досліджу	Паралельні дослідження			y_j^3	S_j^2
1	0,49	0,51	0,56	0,52	0,004
2	0,59	0,49	0,54	0,52	$8 \cdot 10^{-6}$
3	0,55	0,45	0,53	0,50	$8,89 \cdot 10^{-5}$
4	0,52	0,47	0,57	0,51	0,0013
5	0,53	0,53	0,54	0,53	$5,34 \cdot 10^{-5}$
6	0,47	0,46	0,54	0,50	$2 \cdot 10^{-5}$

У процесі проведення статистичної обробки експериментальних даних було визначено значення критерію Кохрана, який застосовується для оцінювання однорідності варіацій (дисперсій) у серії паралельних дослідів. У результаті розрахунків отримане експериментальне значення показника — $G_p = 0,574$.

Щоб встановити, чи відповідає цей результат вимогам однорідності дисперсій, необхідно порівняти його з табличним значенням критерію Кохрана, наведеним у додатку 1 джерела [35]. Для відповідного числа степенів свободи та кількості повторних дослідів було вибрано граничне значення $G_T = 0,616$.

Порівнюючи отримані дані, переконуємося, що нерівність $G_p \leq G_T$ виконується, тобто експериментальне значення критерію є меншим за табличне. Це свідчить про те, що розбіжності між паралельними

вимірюваннями не перевищують допустимий рівень, а варіації в отриманих результатах можуть вважатися статистично обґрунтованими.

Таким чином, проведені досліді визнаються відтворюваними, що означає їх достатню повторюваність при незмінних умовах, а отриманий набір дисперсій можна охарактеризувати як однорідний. Це дозволяє подальше використання експериментальних даних для побудови математичних моделей, аналізу та інтерпретації результатів без необхідності виключення окремих вимірювань або повторного проведення експериментів.

Таблиця 3.7-присадка номер 2(2%)

№ досліду	Паралельні дослідження			y_j^3	S_j^2
1	0,34	0,40	0,45	0,4	0,02
2	0,32	0,41	0,44	0,3	0,02
3	0,32	0,38	0,46	0,3	0,02
4	0,34	0,41	0,46	0,40	0,02
5	0,32	0,40	0,43	0,38	0,02
6	0,31	0,38	0,46	0,38	0,02

У ході статистичної обробки результатів експерименту було обчислено значення критерію Кохрана, який застосовується для перевірки однорідності дисперсій у серії паралельних дослідів. Здійснивши необхідні розрахунки, отримано експериментальне значення $G_p = 0,198$, що характеризує співвідношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій у досліджуваному наборі даних.

Для визначення, чи є коливання результатів припустимими, це значення порівнюють із граничним табличним параметром G_T , який залежить від кількості повторів і числа факторів. Відповідно до додатку 1

джерела [35], для даних умов експерименту граничне значення становить $G_T = 0,616$.

Порівняння отриманого та табличного значень показує, що нерівність $G_p \leq G_T$ виконується, оскільки 0,198 значно менше 0,616. Це свідчить про те, що варіації між паралельними вимірюваннями не перевищують допустимих меж, а розкидання результатів є статистично виправданим і не містить ознак систематичних похибок.

Таким чином, на підставі критерію Кохрана можна зробити висновок, що серія проведених дослідів є відтворюваною, тобто повторення вимірювань дає достатньо узгоджені значення. Крім того, ряд отриманих дисперсій можна вважати однорідним, що підтверджує правильність організації експерименту та дозволяє надалі використовувати ці дані для побудови моделей, аналізу тенденцій і формування наукових висновків.

Таблиця 3.8 – присадка 3 (2%)

№ досліду	Паралельні дослідження			y_j^3	S_j^2
1	0,77	0,75	0,81	0,73	$9,39 \cdot 10^{-6}$
2	0,84	0,80	0,84	0,81	0,00338
3	0,72	0,76	0,95	0,84	0,0381
4	0,76	0,72	0,84	0,76	$2,2 \cdot 10^{-5}$
5	0,84	0,80	0,88	0,84	0,00249
6	0,72	0,75	0,99	0,85	0,03

У процесі статистичної оцінки отриманих експериментальних даних було визначено значення критерію Кохрана, який використовується для перевірки однорідності дисперсій та надійності паралельних дослідів. У результаті проведених розрахунків отримано експериментальне значення G_p

= 0,512, що відображає частку максимальної дисперсії відносно загальної суми дисперсій у виконаній серії вимірювань.

Щоб оцінити, чи є така варіативність результатів допустимою, це значення порівнюють з табличним граничним показником GT, наведеним у додатку 1 джерела [35]. Для даних умов експерименту відповідне табличне значення становить $GT = 0,616$, тобто саме це число є верхньою межею, вище якої результати вважалися б статистично неоднорідними.

