

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

д.т.н., професор

Оксана МІКОСЯНЧИК

«21» грудня 2023 р.

Кваліфікаційна робота

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО СТУПЕНЯ
“МАГІСТР”**

**Тема: Система контролю якості паливно-мастильних матеріалів у
державній авіації України**

Виконавець: _____ Назарій БЕРЕЗІВСЬКИЙ

Керівник: д.т.н., професор _____ Оксана МІКОСЯНЧИК

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

розд. “Охорона навколишнього середовища” _____ Володимир МЕЛЬНИК

Нормоконтролер: Оксана МІКОСЯНЧИК _____

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Аерокосмічний факультет

Кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів

Спеціальність 152. «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
Освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., професор
_____ Оксана МІКОСЯНЧИК
“05” жовтня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи

Назарій Березівський

- 1. Тема кваліфікаційної роботи** «Система контролю якості паливно-мастильних матеріалів у державній авіації України» затверджена **наказом ректора № 2035/ст від 05.10.2023 року**
- 2. Термін виконання роботи:** з 02 жовтня по 31 грудня 2023 року
- 3. Вихідні дані до роботи:** Системи моніторингу якості пально-мастильних матеріалів, якісні і кількісні методи аналізу мастильних матеріалів, стандарти оцінки фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів, пристрої для трибодіагностики.
- 4. Зміст пояснювальної записки:** Вступ. Розділ 1. Підвищення експлуатаційної надійності технічних систем шляхом моніторингу мастильного матеріалу. Розділ 2. Методи оцінки якості мастильних матеріалів авіаційного призначення. Розділ 3. Удосконалення системи контролю якості паливно-мастильних матеріалів у державній авіації України. Розділ 4. Основні аспекти утилізації та переробки відпрацьованих мастильних матеріалів.
- 5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:**
 1. Вступ
 2. Мета та завдання дослідження
 3. Взаємозв'язок надійності мащення та ресурсу механізмів
 4. Класифікація методів трибомоніторингу авіаційної техніки
 5. Інноваційні методики для оцінки якості авіаційних мастильних матеріалів
 6. Порядок оцінки триботехнічних параметрів мастильних матеріалів.
 7. Центри контролю якості паливно-мастильних матеріалів у державній авіації України

6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Ознайомитися з літературою та сформуванати структуру кваліфікаційної роботи.	2.10-12.10 2023	
2.	Написати вступ	13.10-25.10 2023	
3.	Розробити розділ 1	26.10-12.11 2023	
4.	Розробити розділ 2	13.11-23.11 2023	
5.	Розробити розділи 3 та 4	24.11-15.12 2023	
6.	Сформулювати висновки по роботі.	16.12-19.12 2023	
7.	Оформити кваліфікаційну роботу та здати на рецензію.	20.12-21.12 2023	

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона навколишнього середовища	Доцент Володимир МЕЛЬНИК	02.10.2023 Володимир МЕЛЬНИК	18.12.2023 Володимир МЕЛЬНИК

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника)

Оксана МІКОСЯНЧИК
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Назарій БЕРЕЗІВСЬКИЙ
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Система контролю якості паливно-мастильних матеріалів у державній авіації України»: сторінок 90, рисунків 21, таблиць 8, використаних джерел 36.

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні та триботехнічні властивості мастильних матеріалів при експлуатації.

Предмет дослідження – критерії оцінки зміни змащувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей мастильних матеріалів.

Мета дослідження - розробка методики оцінки триботехнічних властивостей ПММ для діагностики якості мастильних матеріалів в процесі експлуатації.

Методи дослідження – теоретичні дослідження виконані на основі аналізу методів моніторингу мастильних матеріалів, оцінена якість мастильних матеріалів за статистичними даними зміни їх фізико-хімічних властивостей при експлуатації, проведено аналіз експлуатаційної якості олив з застосуванням загальних положень трибології, статистична оцінка лінійного зносу пар третя.

Дослідження впливу мастильних матеріалів на тривалість та продуктивність наземної авіаційної техніки виявило ключові триботехнічні показники, такі як антифрикційність, реологія, змащення та протизношувальність. Лабораторні дослідження лінійного зносу показали, що температурні зміни та старіння оливи впливають на протизношувальні властивості. Олива ТАД-17і втрачає ефективність під впливом експлуатаційних факторів. Рекомендації заміни мастильного матеріалу, враховуючи 20% зносу зубчастих передач, можуть підвищити тривалість та надійність механізмів наземної техніки. Отримані результати є основою для подальших наукових досліджень та розробки практичних рекомендацій у сфері моніторингу мастильних матеріалів у державній авіаційній службі України.

Результати досліджень на лабораторному триботехнічному обладнанні можуть служити основою для подальших вдосконалень методів та стандартів оцінювання експлуатаційних характеристик авіаційних олив.

ABSTRACT

Explanatory note for the qualification work "Quality Control System of Fuel and Lubricants in the State Aviation of Ukraine": 90 pages, 21 figures, 8 tables, 36 cited sources.

The object of the study is the physico-chemical and tribotechnical properties of lubricating materials during operation.

The subject of the research includes criteria for evaluating changes in lubricating, anti-friction, and anti-wear properties of lubricating materials.

The aim of the research is to develop a methodology for assessing tribotechnical properties of fuel and lubricants for diagnosing the quality of lubricating materials during operation.

Research methods include theoretical studies based on the analysis of lubricating material monitoring methods, evaluation of the quality of lubricating materials based on statistical data on changes in their physico-chemical properties during operation, analysis of the operational quality of oils using the general principles of tribology, and statistical assessment of linear wear of pairs.

The study of the influence of lubricating materials on the durability and productivity of ground aviation equipment revealed key tribotechnical indicators such as anti-friction, rheology, lubrication, and anti-wear properties. Laboratory studies of linear wear showed that temperature changes and oil aging affect anti-wear properties. TAD-17i oil loses efficiency under the influence of operational factors. Recommendations for replacing lubricating material, taking into account no more than 20% wear of gears, can increase the durability and reliability of ground equipment mechanisms. The obtained results serve as a basis for further scientific research and the development of practical recommendations in the field of monitoring lubricating materials in the military industry.

The results of studies on laboratory tribotechnical equipment can serve as a basis for further improvements in methods and standards for evaluating the operational characteristics of aviation oils.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ МОНІТОРИНГУ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ.....
1.1. Види мастильних матеріалів	12
1.2. Сучасні стратегії розробки та впровадження авіаційних паливно- мастильних матеріалів	Ошибка! Закладка не определена.
1.3. Закономірності змін фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів.	20
1.4. Трибомоніторинг машин та механізмів за оцінкою властивостей мастильних матеріалів.....	Ошибка! Закладка не определена.
Висновки до розділу 1.....	33
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....36
2.1 Класифікація методів трибомоніторингу авіаційної техніки.....	38
2.2. Інноваційні методики для оцінки якості авіаційних мастильних матеріалів.....	О шибка! Закладка не определена.
2.3. Методи оцінки фізико-хімічних показників мастильних матеріалів...47	
Висновки до розділу 2.....	51
РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У ДЕРЖАВНІЙ АВІАЦІЇ УКРАЇНИ.....53
3.1. Впровадження ефективних стратегій контролю для забезпечення	

якості мастильних матеріалів в авіаційній галузі.....	53
3.2. Аналіз результатів експериментів та їх вплив на вибір якісних мастильних матеріалів.	59
3.3. Моніторинг якості мастильних матеріалів під час експлуатації авіаційної наземної техніки.....	65
Висновки до розділу 3.....	68
РОЗДІЛ 4 ОСНОВНІ АСПЕКТИ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ПЕРЕРОБКИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	71
4.1. Забруднення навколишнього середовища відпрацьованими мастильними матеріалами.....	72
4.2. Використання та регенерація відпрацьованих моторних олів: перспективні методи.....	76
Висновки до розділу 4.....	Ошибка! Закладка не определена.
ВИСНОВКИ.....	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ПММ – пально-мастильні матеріали

АНТ – авіаційна і наземна техніка

АТ – авіаційна техніка

ПС – повітряне судно

ТО – технічне обслуговування

АД – авіаційний двигун

ЧМТ – чотирикулькова машина тертя

ММ – мастильний матеріал

ВСТУП

Трибодіагностика - це інструмент для прогнозного обслуговування машин і обладнання з використанням мастильних матеріалів і технологічних рідин. Він спрямований на якісний і кількісний аналіз мастильного матеріалу, визначення його стану, змащувальних властивостей і забруднення сторонніми речовинами. При трибодіагностиці устаткування, для змащування якого застосовують оливи, оцінка експлуатаційної якості олив визначається за наступними показниками: кінематична в'язкість, вміст води, клас чистоти (вміст механічних домішок), вміст продуктів окислення, вміст антиоксидантів, кислотне число, визначення стирання металів.