Оскільки нерівність $G_p \leq GT$ виконується (0,512 менше за 0,616), можна стверджувати, що коливання між паралельними дослідженнями не перевищують допустимого рівня, а різниця між дисперсіями не є статистично значущою. Це свідчить про відсутність істотних систематичних похибок і підтверджує стабільність умов, у яких проводився експеримент.

Таким чином, за критерієм Кохрана серія дослідів визнається відтворюваною, тобто результати повторних вимірювань є узгодженими між собою. Крім того, сукупність отриманих дисперсій можна вважати однорідною, що дозволяє використовувати ці дані для подальших статистичних узагальнень, аналізу та побудови математичних моделей без потреби у корекції або повторному проведенні дослідження.

Таблиця 3.9- присадка 4(2%)

№ досліду	Паралельні дослідження			y_j^3	S_j^2
1	0,69	0,64	0,66	0,67	0,00214
2	0,66	0,67	0,64	0,65	$2,45 \cdot 10^{-5}$
3	0,73	0,66	0,62	0,67	0,0182
4	0,68	0,64	0,64	0,65	0,0028
5	0,66	0,68	0,61	0,65	$2,94 \cdot 10^{-5}$
6	0,72	0,66	0,63	0,67	0,015

У ході статистичної обробки отриманих експериментальних даних було визначено значення критерію Кохрана, який застосовується для оцінки однорідності дисперсій та контролю відтворюваності серії паралельних дослідів. У результаті проведених розрахунків було отримано експериментальне значення $G_p = 0,476$. Це значення характеризує співвідношення найбільшої дисперсії до суми всіх дисперсій у межах даної вибірки та дозволяє оцінити, наскільки рівномірними є результати виконаних випробувань.

Далі необхідно порівняти отримане значення з граничним табличним показником G_T , який визначається за кількістю паралельних дослідів та ступенями свободи. Згідно з додатком 1 джерела [35], для даних умов експерименту табличне граничне значення становить $G_T = 0,616$.

Оскільки нерівність $G_p \leq G_T$ дотримується ($0,476$ менше ніж $0,616$), можна зробити висновок, що коливання між паралельними результатами знаходяться в межах допустимого рівня. Це означає, що розкидання значень не є надмірним і не свідчить про наявність значних випадкових чи систематичних похибок, які могли б спотворити аналіз.

Таким чином, на основі критерію Кохрана серію виконаних дослідів можна визнати відтворюваною, а сукупність отриманих дисперсій — однорідною. Це підтверджує, що експеримент проводився за стабільних умов, а отримані дані є достатньо надійними для подальшого статистичного опрацювання, моделювання та інтерпретації.

Таблиця 3.10 – результати з домішками 2%

Присадка	Присадка №1	Присадка №2	Присадка №3	Присадка №4
Діаметр плями, (мм)	0,517	0,396	0,803	0,665

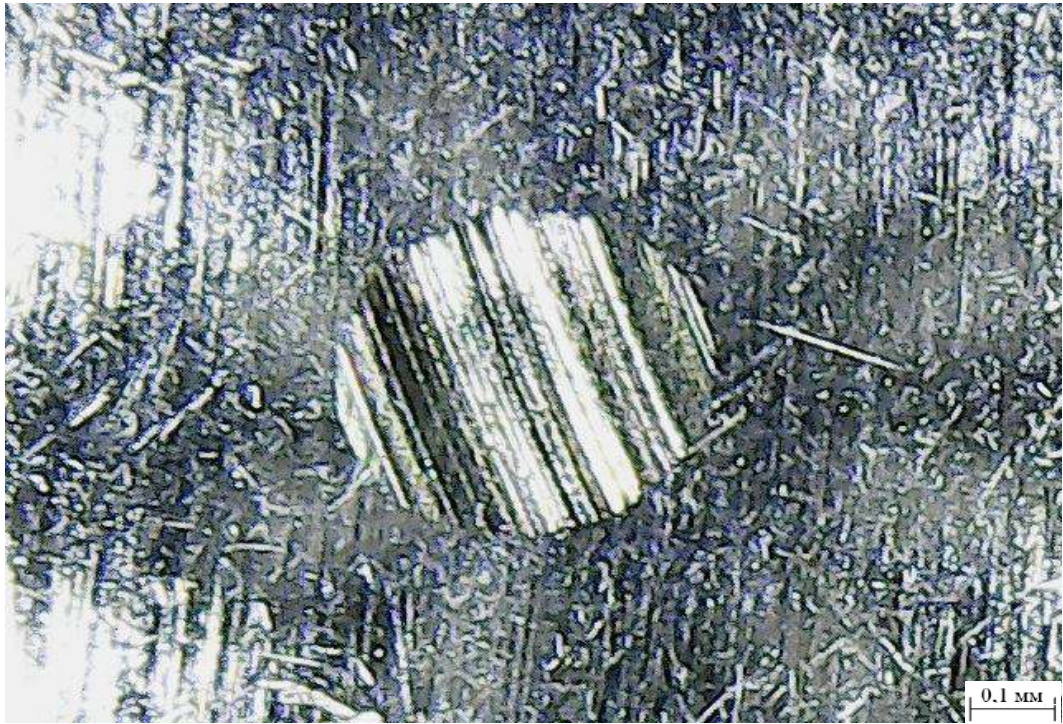


Рисунок 9 – пляма зносу при добавлянні присадки номер 1



Рисунок 10 – пляма зносу при добавлянні присадки номер 2

Змн	Анк	Но докум	Пілпис	Дата

КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ

Анк

54

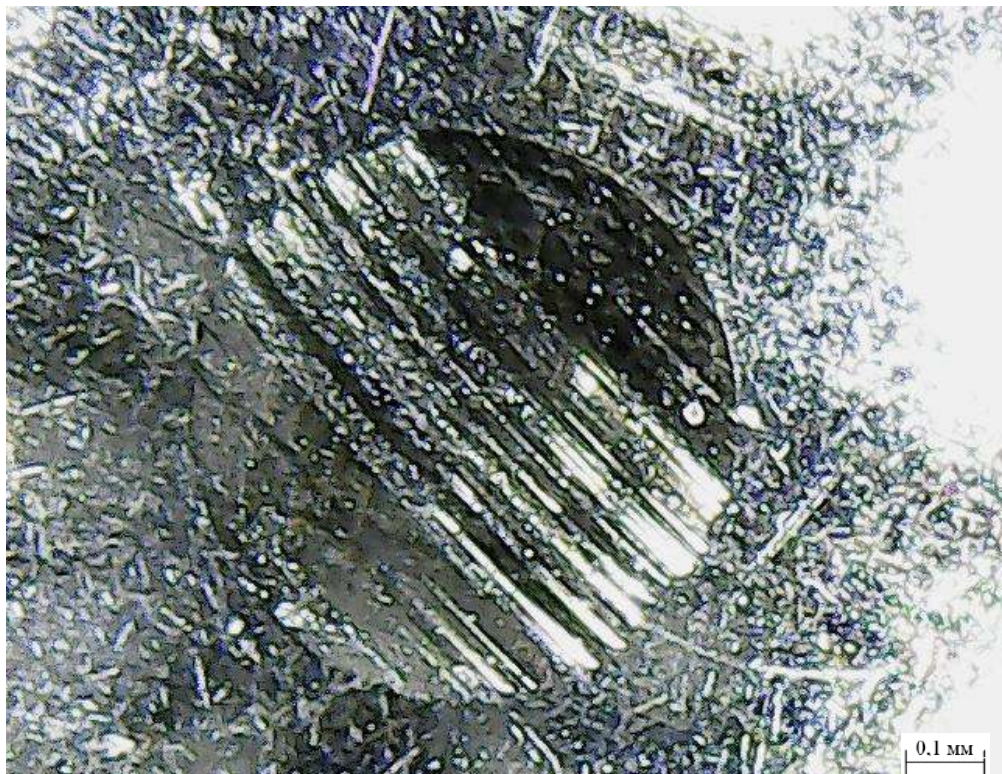


Рисунок 11 – пляма зносу при добавлянні присадки номер 3



Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата

КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ

Анк

55

Рисунок 12 – пляма зносу при добавлянні присадки номер 4

Аналіз отриманих експериментальних даних дає змогу зробити однозначний висновок щодо ефективності окремих біорозкладних присадок, введених до соняшникової оливи. Найкращий результат продемонструвала присадка №2, яка є складним ефіром аконітової кислоти зі спиртами С16–С18. Після її додавання спостерігалось істотне покращення протизносних характеристик: діаметр плями зношування зменшився на 42%, що свідчить про значне зниження інтенсивності контактного тертя й підвищення захисних властивостей мастильного шару. Такий ефект підтверджує високу реакційну здатність аконітових ефірів і їхню сумісність із рослинною основою.