Відповідна інтерпретація результатів поточного стану мастильного матеріалу щодо забруднення та хімічного розкладання дозволить завчасно попередити ознаки несправності машин і обладнання або самого мастильного матеріалу.

Застосування триботехнічної діагностики для оцінки стану мастильних матеріалів і технологічних рідин є актуальним напрямком не тільки з економічної точки зору, а й з точки зору охорони навколишнього середовища: знижує витрати на обслуговування, скорочення простоїв за рахунок діагностики фактичного стану контрольованих пристроїв, термін служби обладнання та мастильного матеріалу буде подовжено, знижується ризик нещасних випадків, зменшує витрату мастильного матеріалу, зменшує витрати на утворення, зберігання та утилізацію небезпечних відходів.

Актуальність застосування трибодіагностики для моніторингу технічного стану машин та механізмів полягає в тому, що це діагностика без розбирання, без необхідності зважування обладнання, а також без зупинки виробництва або експлуатації технічної системи. Підвищується надійність і термін служби машин, а також зменшуються витрати на профілактичне обслуговування.

Практично у всіх галузях промисловості мастильний матеріал відіграє важливу роль у процесі підтримки справного технічного стану складних механізмів, таких як двигуни, турбіни, компресори, редуктори, електричні машини, вентилятори та ін. **Актуальність розробки алгоритму моніторингу якості пально-мастильних матеріалів (ПММ)** під час експлуатації авіаційної і наземної техніки (АНТ) обумовлена не тільки потребою в удосконаленні системи забезпечення АНТ мастильними матеріалами з ефективними фізико-хімічними показниками, а також необхідністю створення методик оцінки експлуатаційних властивостей ПММ для діагностики несправностей та прогнозування подальших термінів напрацювання АНТ [1]. 10-й Хімотологічний Центр Міністерства оборони України в 2021 – 2022 роках видав понад 100 сертифікатів про установлення відповідності між фактичними показниками якості ПММ та зазначеними в нормативних документах, що свідчить про високу потребу військової, АНТ в високоефективних ПММ, оскільки ефективний аналіз ПММ та програма їх моніторингу можуть забезпечити підвищення роботоздатності технічних систем та знизити експлуатаційні витрати [2].

Метою роботи є розробка методики оцінки триботехнічних властивостей ПММ для діагностики якості мастильних матеріалів в процесі експлуатації.

Для забезпечення якісного трибомоніторингу оцінки стану авіаційних мастильних матеріалів **необхідно вирішити наступні завдання:**

- проаналізувати методи трибодіагностики авіаційної техніки;
- визначити чинники, що впливають на деградацію мастильного матеріалу та його ресурсу;
- проаналізувати вплив забруднення (потрапляння домішок із навколишнього середовища, води) на фізико-хімічні та експлуатаційні властивості мастильного матеріалу;
- проаналізувати визначення зносу машин за допомогою ферографії - знос підшипників, шестерень, гідравлічних елементів, клапанів, насосів;

– проаналізувати сучасні методи оцінки якості мастильного матеріалу при експлуатації;

– розробити алгоритм оцінки експлуатаційних властивостей авіаційних мастильних матеріалів.

Об’єкт дослідження – фізико-хімічні та триботехнічні властивості мастильних матеріалів при експлуатації.

Предмет дослідження – критерії оцінки зміни змащувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей мастильних матеріалів.

Методи, застосовані в кваліфікаційній роботі: теоретичні дослідження виконані на основі аналізу методів моніторингу мастильних матеріалів, оцінена якість мастильних матеріалів за статистичними даними зміни їх фізико-хімічних властивостей при експлуатації, проведено аналіз експлуатаційної якості оливи з застосуванням загальних положень трибології, статистична оцінка лінійного зносу пар тертя.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в: запропонованій програмі моніторингу оцінки якості мастильних матеріалів авіаційного призначення за триботехнічними показниками, яка надає змогу оцінити як експлуатаційні показники мастильного матеріалу, так і його вплив на матеріал контактних поверхонь під час лабораторних та стендових випробувань; розробці протоколу досліджень оцінки трибологічних властивостей авіаційних оливи на вібротрибометрі з оцінкою протизношувальних та антифрикційних властивостей мастильних матеріалів та якості матеріалів пар тертя; запропонованому способі оцінки протизношувальних властивостей трансмісійних оливи шляхом моніторингу зносу на етапах експлуатації оливи, що дозволяє розробити рекомендації про доцільність подальшої експлуатації як мастильного матеріалу, так і технічної системи в цілому.

Практична цінність отриманих результатів полягає в удосконаленні системи контролю якості мастильних матеріалів у державній авіації України на основі моніторингу мастильних матеріалів за триботехнічними

показниками, що розширює можливість вибору якісного мастильного матеріалу з змащувальними, антифрикційними та протизношувальними властивостями та забезпечить підвищення експлуатаційної надійності машин та механізмів повітряних суден та авіаційної наземної техніки; результати досліджень на лабораторному триботехнічному обладнанні можуть служити основою для подальших вдосконалень методів та стандартів оцінювання експлуатаційних характеристик авіаційних олів.

Наукові праці:

1. Pina O.A., Mikosianchuk O.O., Yashchuk O. P., Mnatsakanov R.H., Berezivskyi N.M. Tribomonitoring of the quality of aviation hydraulic oils according to lubricity and rheological indicators. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, No 1/107. P.34-40.

2. О. О. Мікосянчик, О. Є. Якобчук, Є. В. Педан, Н. М. Березівський. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олів. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 2 (99). С.4-13.

3. Березівський Н. Система контролю якості пально-мастильних матеріалів у державній авіації України. XXIII Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки», 4-7 квітня 2023 р. НАУ, Київ

РОЗДІЛ 1

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ МОНІТОРИНГУ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

Відмова і тимчасовий простій машин та механізмів може завдати значної шкоди різним галузям народного господарства. Зокрема, в авіаційній, транспортній, машинобудівній та інших галузях, як правило, приділяють велику увагу мінімізації прямих і супутніх витрат, пов'язаних із потенційними збоями обладнання. Стратегія проактивного технічного обслуговування полягає в розробці системи діагностики мастильних матеріалів та стану контактних поверхонь відповідальних вузлів тертя.

Постійно зростаючі очікування споживачів щодо кількості та якості технічних систем вимагають від експлуатанта підтримки високого рівня експлуатаційної надійності та постійного стимулювання процесу підвищення ефективності. Ці фактори спонукають до впровадження системи проактивного моніторингу та технічного обслуговування, що дозволяє за результатами трибомоніторингу розробляти заходи, направлені на подовження ресурсу технічних систем. Ключовим фактором організації технічного обслуговування світового класу є управління якістю мастильними матеріалами.

1.1. Види мастильних матеріалів.

Мастильні матеріали є необхідною складовою в будь-якому механічному обладнанні та мають важливе значення для підтримання ефективної роботи технічних систем. Вони зменшують тертя між рухомими деталями, захищають від корозії та зносу, покращують термін служби механізмів та забезпечують їхню надійність.

Якість мастильного матеріалу при експлуатації починається з правильного поєднання машини та мастильного матеріалу на етапі

проектування. Програмі надійності мастильного матеріалу залежить від найкращого управління на етапах вибору марки мастильного матеріалу, його кількості, часу експлуатації та заміни, навантажувально-швидкісного та температурного умов експлуатації в певному агрегаті та ін.

Згідно [3] мастильний матеріал, що не відповідає нормованим фізико-хімічним параметрам, є причиною понад 60 відсотків несправностей підшипників і машин. Крім підшипників, найкращі практики змащування слід застосовувати до технології редуктора, гідравліки або, в основному, для всіх технологій, пов'язаних із змащенням.

Мастильні матеріали є одними з найпоширеніших і важливих аспектів в індустрії та машинобудуванні. Вони відіграють першочергову роль у забезпеченні ефективного функціонування рухомих деталей технічних систем. Розглянемо ефективність застосування мастильних матеріалів для підшипників. Застосування підшипників в авіації:

- тренувальні військові винищувачі: підшипники головного валу двигуна, корпуси рушійних одиниць, обертові частини редуктор, допоміжні енергетичні одиниці, системи кондиціонування, гідравлічні та паливні насоси;
- деталі турбогвинтового двигуна: підшипники головного якоря двигуна, корпуси рушійних одиниць, обертові частини редуктора, допоміжні енергетичні одиниці, гідравлічні та паливні насоси.
- вертольоти: головний привід хвостового редуктора, допоміжні енергетичні одиниці, системи кліматизації, гідравлічні та паливні насоси.
- стартер-генератори для авіаційної промисловості: радіальні кулькові підшипники з контактними ущільненнями.

Взаємозв'язок надійності мащення та ресурсу механізмів показано на прикладі підшипника (рис. 1.1). У терміні служби підшипника є 3 фази: фаза безшумності, фаза прогнозування та фаза поломки. Початкова безшумна фаза – це та частина життєвого циклу, на якій може виникнути знос і можливе пошкодження через недостатнє змащення або забруднення мастильних матеріалів. Або, навпаки, якщо мастилом керувати належним чином,

внутрішній знос можна значно зменшити, а термін служби підшипника



Рис. 1.1. Схема фаз життєвого циклу підшипників.

максимально збільшити. Саме на цьому етапі профілактика найбільш ефективна. На цьому етапі життєвого циклу підшипника жодні методи прогнозування ще не можуть зафіксувати будь-які потенційні збої.

У певний момент часу – точка неповернення – первинний знос або пошкодження можна виявити за допомогою прогнозних методів (вібрація, температура, аналіз оливи, візуальний або ультразвуковий контроль). На етапі прогнозування знос і пошкодження можна відстежувати лише шляхом вимірювання аномалій за допомогою моніторингу стану.

Згодом методи моніторингу виявлять, що станеться збій. Якщо вчасно, можна спланувати та здійснити ремонт або заміну. Таким чином, надійність змащення має бути реалізовано на початку першої фази. Надійність змащення – це поєднання найкращих практик, інструментів і стратегій управління.

Класифікувати мастильні матеріали за базовою основою можна наступним чином:

1) Мінеральні оливи. Мінеральні оливи отримують із нафтопродукту. Вони відомі своєю низькою вартістю та загальним застосуванням.

Мінеральні оливи підходять для широкого спектру застосувань, але мають деякі обмеження в терміні служби та стійкості до високих температур.

2) Синтетичні оливи. Синтетичні оливи створюються шляхом хімічного синтезу та мають кращі властивості в порівнянні з мінеральними оливами. Вони стійкі до високих температур, мають вищу в'язкість та довший термін служби. Синтетичні оливи використовуються в вимогливих застосуваннях, таких як авіаційна техніка та високотемпературна промисловість.

3) Напівсинтетичні оливи. Напівсинтетичні оливи є комбінацією мінеральних та синтетичних компонентів. Вони поєднують в собі переваги обох видів та часто використовуються в автомобільній індустрії. Напівсинтетичні оливи зазвичай мають довший термін служби та кращу стійкість до температурних коливань.

4) Мастила тверді - це один із важливих видів мастильних матеріалів, які використовуються в різних галузях промисловості для змащення рухомих деталей і запобігання зносу та тертя. Вони утворюють тверду мастильну плівку на поверхнях, що контактують, і запобігають безпосередньому контакту матеріалів. Мастила тверді володіють високою стійкістю до високих тисків і температур. Це робить їх ідеальними для вимогливих застосувань, де інші мастильні матеріали можуть бути неефективними.

1.2. Сучасні стратегії розробки та впровадження авіаційних паливно-мастильних матеріалів.

В авіаційній промисловості компоненти літального апарату часто зазнають впливу високих температур, тисків, ударних коливань та навантажень під час його руху. Сила тертя, що виникає за таких умов, може призвести до незворотного пошкодження компонентів літака. Використання високоефективних та випробуваних у польових умовах авіаційних мастильних матеріалів може збільшити термін служби компонентів літака та ще більше знизити витрати на його ремонт та технічне обслуговування.

Надійний захист від корозії та тертя забезпечує безпечну та ефективну

роботу літальних апаратів. Завдяки цим якостям синтетичні мастильні матеріали замінили мастила та оливи на вуглеводневій основі у всій авіаційній та аерокосмічній промисловості [4].

Авіаційні мастильні матеріали, що використовуються для орбітальних, суборбітальних і далеких космічних польотів, мають властивості витримувати високий тиск і температуру, вплив окислювачів, палива та радіації без будь-яких змін своїх фізичних та хімічних властивостей. У комерційній та військовій авіації використовуються мастильні матеріали, що мають постійну змащувальну здатність і в'язкість навіть при високих температурах і тисках. Вони також повинні протистояти втраті пари на великій висоті та бути сумісними з металом, пластиком, еластомерами тощо.

Крім того, авіаційні мастила негорючі, інертні і не випаровуються. Деякі компоненти, такі як двигун вентилятора, змащуються лише один раз протягом усього терміну служби, і вони продовжують виконувати свою роботу без будь-яких відмов. Ця ефективність, що підвищує якість авіаційних мастильних матеріалів, підсилює попит на них в авіаційній промисловості.

Авіаційна промисловість поставила мету досягти нульового чистого викиду вуглецю до 2050 року. На 77-й щорічній загальній зустрічі Міжнародна асоціація повітряного транспорту (IATA – International Air Transport Association) в Бостоні, США, 4 жовтня 2021 року було ухвалено резолюцію авіакомпаніями-членами IATA досягнення нульових викидів вуглецю, це напрям підтримано у жовтні 2022 року на 41-й асамблеї Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) (англ. International Civil Aviation Organization, ICAO), зусилля направлені на довгострокову зміну клімату, декарбонізацію авіації.

Очікувані викиди вуглецю на траєкторії «без змін, використання існуючих паливно-мастильних матеріалів» протягом періоду 2021-2050 років становлять приблизно 21,2 гігатонни CO₂. Зменшення такої кількості вуглецю буде величезним технологічним викликом (рис. 1.2).

Успіх вимагатиме скоординованих об'єднаних зусиль усієї галузі

(авіакомпаній, аеропортів, постачальників аеронавігаційних послуг, виробників) та значної державної підтримки.

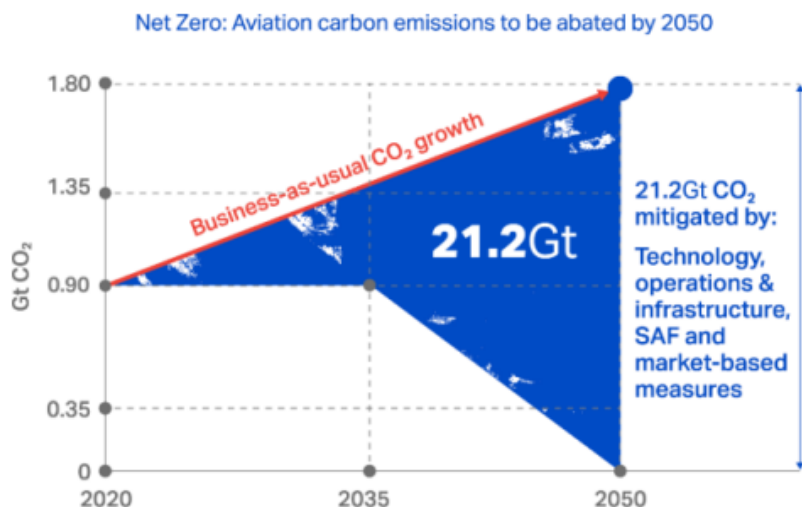


Рис. 1.2. Динаміка очікуваних викидів CO₂ [5].