На другому місці за ефективністю опинилася присадка №3, представлена складним ефіром етилендіамінтетраоцтової кислоти (EDTA) зі спиртами С16–С18. Її застосування також спричинило поліпшення характеристик тертя, хоча й не настільки виражене, як у випадку з присадкою №2. Зокрема, зниження діаметра плями зношування склало 24%, що є досить вагомим показником для первинного циклу випробувань. Це свідчить, що модифіковані ефіри EDTA здатні формувати захисні плівки на поверхнях тертя та частково компенсувати недостатню полярність рослинної оливи.

З іншого боку, присадка №4, яка складається зі складних ефірів малеїнової та фталлової кислот, не показала помітного впливу на протизносні властивості соняшникової оливи. Показники до та після модифікації практично не відрізнялися, що може свідчити про недостатню хемосорбційну активність або слабку взаємодію компонентів присадки з тригліцеридами рослинного походження.

Найменш ефективною виявилася присадка №1, яка не лише не покращила, а навпаки — погіршила протизносні характеристики оливи. Замість зменшення, діаметр плями зношування збільшився приблизно на 17%, що свідчить про негативний вплив даної добавки на процеси

					<i>KPM MТBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		56

змащування. Можливо, компоненти присадки вступають у небажану реакцію з базовою оливою або перешкоджають формуванню захисної плівки на поверхнях контакту.

У підсумку можна зазначити, що найбільш перспективною для подальших досліджень є саме присадка №2, яка продемонструвала найвиразнішу здатність покращувати антифрикційні властивості рослинної оливи, тоді як інші добавки потребують додаткового аналізу, оптимізації складу або обмеження використання.

3.4 Визначення оптимального процентного вмісту присадок у рослинному маслі

З огляду на те, що присадки №3 та №4 продемонстрували незадовільні результати під час початкових випробувань, подальше дослідження їх впливу на протизносні характеристики мастильного матеріалу недоцільне. Тому наступний етап експериментів був зосереджений виключно на присадках №1 та №2, які проявили найбільш позитивний ефект.

Для оцінки залежності ефективності від концентрації ці добавки вводили у рослинне масло в кількостях 1%, 3% та 4%. Підсумкові дані експериментів, а також результати їх статистичної перевірки наведено у таблицях 3.11–3.17 та проілюстровано на рисунках 13–18.

Таблиця 3.11 – присадка 1 (1%)

№ дослідів	Паралельні дослідження			u_j^2	S_j^2
1	0,72	0,65	0,58	0,67	0,0245
2	0,74	0,62	0,59	0,63	0,0433
3	0,73	0,68	0,61	0,68	0,0176
4	0,72	0,67	0,60	0,66	0,0174
5	0,74	0,63	0,58	0,66	0,0417

6	0,73	0,68	0,61	0,67	0,0149
---	------	------	------	------	--------

У ході проведених розрахунків було визначено значення критерію Кохрана, яке склало $G_p = 0,271$. Згідно з даними додатку 1 [35], відповідне табличне граничне значення становить $G_T = 0,616$. Оскільки нерівність $G_p \leq G_T$ виконується, можна стверджувати, що проведені експерименти є відтворюваними, а ряд отриманих дисперсій можна вважати однорідним. Це свідчить про відсутність суттєвих випадкових або систематичних похибок та підтверджує стабільність умов проведення досліджень, що дозволяє використовувати ці дані для подальшого статистичного аналізу та побудови моделей.

Таблиця 3.12 – присадка 1(3%)

№ дослідів	Паралельні дослідження			y_j	s_j^2
1	0,62	0,53	0,57	0,57	0,0115
2	0,69	0,56	0,61	0,62	0,0238
3	0,62	0,53	0,55	0,57	0,0149
4	0,61	0,52	0,57	0,57	0,00787
5	0,69	0,55	0,61	0,62	0,0269
6	0,63	0,54	0,56	0,58	0,0135

У процесі проведення статистичної обробки експериментальних даних було обчислено значення критерію Кохрана, яке склало $G_p = 0,273$. Для порівняння з табличним показником, відповідно до додатку 1, було обрано $G_T = 0,616$. Оскільки виконується умова $G_p \leq G_T$, можна зробити висновок, що серія експериментів є відтворюваною, а отримані дисперсії можна розглядати як однорідні. Така однорідність свідчить про відсутність суттєвих випадкових чи систематичних похибок у вимірюваннях та підтверджує

надійність організації експерименту, що дозволяє застосовувати ці дані для подальшого статистичного аналізу та побудови науково обґрунтованих висновків.

Таблиця 3.13- присадка 1 (4%)

№ дослідів	Паралельні дослідження			y_j	S_j^2
1	0,54	0,60	0,57	0,57	0,00378
2	0,57	0,58	0,58	0,58	$6,13 \cdot 10^{-6}$
3	0,57	0,60	0,59	0,59	0,00162
4	0,53	0,60	0,57	0,57	0,00578
5	0,57	0,58	0,58	0,57	$2,45 \cdot 10^{-5}$
6	0,58	0,59	0,58	0,58	$2,11 \cdot 10^{-5}$

У ході статистичної обробки результатів експерименту було визначено значення критерію Кохрана, яке становить $G_p = 0,494$. Для порівняння обрано табличне граничне значення $GT = 0,616$ згідно з додатком 1. Оскільки виконується умова $G_p \leq GT$, можна стверджувати, що серія проведених дослідів є **відтворюваною**, а сукупність отриманих дисперсій — **однорідною**. Це підтверджує стабільність умов експерименту та відсутність суттєвих випадкових чи систематичних похибок, що забезпечує надійність отриманих даних і дозволяє використовувати їх для подальшого статистичного аналізу та побудови науково обґрунтованих висновків.

Таблиця 3.14- присадка 2 (1%)

№ дослідів	Паралельні дослідження			y_j^3	s_j^2
1	0,39	0,38	0,38	0,38	$3,56 \cdot 10^{-6}$
2	0,39	0,37	0,4	0,39	$6,72 \cdot 10^{-6}$
3	0,40	0,34	0,36	0,37	0,00636
4	0,32	0,4	0,37	0,38	$8 \cdot 10^{-6}$
5	0,43	0,38	0,39	0,4	0,00411
6	0,39	0,36	0,36	0,37	0,00296

У ході статистичної обробки результатів експерименту було визначено значення критерію Кохрана, яке склало $G_p = 0,467$. Для порівняння обрано табличне граничне значення $G_T = 0,616$ згідно з додатком 1 [35]. Оскільки виконується умова $G_p \leq G_T$, можна зробити висновок, що серія проведених дослідів є відтворюваною, а отримані дисперсії — однорідними. Це свідчить про відсутність значних випадкових або систематичних похибок у вимірюваннях та підтверджує стабільність експериментальних умов, що дозволяє застосовувати ці дані для подальшого статистичного аналізу, побудови моделей і формування науково обґрунтованих висновків.

Таблиця 3.15 – присадка 2 (3%)

№ дослідів	Паралельні дослідження			y_j^3	s_j^2
1	0,34	0,34	0,37	0,35	$9,8 \cdot 10^{-5}$
2	0,38	0,37	0,37	0,37	0,00018
3	0,36	0,35	0,41	0,37	0,000018
4	0,3	0,34	0,37	0,34	0,00854

5	0,39	0,36	0,38	0,38	$6,42 \cdot 10^{-5}$
---	------	------	------	------	----------------------

У ході статистичної обробки результатів експерименту було визначено значення критерію Кохрана, яке становить $G_p = 0,593$. Для оцінки однорідності дисперсій використано табличне граничне значення $G_T = 0,616$, наведеного в додатку 1 [35]. Оскільки умова $G_p \leq G_T$ дотримується, можна стверджувати, що проведені дослідження є **відтворюваними**, а отримані дисперсії — **однорідними**. Це свідчить про стабільність експериментальних умов та відсутність суттєвих випадкових або систематичних похибок, що забезпечує надійність результатів і дозволяє використовувати їх для подальшого статистичного аналізу, побудови моделей та формування обґрунтованих наукових висновків.

Таблиця 3.16- присадка 2 (4%)

№ дослідження	Паралельні дослідження			y_j	s_j^2
1	0,37	0,38	0,37	0,37	$8 \cdot 10^{-6}$
2	0,36	0,37	0,38	0,38	$5,34 \cdot 10^{-5}$
3	0,39	0,36	0,35	0,37	0,00181
4	0,39	0,39	0,38	0,38	$4,5 \cdot 10^{-6}$
5	0,39	0,36	0,4	0,38	$4,05 \cdot 10^{-5}$
6	0,4	0,36	0,35	0,37	0,00411

У процесі статистичної обробки отриманих експериментальних даних було визначено значення критерію Кохрана, яке склало $G_p = 0,589$. Для порівняння з табличним граничним показником було взято $G_T = 0,616$, наведене у додатку 1 [35]. Оскільки умова $G_p \leq G_T$ виконується, можна зробити висновок, що проведені дослідження є відтворюваними, а ряд отриманих

дисперсій — однорідним. Це свідчить про стабільність умов експерименту, відсутність значних випадкових або систематичних похибок та підтверджує надійність отриманих даних для подальшого статистичного аналізу, побудови моделей і формування науково обґрунтованих висновків.

Таблиця 3.17 – результати експериментів з присадками 1%, 3%, 4%.