Мета «чистого нуля» буде досягнута шляхом поєднання максимального усунення викидів у джерелі та використання затверджених технологій компенсації та уловлювання вуглецю (рис. 1.3).

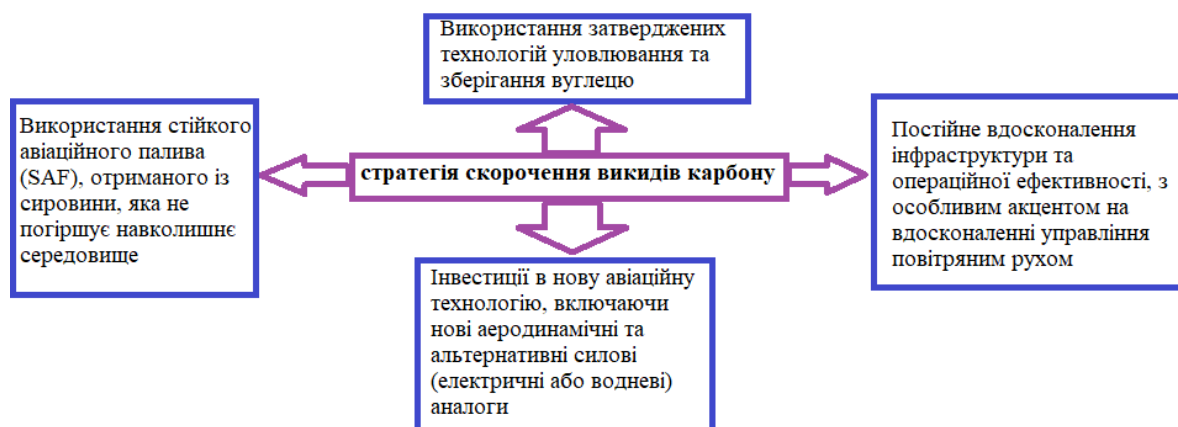


Рис. 1.3. Ключові елементи стратегії скорочення викидів.

В Німеччині в 2021 році введено в експлуатацію перший у світі завод із виробництва синтетичного авіаційного палива у промислових масштабах, створений Siemens Energy. Екологічне паливо для літаків виготовляється електролізом води. Водень, що виділяється, з'єднується з CO₂, який утворюється при виробництві біогазу. Процес електролізу відбувається за

рахунок відновлюваних джерел енергії [6]. Після виходу на проектну потужність заплановано виробництво тонни синтетичного палива на добу. Першим замовником "зеленого" палива стане Lufthansa, яка заправлятиме свої вантажні літаки в аеропорту Гамбурга. Авіакомпанія зобов'язалася закуповувати щонайменше 25 000 літрів синтетичного гасу щорічно протягом наступних п'яти років.

Розглянемо також сучасні оливи та мастила провідних фірм, які направлені на мінімізацію зношування механізмів повітряних суден. Авіаційні мастила повинні бути універсальними, щоб запобігти зношенню та перешкоджати корозії за важких умов.

Mobil Jet Oil II - олива другого покоління, допомагає підтримувати двигуни повітряних суден чистими та працювати з максимальною ефективністю. Лабораторні випробування та перевірки двигуна підтверджують, що він здатний витримувати екстремальні швидкості, температури (до 204 градусів Цельсія / 400 F) і навантаження без поломки. Застосування оливи забезпечує відмінний захист від відкладень, підтримує чистоту двигуна та знижує витрати на обслуговування. Олива забезпечує ефективну сумісність з еластомерами, допомагаючи операторам максимізувати термін служби компонентів і мінімізувати споживання масла. Також олива проявляє виняткові протизношувальні властивості, допомагаючи зменшити витрати на заміну компонентів і подовжити термін служби двигуна та підшипників. Mobil Jet Oil II забезпечує виняткову плинність при низьких температурах і чудовий захист на високих швидкостях. Олива має широкий діапазон схвалень (Specification MIL-PRF-23699-HTS, PRI-QPL-AS5780 – HPC, MIL PRF 23699 STD та ін).

Мастила AeroShell спеціально розроблені, щоб досягти високої експлуатаційної надійності в широкому діапазоні застосувань: захист відкритих колісних підшипників; змащування високонавантажених передач; в кулькових і роликових підшипниках ковзання; на поверхнях і гвинтах приводу.

Наприклад, мастило AeroShell Grease 64 (попередня назва AeroShell 33MS) – це протизадирне мастило для планера повітряного судна (ПС), засноване на перевірній технології додавання літєвого загусника AeroShell Grease 33. Воно може допомогти подовжити термін служби компонентів ПС завдяки своїм винятковим властивостям несучої здатності та протизношувальним властивостям завдяки збагаченню за допомогою 5% дисульфїду молібдену, що направлено на ефективний захист від зносу та корозії. Дане мастило повністю сумісне із мастилом AeroShell Grease 33, застосування цих універсальних поліфункціональних мастил забезпечує захист понад 98% точок нанесення мастила на типовому авіалайнері. Мастило AeroShell Grease 64 повністю схвалено згідно з MIL-G-21164D [7].

Надійним постачальником авіаційних мастильних матеріалів на світовому ринку є компанія NYCO (Франція). За якісними показниками мастильні матеріали компанії NYCO поділяються на термостійкі, морозостійкі, хімічно стійкі, багатоцільові. Вони мають загальну властивість – низьку випаровуваність. Діапазон робочих температур – від -30°C до $+350^{\circ}\text{C}$ залежно від експлуатаційної групи матеріалу. Наприклад, Nycos Grease GN 148 – універсальне синтетичне мастило загального призначення для всіх типів ПС. Nycos Grease GN 148 – суміш синтетичних вуглеводнів і дієстеру з літєвим комплексом в якості загусника. Мастило містить ряд антикорозійних, антиокислювальних та протизношувальних присадок, а також спеціальну добавку для зменшення зносу деталей. Завдяки широкому діапазону робочих температур, навантажувально-швидкісних робочих умов, необхідних для повсякденного обслуговування різних вузлів повітряного судна, мастило Nycos Grease GN 148 може застосовуватися як за специфікацією MIL-PRF-23827C, так і як універсальне мастило за специфікаціями DCSEA 354/A, DEF STAN 91-53, BMS-3-24, MIL-PRF-24139A, DCSEA 382 та DEF STAN 91-12. До переваг даного мастильного матеріалу можна віднести [8]: ефективний захист від зносу, іржі та корозії, у тому числі в солоній воді; тривалий термін служби; широкий діапазон

робочих температур (від -73°C до $+121^{\circ}\text{C}$); висока несуча спроможність; ефективне змащування підшипників, схильних до вібрації; підвищена стійкість до вимивання водою; рекомендовано для підшипників високої та надвисокої швидкості обертання. Застосування даного мастильного матеріалу забезпечує зниження матеріально-виробничих витрат та поліпшену ремонтпридатність відповідальних вузлів авіаційної техніки.

1.3. Закономірності змін фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів.

Найважливішою умовою експлуатації авіаційної техніки (АТ) є забезпечення її надійної та безаварійної роботи на всіх стадіях експлуатації. Найбільш поширеним методом обслуговування авіатехніки є виконання регламентних робіт у встановлені терміни, визначені в нормативних документах. Вони визначаються, виходячи з ресурсів роботи вузлів та агрегатів, які встановлюються розробниками та виробниками за результатами комплексу випробувань, які проводяться при постановці їх на виробництво та експлуатацію.

Однак на практиці досить часто доводиться коригувати терміни обслуговування за результатами експлуатації окремих вузлів та агрегатів, змінюючи терміни проведення регламентних робіт як у бік його скорочення для виявлення несправностей, так і у бік його подовження після оцінки стану різними методами. Цей факт вже кілька десятиліть породжує пильний інтерес експлуатантів та виробників техніки до створення комплексу методів безперервного моніторингу її об'єктивного технічного стану. Дані методи за належного підходу дозволяють проводити обслуговування та ремонт АТ за станом.

Цій темі присвячено велику кількість досліджень, що пропонують непрямі методи, за якими можна з більшою чи меншою точністю та достовірністю судити про стан конкретної системи та коригувати терміни її обслуговування [9]. До них відносяться: оцінка температурного режиму

роботи відповідальних вузлів авіадвигунів, огляд лопаток турбіни та компресора двигуна за допомогою інтероскопів, встановлення контрольних елементів в маслосистему (сигналізатори стружки в оливі) та багато іншого. Окремий діагностичний напрямок займають методи аналізу працюючого мастильного матеріалу, відібраного в процесі експлуатації з маслосистем двигунів.