Концентрація	1%	3%	4%
Діаметр плями (присадка №1)	0,664	0,591	0,581
Діаметр плями (присадка №2)	0,386	0,367	0,382

Аналіз представлених експериментальних даних дозволяє оцінити вплив концентрації присадок №1 та №2 на протизносні властивості соняшникової оливи. У таблиці наведено середні значення діаметра плями зношування для трьох концентрацій присадок: 1%, 3% та 4%.

Для присадки №1 спостерігається виражена тенденція до зниження діаметра плями зношування при збільшенні концентрації від 1% до 3%. Зокрема, при 1% концентрації діаметр плями становив 0,664 мм, при 3% зменшився до 0,591 мм, а при 4% досяг значення 0,581 мм. Це свідчить про поступове покращення протизносних властивостей оливи із підвищенням кількості присадки. Водночас, зменшення ефекту між концентраціями 3% і 4% є незначним, що вказує на наближення до оптимального рівня введення цієї присадки, після якого додаткове збільшення концентрації не призводить до суттєвого покращення ефективності.

Для присадки №2 діаметри плями зношування демонструють іншу поведінку. При 1% концентрації значення становило 0,386 мм, при 3% зменшилось до 0,367 мм, що свідчить про максимальне покращення протизносних властивостей саме на цьому рівні введення присадки. Проте

при підвищенні концентрації до 4% відбувається незначне збільшення діаметра плями — до 0,382 мм, що може свідчити про початок ефекту перенасичення або незначної взаємодії присадки з базовою оливою при високих концентраціях.

Таким чином, оптимальною концентрацією для присадки №1 є 4%, оскільки вона забезпечує найменший діаметр плями зношування в рамках експерименту, хоча приріст ефективності від 3% до 4% незначний. Для присадки №2 оптимальним виявився рівень 3%, при якому досягається мінімальний діаметр плями зношування. Ці результати дозволяють зробити висновок про існування індивідуальних оптимальних концентрацій для кожної присадки, що забезпечують максимальний ефект проти зношування при мінімальних витратах на добавку.

Крім того, порівняння обох присадок показує, що присадка №2 у будь-якій концентрації забезпечує значно кращі протизносні властивості, ніж присадка №1, оскільки навіть при 1% введення діаметр плями менший, ніж у присадки №1 при 4%. Це підтверджує високу ефективність складного ефіру аконітової кислоти зі спиртами C16–C18 як модифікатора для рослинної оливи.

3.5 Результати проведеного дослідження

Для більш наочного та систематичного узагальнення результатів проведеного експериментального дослідження доцільно представити всі отримані дані у вигляді єдиної зведеної таблиці (таблиця 3.18). Такий підхід дозволяє порівняти ефективність різних присадок, їх вплив на протизносні властивості рослинної оливи та визначити оптимальні концентрації для практичного застосування.

Об'єднання всіх експериментальних показників у загальну таблицю забезпечує:

					<i>KPM МТВА 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		63

- 1- Легку візуалізацію та аналіз даних — можна швидко оцінити вплив кожної присадки та концентрації на діаметр плями зношування;
- 2- Можливість порівняння ефективності присадок між собою і визначення найбільш результативних;
- 3- Оцінку відтворюваності та однорідності результатів, що підтверджується проведеними розрахунками критерію Кохрана;

Зведена таблиця 3.18 містить усі ключові показники дослідження: тип присадки, концентрацію введення, середні значення діаметра плями зношування, а також узагальнені висновки щодо ефективності кожної комбінації. На основі цієї інформації можна зробити обґрунтовані висновки щодо оптимального складу рослинної оливи з біорозкладними присадками для підвищення протизносних характеристик у механізмах тертя.

Таким чином, таблиця 3.18 виступає важливим аналітичним інструментом, який узагальнює всі отримані експериментальні дані, забезпечує їх систематизацію та надає зручну основу для подальшого обговорення результатів у наступних розділах дослідження.

Таблиця 3.18 – результати досліджень

Концентрація	1%	2%	3%	4%
ВМГ3-45	0,921	0,921	0,921	0,921
АМГ-10	1,112	1,112	1,112	1,112
Діаметр плями (чисте)	0,68	0,68	0,68	0,68
Діаметр плями (присадка №1)	0,66	0,52	0,59	0,58
Діаметр плями (присадка №2)	0,38	0,39	0,37	0,38

Як видно з результатів проведених експериментів, найменший діаметр плями зношування був досягнутий при додаванні до соняшникової оливи 3% присадки №2, що являє собою складний ефір аконітової кислоти зі спиртами С16–С18. У порівнянні з чистою соняшниковою оливою, це дозволило зменшити діаметр плями зношування на 47%, що свідчить про істотне підвищення протизносних властивостей матеріалу.