Як правило, в процесі експлуатації мастильний матеріал є накопичувачем домішок. Вони бувають у формі твердих, рідких і газоподібних забруднень. Якщо не контролювати, ці забруднення можуть накопичуватися до надмірних рівнів. Високий рівень забруднення мастила спричиняє знос механічних компонентів, а також поломку агрегатів. Результатом є погіршення продуктивності, скорочення терміну служби агрегатів та терміну служби мастильного матеріалу.

В роботі [10] встановлено зв'язок між розміром частинок забруднення та товщиною мастильної плівки. Втома поверхні металу відбувається через накопичення мікроскопічних тріщин протягом періоду експлуатації. Поступово тріщини, об'єднуючись, утворюють порожнечі, які підривають поверхні. Потім велика кількість матеріалу відривається, залишаючи вкриті кратерами поверхню, а частки зносу потрапляють в мастильний матеріал та продовжують ланцюгову реакцію зношування. Абразивне зношування є основним механізмом зношування за такою схемою (рис. 1.4).

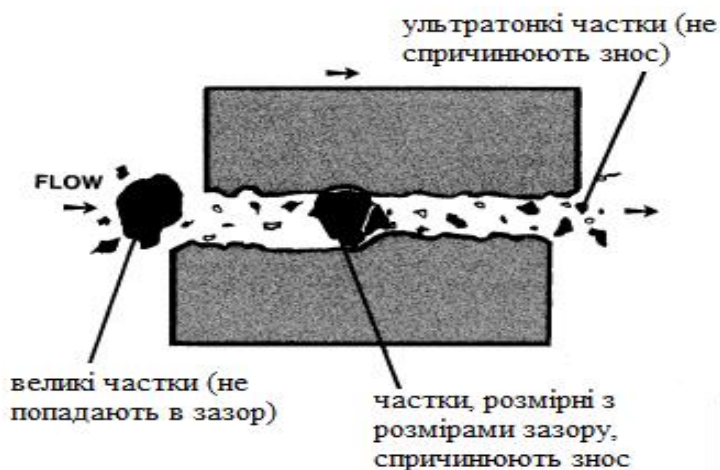


Рис. 1.4. Механізм абразивного зношування.

Частинки потрапляють у зазор між двома рухомими поверхнями, закріплюються в одну з поверхонь і діють як різучі інструменти для видалення матеріалу з протилежної поверхні. Розмір часток, які завдають найбільшої шкоди, є ті, що дорівнюють або трохи перевищують зазор. Більшість компонентів агрегатів ПС АТ мають динамічні зазори менше 2 мікрометрів. Щоб захистити протилежні поверхні від абразивного зношування та втоми, частинки приблизно такого діапазону розмірів необхідно видалити.

Гідравлічна система є центром управління літальним апаратом, продуктивність якої критично залежить від чистоти оливи, що протікає через неї. Відомо, що забруднення оливи гідравлічної системи є основною причиною катастрофічних збоїв і аварій. Огляд літератури в області забруднення гідравлічної оливи показує три чинники [11]:

- існує нестача ефективних методів запобігання проникненню зовнішніх забруднень в гідравлічну оливу,
- немає ефективних методів очищення рідких і газоподібних забруднень нафти,
- відсутність моніторингу в режимі реального часу для основних забруднювачів.

Замість існуючих методів пасивного обслуговування, які мають проблеми, пропонується активний метод контролю забруднення гідравлічної оливи [12], який включає: замкнений гідравлічний контур і закритий масляний бак для запобігання проникненню зовнішніх забруднювачів, вакуумну центрифугу для ефективного видалення забруднень без створення витрат на споживання та контрольні пристрої, встановлені для активного моніторингу вмісту забруднюючих речовин в оливі під час експлуатації. Результати експериментів з очищення та тривимірного моделювання вказують на те, що активний контроль забруднення гідравлічної оливи може ефективно видалити 98,4% твердих забруднень і знизити вміст води нижче 50 частин на мільйон, і, зокрема, знизити вміст газу нижче 2%. Очевидно, що

цей метод може підвищити здатність безперервної роботи авіаційних гідравлічних систем і подовжити період міжобслуговування ПС за рахунок зменшення вмісту забруднюючих речовин в оливі.

У реактивних двигунах ПС мастильні матеріали виконують комплекс важливих функцій. Найважливішим є поглинання та відведення тепла від підшипників. Потім тепло передається від оливи до палива, нагріваючи паливо та охолоджуючи оливу. Цей теплообмін між паливом і оливою важливий, оскільки паливні баки літаків регулярно піддаються надзвичайно холодному впливу температури на великих висотах. Мастильні матеріали також зменшують тертя між металевими рухливими деталями. Турбінні оливи є текучими при низьких температурах з температурою застигання нижче 54 °С. Вони також повинні мати низьку летючість при високих температурах, оскільки вони будуть піддаватися впливу температур близько 200 °С і мати температуру спалаху понад 246 °С. Авіаційні мастильні матеріали також повинні переносити різні домішки та забруднення до масляних фільтрів для видалення. Вони повинні захищати деталі двигуна від корозії, а також запобігти утворенню відкладень. У той же час їм потрібно запобігти руйнуванню еластомерних ущільнювачів, ущільнювальних кілець, прокладок та інших ущільнень двигуна, що може бути особливо складним з огляду на хімічний склад [13].

Авіаційні мастильні матеріали також використовуються для багатьох складових планера: вони змащують приводні гвинти в приводах з гідравлічним приводом, які переміщують органи управління польотом і шасі, доріжки для закрилків, елерони, передні планки, а також керма напряму й висоти. Низькотемпературні характеристики критичні для авіації. На висоті 10 000 м температура повітря коливається від -40 °С до -70 °С. Загалом мастило для корпусу повітря повинно діяти при температурі від -73 °С до 121 °С.

Незначна частина мастильних матеріалів (10–20 %), що використовуються під час роботи обладнання, безповоротно втрачається на

сажу, випаровування, протоки та витоки. Основна їх частина (80–90 %) під час експлуатації зазнає істотних змін у складі та властивостях: від простого забруднення зовнішніми домішками та продуктами внутрішнього зношування до глибоких хімічних перетворень. В результаті вони зазнають значних змін: забруднення механічними домішками, глибокі хімічні зміни, і тому до 80 % цих обсягів нафти перетворюються на відходи [14].

У процесі використання і зберігання відбувається зміна якості мастильного матеріалу, характер і глибина якого залежить від умов експлуатації, зберігання і властивостей самого мастильного матеріалу. Причинами погіршення властивостей олив можуть бути термічний розклад, окислення, полімеризація і конденсація вуглеводнів, обвуглювання, розрідження палива, забруднення неорганічними частинками, обводнення. В результаті в мастильних матеріалах накопичуються асфальтено-смолисті речовини, кокс і сажа, різні солі, кислоти, поверхнево-активні речовини, а також різні забруднення і вода –мастильні матеріали старіють. Мастильний матеріал повинен бути хімічно стійким до окислення киснем повітря при високих температурах, а також не змінювати своїх властивостей при транспортуванні та зберіганні. Він повинен бути не тільки стабільним по відношенню до кисню повітря, а й мінімально змінювати якість при експлуатації під дією високої температури (без розкладання), тиску, вологи [15].

Важливими показниками якості мастильних матеріалів є також в'язкість і температурна залежність в'язкості. Недостатня плинність при низьких температурах ускладнює, а іноді й унеможлиблює використання олив в зимових умовах. Крім того, залежно від умов експлуатації, до олив пред'являються особливі вимоги, такі як підвищена змащувальна здатність олив для трансмісій, деемульгуюча здатність турбінних олив (турбінна олива у разі потрапляння води в масляну систему має швидко і повністю відділятися від води). Кількість показників, що характеризують якість оливи, досить велика, що ускладнює оцінку її придатності для подальшого

використання. У зв'язку з цим зазвичай прагнуть підібрати для кожного виду мастильного матеріалу і його застосування комплексні показники, які найбільш повно характеризують якість оливо, і встановлюють для цих показників дефектні параметри.

Залежно від базових оливо і присадок, а також умов експлуатації, мастильний матеріал при експлуатації піддається окисленню і містить кислотні та/або лужні продукти. Загальне лужне число (TBN) або загальне кислотне число (TAN) аналізується в лабораторії. Величина цих показників характеризує кількість кислих (лужних) продуктів, які необхідні для нейтралізації оливо. Лужне число - показник, що характеризує здатність нафти перетворювати кислі продукти, що утворюються при згорянні палива і окисленні нафти, в нейтральні сполуки, також воно характеризує миючі та диспергуючі властивості оливи. Під миючим ефектом розуміють здатність мастильного матеріалу перешкоджати прилипанню забруднень до поверхонь деталей двигуна. Дисперсність – здатність мастильного матеріалу не збільшувати частки забруднюючих сумішей і утримувати їх у зваженому стані.

Серед показників якості оливо для сучасних двигунів ПС важливе місце займає їх лужне число, що пояснюється наявністю в оливах сильнолужних детергентів. Детергенти використовуються для нейтралізації кислотних продуктів в оливі, які накопичуються з часом при згорянні палива в двигунах (особливо сірки) і окисленні оливи. Оскільки накопичення кислих продуктів у робочому мастильному матеріалі збільшує знос деталей двигуна, період зміни робочої оливи регулюється зміною його лужного числа [16].

Під час експлуатації в моторних оливах активно розвиваються термоокисні процеси, в результаті чого кислотність оливо значно підвищується. Його зростання відбувається за рахунок роботи присадок, що містяться в оливі. Через деякий час кислотність досягає значення, при якому олива більше не може виконувати свої функції і її необхідно замінити. Таким чином, кислотне число є одним з найбільш об'єктивних показників

ефективності оливо.

У екстремальних умовах середовища, при сильному перепаді температур, мастильні матеріали можуть піддаватися більшому ризику забруднення. Одним із прикладів є вплив води, що може спричинити гідроліз мастильних матеріалів, хімічну реакцію, яка може призвести до руйнування основи мастильного матеріалу та/або присадок. Під час гідролізу здатність мастильного матеріалу захищати важливі компоненти ПС може значно знизитись. Гідроліз може відбутися, коли мастильний матеріал піддається впливу надмірної кількості води, наприклад атмосферних опадів і антиожедних рідин, або коли він зберігається неправильно. Діагностика гідролізованого мастильного матеріалу складна, але наступні спостереження можуть вказувати на те, що він забруднений водою:

- незвичний колір: у порівнянні зі свіжим мастильним матеріалом гідролізований мастильний матеріал може виглядати темнішим або навіть чорним;

- зміна консистенції: гідроліз може змінити консистенцію мастильного матеріалу, роблячи його м'якшим або жорсткішим, ніж зазвичай;

- сильний, неприємний запах: іноді гідролізований мастильний матеріал може характеризуватися чітким запахом, який не відповідає свіжому зразку.

Гідроліз може відбутися відразу після того, як мастильний матеріал піддається впливу води, і на швидкість, як правило, впливає діапазон робочих температур застосування та вплив певних елементів. Щоб бути в безпеці, технічні спеціалісти повинні кожні 10 000 годин перевіряти мастильний матеріал на наявність невідповідностей і консультиватися з постачальниками щодо будь-яких питань.

Авіакомпанії працюють із «низькою маржею витрат», що означає, що один помилковий крок або зупинка літака потенційно може призвести до недосягнення цільових показників прибутку. Вартість затримок рейсів у США оцінюється в 31 мільйон доларів на рік, за даними Airlines for America.

Як наслідок, техніки повинні дотримуватися суворих запобіжних заходів, щоб забезпечити ефективну роботу літака [17].

Використання надійного мастильного матеріалу в поєднанні з належними методами зберігання та транспортування може мати вирішальний вплив на збереження стану компонентів АТ і підвищення надійності ПС. Особливо це стосується мастильних матеріалів, які відіграють ключову роль у захисті систем управління польотом, систем шасі, вузлів підшипників і наземного опорного обладнання в різних робочих середовищах.

1.4. Трибомоніторинг машин та механізмів за оцінкою властивостей мастильних матеріалів.

В сучасному світі, де технологічний прогрес та індустріалізація займають центральне місце у розвитку господарства та суспільства, питання стану навколишнього середовища та діагностики технічних систем набувають все більшої актуальності. Однією з ключових галузей, що вивчає процеси взаємодії твердих тіл та контактних поверхонь, є трибологія, яка вивчає явища тертя, зношування та триботехнічні властивості мастильних матеріалів, що має велике практичне значення для різних галузей, включаючи машинобудування, авіацію, автомобільну промисловість, та інші.

Однак, для збереження ефективності роботи механічних систем та попередження негативних наслідків, пов'язаних із зносом та поломками, необхідно не лише розуміти процеси трибології, але й систематично моніторити їхні зміни.

Задачі трибомоніторингу включають в себе:

- своєчасне виявлення прихованих процесів старіння та зношування;
- виявлення початкової стадії процесів, що передують відмовам функціонування та руйнівним процесам;
- скорочення термінів та витрат на технічне обслуговування (ТО);
- зменшення кількості процесів ТО або усунення простоїв;

- раціональне планування графіків ТО;
- оптимізація інтервалів заміни мастильних матеріалів;
- забезпечення робоздатного стану технічних систем АНТ та підвищення їх надійності.

Визначення змін в параметрах стану трибосистеми можна оцінити за станом мастильного матеріалу за алгоритмом, представленим на рис. 1.5.