При зіставленні цього результату з показниками традиційних нафтових гідравлічних рідин, таких як ВМГЗ-45 та АМГ-10, зменшення діаметра плями зношування у разі використання модифікованої соняшникової оливи склало 70% та 74% відповідно. Така порівняльна оцінка свідчить про те, що рослинні оливи не лише не поступаються за протизносними характеристиками нафтовим гідравлічним рідинам, а в багатьох випадках демонструють їх значне перевищення.

На основі цих результатів доцільно розглядати розробку нових присадок, здатних усунути основні недоліки рослинних олив, зокрема швидке випаровування та утворення залишкового нальоту. Крім того, перспективним напрямком є створення систем тертя, у яких ці недоліки не впливатимуть на ефективність роботи.

Також виправданим є проведення подальших досліджень щодо застосування соняшникової оливи у більш навантажених вузлах тертя, що дозволить оцінити її здатність замінювати нафтові мастильні рідини у складних умовах роботи. Ці дослідження відкривають можливості для впровадження екологічно безпечних та високоефективних мастильних матеріалів у промислових і транспортних системах.

					<i>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		65

ВИСНОВКИ

У ході виконання випускної кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження, присвячене вивченню застосування біорозкладних мастильних матеріалів, їх перспективного використання та заходів щодо заміни традиційних нафтових продуктів на екологічно безпечні аналоги. На основі проведеного аналізу сучасних тенденцій у галузі змащувальних матеріалів була обґрунтована актуальність цієї проблеми та визначено пріоритетні напрямки досліджень.

Для досягнення поставленої мети був розроблений алгоритм проведення експериментального дослідження, що дозволяє оцінити вплив біорозкладних присадок на протизносні властивості рослинних олив. Було визначено зразки рослинних масел, які могли б ефективно конкурувати з традиційними нафтовими гідравлічними рідинами.

Відповідно до розробленого алгоритму були проведені експериментальні випробування обраних композицій масел і присадок. У першому етапі оцінювалася роботоздатність присадок, тобто їх здатність покращувати протизносні характеристики базового масла. Для присадок, які показали позитивні результати, було виконано додаткове дослідження з метою визначення найбільш ефективної концентрації введення у масло. Паралельно була перевірена відтворюваність результатів шляхом проведення повторних дослідів і оцінки однорідності отриманих дисперсій за допомогою критерію Кохрана.

Результати експериментів показали, що навіть чисте соняшникове масло демонструє кращі протизносні властивості, ніж використовувані в промисловості гідравлічні масла ВМГЗ-45 та АМГ-10. Зменшення діаметра плями зношування у порівнянні з цими нафтовими рідинами склало 25% та

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ доквм	Пілпис	Дата		66

38% відповідно, що свідчить про високу природну здатність рослинної оливи зменшувати інтенсивність тертя.

Додаткове введення присадок дозволило значно покращити протизносні характеристики масла. Так, складний ефір етилендіамінтетрауксусної кислоти (EDTA) зі спиртами C16–C18 зменшив діаметр плями зношування на 24% порівняно з чистим маслом. Найбільш ефективним виявився складний ефір аконітової кислоти зі спиртами C16–C18, який забезпечив зниження діаметра плями зношування на 47%, демонструючи високу здатність до формування захисного плівкового шару на поверхнях тертя.

Водночас інші присадки показали обмежену або негативну ефективність. Складні ефіри малеїнової та фталлової кислот (1:1) не надали помітного впливу на протизносні властивості масла. Ще більш негативний ефект спостерігався при застосуванні маслорастворимих похідних бензотриазолу, які не лише не покращили показники, а й погіршили протизносні властивості оливи, збільшивши діаметр плями зношування на 17%.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило, що рослинні масла не лише здатні конкурувати з нафтовими гідравлічними рідинами, але й у багатьох випадках перевершують їх за параметрами зносостійкості. Водночас ефективність використання біорозкладних присадок значною мірою залежить від їх хімічної структури та концентрації введення, що визначає доцільність подальшої розробки нових композицій і оптимізацію складів для промислового застосування.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що застосування біорозкладних масел у якості гідравлічних рідин є цілком можливим. Проведені експерименти продемонстрували, що рослинні оливи з біорозкладними присадками не лише забезпечують належні протизносні

					<i>KPM MTBA 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		67

характеристики, а в окремих випадках перевершують традиційні нафтові гідравлічні рідини.