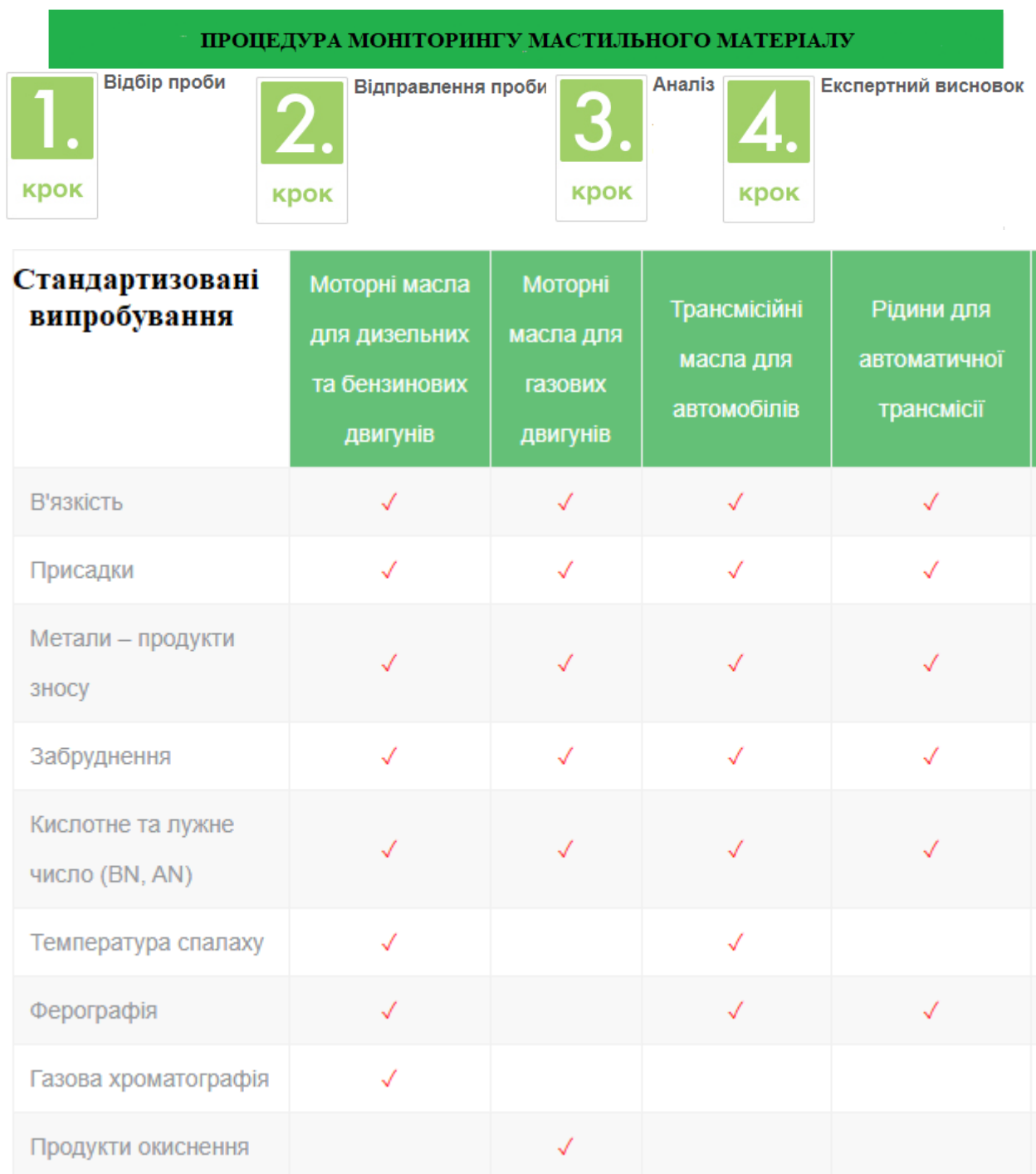


Рис. 1.5. Процедура моніторингу мастильного матеріалу в процесі експлуатації.

Однією з основних задач трибомоніторингу є визначення змін у параметрах стану трибосистеми. Це охоплює вимірювання та аналіз таких характеристик, як коефіцієнт тертя, швидкість зношування матеріалів, температура контактних поверхонь, тиск та інші параметри, що можуть впливати на робочі елементи машин та механізмів. Визначення цих змін дозволяє оперативно реагувати на можливі проблеми та уникати аварій.

Вимірювання коефіцієнта тертя. Коефіцієнт тертя - це один із основних параметрів, що характеризують ступінь тертя між поверхнями в контакті. Визначення коефіцієнта тертя важливо для оцінки ефективності змащення, а також для передбачення зносу та робочих властивостей системи. Вимірювання коефіцієнта тертя може здійснюватися за допомогою спеціальних трибометрів та інших вимірювальних пристроїв.

Визначення швидкості зношування матеріалів. Ця задача включає в себе вимірювання втрати матеріалу та вивчення динаміки зносу в часі. Важливо визначити домінуючі чинники, які впливають на швидкість зношування та як можна попередити або зменшити цей процес.

Вимірювання температури контактних поверхонь. Температура контактних поверхонь відіграє важливу роль у трибологічних системах. Збільшення температури може вказувати на надмірне тертя та може спричинити захоплювання контактних поверхонь та заїдання.

Визначення тиску у зоні контакту. Тиск, який діє в зоні контакту між поверхнями, є ще одним важливим параметром для визначення стану трибосистеми. Зміни в тиску можуть впливати на тертя, знос, а також на температуру. Вимірювання тиску допомагає краще розуміти динаміку процесів, що відбуваються в зоні контакту.

Вплив змащування на трибологічні характеристики. Змащуванню належить важлива роль у зниженні тертя та зносу між контактними поверхнями в трибосистемі. Моніторинг змащування включає в себе вимірювання рівня та якості мастильного матеріалу, вивчення його реологічних властивостей, а також аналіз впливу різних видів мастильних на

тертя та знос.

Вибір матеріалів для контактних поверхонь трибосистеми є важливим завданням. Моніторинг включає в себе вивчення властивостей матеріалів, які застосовуються для агрегатів АНТ, їх стійкість, наприклад, до корозійно-агресивних середовищ, стійкість до абразивного зношування. Дослідження різних матеріалів та їх властивостей допомагає підібрати оптимальний матеріал для конкретного механізму та умов роботи.

Вплив умов роботи на трибологічні характеристики. Умови роботи, такі як швидкість, температура, вологість та інші фактори, можуть впливати на трибологічні параметри. Моніторинг умов роботи включає в себе вимірювання та аналіз цих параметрів для визначення їх впливу на трибологічні характеристики системи. Зміни в умовах можуть вимагати адаптації системи або вибору спеціальних матеріалів та змащування.

Моніторинг впливу різних трибологічних факторів є ключовим аспектом трибомоніторингу, оскільки дозволяє краще розуміти та керувати процесами, які впливають на трибологічні параметри системи. Ця задача важлива для оптимізації роботи технічних систем та підвищення їхньої надійності.

На основі трибомоніторингу можливо проводити прогнозування зносу та руйнування технічних систем. Це дозволяє розробляти графіки ТО, збереження та своєчасного ремонту обладнання. При вчасному виявленні ознак зносу можливо планувати запобіжні заходи та запобігти аваріям.

Для прогнозування зносу та руйнування трибосистем часто розробляються математичні моделі, які враховують різні фактори, такі як навантаження, швидкість, матеріали, умови роботи тощо. Ці моделі допомагають розраховувати очікуваний час або оцінювати граничне значення параметру до виникнення проблеми і вживати запобіжні заходи вчасно.

В роботі [18] представлено метод шумо-акустичного контролю при проведенні діагностування підшипників кочення маточин коліс автомобілів.

Запропонований метод контролю надає можливість перевірити ефективність обраного мастила, тим самим підвищити ресурс і працездатність підшипників. За допомогою акустичних датчиків і комп'ютерної техніки аудіофайли записувалися за допомогою відповідного програмного забезпечення; після випробувань відбувалась заміна підшипників та мастила. Далі був застосований черговий пуск установки з підшипниками, в якому використовувалися мастила Lubricant№158, ЛІТОЛ-24 і ЦИАТИМ-201 (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Результати величини звукових коливань підшипників залежно від частоти обертання

години роботи		100	200	300	400	500	600	800	1000
число обертів підшипника, 10 ⁶		6	12	18	24	30	36	48	60
Величина звукових коливань, дБ	Lubricant№158	47.2	47.2	48.1	50.5	56.4	61.3	70.4	75.1
		47.5	47.3	48.3	50.4	56.6	61.7	70.5	75.2
		47.3	47.5	48.6	50.9	56.4	61.2	70.3	75.5
	ЛІТОЛ-24	45.3	46.4	49.4	55.3	61.1	69.6	77.7	78.3
		45.5	46.1	49.7	55.7	61.2	69.2	77.4	78.6
		45.4	46.3	49.5	55.8	61.5	69.4	77.9	78.4
	ЦИАТИМ-201	42.3	50.4	56.2	64.6	68.3	74.3	78.4	80.3
		42.5	49.5	56.7	64.5	68.6	74.4	78.8	80.4
		42.6	49.8	56.3	64.2	68.4	74.5	78.4	80.5

Дефекти виготовлення та експлуатації підшипників по-різному впливають на сигнал вібрації і мають різні діагностичні ознаки. Це дозволяє виявляти дефекти на стадії їх виникнення і прогнозувати подальший розвиток. До виробничих дефектів відносяться: прогин форми при виготовленні тіл кочення, розбалансовані кільця, ексцентриситет, радіальні зазори, порушення шорсткості поверхні кочення. До дефектів монтажу відносяться: дефекти посадки підшипників у гнізді, сильний опір, неправильне центрування. Основними причинами порушення роботоздатного стану підшипника є: несправність мастила (40%); порушення монтажу (30%); інші причини (20%); знос (10%) [19]. Однією з ключових задач в прогнозуванні руйнування є визначення причин, що призводять до

нього. Це включає в себе аналіз факторів, таких як надмірне навантаження, неправильне змащування, невідповідність матеріалів тощо. Визначення причин руйнування допомагає розробляти стратегії для їх попередження.

На основі експериментальних даних обрано найбільш значимі чинники, які впливають на підвищення шуму та знос підшипників під час експлуатації [18]: N – число обертів підшипника; G – навантаження; ρ – число пенетрації мастила (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Кодування факторів для переведення натуральних значень в безрозмірні величини.