Більше того, даний напрямок є перспективним навіть при розгляді виключно експлуатаційних властивостей, без урахування екологічної складової. Це означає, що рослинні масла можуть забезпечити ефективне змащування, зменшення зношування деталей і підвищення надійності роботи гідравлічних систем. Водночас використання біорозкладних композицій відкриває можливості для подальшого удосконалення складів, що дозволить поєднувати високі експлуатаційні показники з екологічною безпекою.

Таким чином, експериментальні дані підтверджують технічну доцільність застосування біорозкладних олив у промислових і транспортних системах, що робить їх перспективною альтернативою нафтовим гідравлічним рідинам і відкриває нові напрямки для розвитку екологічно безпечних мастильних матеріалів.

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		68

Список використаних джерел

1. Белов, Ю. М. "Зносостійкість матеріалів і поверхонь" / Ю. М. Белов. – Київ: Вища школа, 2015. С 81-84.
2. Гулей, В. П. "Механіка зношування та зносостійкість матеріалів" / В. П. Гулей. – Львів: Наука, 2018. С. 92-102.
3. Мартиненко, А. В. "Техніка та технології підвищення зносостійкості" / А. В. Мартиненко. – Харків: Фактор, 2017. С. 32-44.
4. Михайлов, Д. А. "Матеріалознавство: основи зносостійкості та механічних властивостей" / Д. А. Михайлов. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. С. 103-110.
5. Крикун, В. О. "Механізми зносу та методи підвищення зносостійкості" / В. О. Крикун. – Київ: Наукова думка, 2014. С. 34-52.
6. Васильєв, В. П. "Аналіз процесів зносу та їх вплив на довговічність машин" / В. П. Васильєв. – Київ: Політехніка, 2019. С. 31-40.
7. Кондрашов, С. І. "Матеріали з високою зносостійкістю" / С. І. Кондрашов. – Одеса: Морський університет, 2020.
8. Щербань, О. М. "Фізика зносостійкості матеріалів" / О. М. Щербань. – Харків: ХНУ, 2016.
9. Шевченко, П. В. "Методи дослідження зносостійкості матеріалів та інструментів" / П. В. Шевченко. – Львів: Наука і техніка, 2015.
10. Головка, В. В. "Технічна експлуатація та зносостійкість матеріалів" / В. В. Головка. – Київ: Академія, 2018.
11. Сікора, І. М. "Матеріали для високих навантажень: зносостійкість та удосконалення" / І. М. Сікора. – Харків: Техніка, 2017.
12. Ярмоленко, В. С. "Основи фізики зношування матеріалів" / В. С. Ярмоленко. – Київ: Наукова думка, 2020.

					<i><u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u></i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		69

- 13.Перепічка, С. П. "Методи аналізу зношування і ресурсозбереження" / С. П. Перепічка. – Одеса: Одеська національна академія, 2019.
- 14.Радченко, С. О. "Знос і механізми зношування металів" / С. О. Радченко. – Харків: Вища школа, 2016.
- 15.Shishkin, I. B., Cherkasskiy, D. A. "Wear resistance of materials: experimental approaches and mechanisms" / I. B. Shishkin, D. A. Cherkasskiy. – Springer, 2021.
- 16.Bansal, R. K., Batra, S. "Wear and Tear: The Study of Friction and Wear of Materials" / R. K. Bansal, S. Batra. – Elsevier, 2022.
- 17.Suh, J. Y. "Friction and Wear: A Textbook in Tribology" / J. Y. Suh. – Springer, 2021.
- 18.Evans, A. G. "Materials Science of Wear" / A. G. Evans. – Cambridge University Press, 2020.
- 19.Jiang, X. "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials" / X. Jiang. – Wiley, 2022.
- 20.Buhl, M. L., Bergmann, P. "Surface Engineering for Wear Resistance" / M. L. Buhl, P. Bergmann. – Wiley-VCH, 2020.
- 21.Tiwari, A., Saini, M. "Wear Resistance of Materials and Coatings" / A. Tiwari, M. Saini. – Springer, 2021.
- 22.Papini, M., Lugo, J. S. "Materials and Wear in Mechanical Engineering" / M. Papini, J. S. Lugo. – Wiley, 2019.
- 23.Fridman, A. "Tribology: Principles and Applications" / A. Fridman. – Elsevier, 2020.
- 24.Zhu, Z., Liu, J. "Tribological Performance of Materials: Wear and Friction Mechanisms" / Z. Zhu, J. Liu. – CRC Press, 2021.
- 25.Zhang, L., Qiu, M. "Wear and Tear: The Materials and Mechanisms Behind Friction" / L. Zhang, M. Qiu. – Elsevier, 2020

					<i>KPM МТВА 25 24352. 000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		70

Додатки

					<u>КРМ МТВА 25 24352. 000 ПЗ</u>	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		71