ФАКТОР	кодування факторів	$x_i^* = -1.68$	$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = 1$	$x_i^* = 1.68$
$N, 10^6 \text{ rev}$	x_1	5	15	30	45	55
$G, 10^3 \text{ Н}$	x_2	4.5	5.5	7	8.5	9.5
$\rho, \text{ mm}^{-1}$	x_3	235	250	270	290	305

Математична модель оцінки рівня величини звукових коливань в натуральних величинах представлена наступними залежностями:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \frac{N-30}{15} = 0.067 \cdot N - 2; \\ \tilde{x}_2 &= \frac{G-7}{1.5} = 0.67 \cdot G - 4.67; \\ \tilde{x}_3 &= \frac{\rho-270}{20} = 0.05 \cdot \rho - 13.5. \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} \partial B &= 33.15 - 0.381 \cdot N - 6.92 \cdot G + 0.3 \cdot \rho + 0.067 \cdot N \cdot G + 0.00084 \cdot N \cdot \rho + 0.025 \cdot G \cdot \rho + \\ &+ 0.007 \cdot N^2 + 0.063 \cdot G^2 - 0.001 \cdot \rho^2. \end{aligned}$$

Розроблена авторами математична модель спрямована на визначення ступеню зношування підшипників кочення та дозволяє прогнозувати їх можливий ресурс роботи на підставі отриманих шумо-акустичних параметрів [18]. Запропонована методика дає можливість оцінити ресурс підшипника після певного часу роботи, а також оцінити ефективність використовуваного в ньому мастила.

Наведений діагностичний метод акустичного неруйнівного контролю

широко застосовується для прогнозування зносу і руйнування. Аналогічно використовуються і інші діагностичні методи, такі як вібраційний аналіз, термографія, магнітні методи та інші, що дозволяють отримувати інформацію про стан трибосистеми та вчасно виявляти відхилення від норми.

Всі вимірювання та аналізи параметрів стану трибосистеми допомагають оперативно виявляти можливі проблеми, визначати ефективність змащування, вдосконалювати конструкцію елементів, і в цілому підвищувати продуктивність та надійність механічних систем. Таким чином, визначення змін в параметрах стану є однією з головних задач трибомоніторингу для підтримання оптимального функціонування системи та запобігання аваріям.

Висновки до розділу 1.

1. Мастильні матеріали відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та надійності механічного обладнання. Їх вплив на зменшення тертя, захист від корозії та зносу, а також підвищення терміну служби має вирішальне значення для оптимального функціонування технічних систем. Зазначено, що для досягнення високої якості мастильного матеріалу є його правильний вибір та взаємодія з матеріалами певного вузла тертя на етапі проектування. Програми надійності мастильних матеріалів вимагають ефективного управління, охоплюючи аспекти вибору, кількості, терміну експлуатації та заміни, а також умов експлуатації. Зазначено, що мастильні матеріали є ключовим елементом в індустрії та машинобудуванні, особливо в контексті застосування підшипників у різних галузях, від авіації до вертольотів та стартер-генераторів. Виголошено, що ефективність використання мастильних матеріалів визначається їх роллю у підтриманні безперебійної роботи та продовженні терміну служби рухомих деталей, сприяючи загальному підвищенню продуктивності та надійності механічних систем.

2. Проаналізовано, що в авіаційній промисловості вибір

високоєфективних мастильних матеріалів має визначальне значення для тривалої та безперебійної роботи компонентів літака. Зазначено, що умови, з якими стикаються ці компоненти, включають високі температури, тиски, ударні коливання та навантаження, що може створити критичні умови роботи для мастильних матеріалів, які спричинюють його окислення та спрацьовування присадок. Використання авіаційних мастильних матеріалів, які вміщують поліфункціональні присадки та попередньо проходять контроль якості та лабораторні або стендові випробування в екстремальних умовах, може значно збільшити термін служби компонентів літака і зменшити витрати на їх ремонт та технічне обслуговування.

3. Надійність та безаварійна робота авіаційної техніки визначаються не лише виконанням регламентних робіт у встановлені терміни, але й постійним моніторингом її технічного стану. Практика показує, що адаптація термінів обслуговування на основі реальних умов експлуатації стає ключовим фактором для підтримання оптимального стану техніки. Важливою роллю в цьому процесі відіграє контроль мастильного матеріалу, який в процесі експлуатації накопичує забруднення, що може призвести до відмов технічних систем. Розробка комплексу методів безперервного моніторингу є важливим напрямком, спрямованим на забезпечення ефективності обслуговування та ремонту авіаційної техніки. Проаналізована роль мастильних матеріалів для реактивних двигунів у процесах теплообміну, зменшення тертя та захисту від корозії. Отже, їх якість та стан визначають тривалість служби компонентів, важливих для безперебійної експлуатації авіаційної техніки.

4. Проаналізовано значення трибомоніторингу для забезпечення ефективності та безпеки роботи механічних систем. Дослідження параметрів стану трибосистеми, таких як коефіцієнт тертя, швидкість зношування, температура контактних поверхонь та інші, дозволяє оперативно виявляти та вирішувати проблеми, що можуть призвести до аварій. Визначення швидкості зношування матеріалів та вимірювання температури контактних поверхонь допомагає ефективно керувати процесами та уникати негативних

наслідків. Результати вимірювань і аналізів параметрів стану трибосистеми впливають на ефективність змащення та конструкцію елементів, сприяючи підвищенню продуктивності та надійності механічних систем. Таким чином, трибомоніторинг визначається як важлива складова для підтримання оптимального функціонування технічних систем та попередження аварійних ситуацій.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Для АНТ та ПС важливо оцінювати їх стан під час роботи, щоб запобігти поломкам і дорогому ремонту. Ключовим аспектом є моніторинг стану мастильних матеріалів, які використовуються для змащування різних компонентів, таких як двигуни, трансмісії, коробки передач та багатьох інших важливих частин: якщо олива надто сильно погіршується або стає сильно забрудненою, вона може пошкодити різні компоненти. Тому контроль стану мастильних матеріалів набуває першочергового значення.

Проаналізуємо зміну фізико-хімічних показників оливи М-10ДМ по закінченню терміну експлуатації, на етапі заміни мастильного матеріалу. Моторна олива М-10ДМ рекомендована як для високофорсованих дизелів з турбонаддувом, так і для дизелів без наддуву; для дизелів як з повітряним так і з водяним охолодженням. Класифікація за SAE: SAE 30. Дана олива складається з сумішей дистильного і залишкового компонентів, що виробляються з сірчистих нафт, і пакету поліфункціональних присадок, що поліпшує антикорозійні і протизношувальні властивості оливок марки ДМ. Моторна олива забезпечує надійне змащування вітчизняної та імпоротної техніки (великовантажні самоскиди, трактори великої потужності з двигунами водяного або повітряного охолодження, екскаватори, бульдозери, автотранспортувачі, трубоукладачі) [20].

В роботі [21] представлено зміну основних властивостей моторної оливи М-10ДМ, які встановлено при заміні оливи. Такі показники, як кінематична в'язкість оливи, її індекс в'язкості, густина, лужне число, вміст механічних домішок, зольність, температури спалаху та температури застигання не відповідають встановленим вимогам щодо якості оливи (табл. 2.1).

Важливо встановити термін зміни показників оливи при експлуатації, оскільки деякі ряд параметрів суттєво впливає на ресурс двигуна.

Фізико-хімічні показники моторної мінеральної оливи для дизельних
двигунів

Показник	М-10ДМ		
	Вихідна олива	Відпрацьована олива	Вимоги до оливи
В'язкість:			
ν_{50} , мм ² /с	60,13	51,65	–
ν_{100} , мм ² /с	11,40	10,22	≥ 11,4
ν_{50}/ν_{100}	5,27	5,05	–
Індекс в'язкості	95	88	≥ 90
Температурний коефіцієнт в'язкості:			
ТКВ ₀₋₁₀₀	23,25	17,87	–
ТКВ ₂₀₋₁₀₀	6,27	8,71	–
Густина, кг/м ³	889	884	≤ 905
Кислотне число, мг КОН/г	1,30	2,71	–
Лужне число, мг КОН/г	8,83	0,35	≥ 8,2
Вміст води, %	сліди	0,14	сліди
Вміст механічних домішок, %	0,023	0,062	≤ 0,025
Коксивність, %	1,44	2,30	–
Зольність, %	0,713	0,940	≤ 1,5
Температура застигання, °С	–20	–19	≤ –18
Температура спалаху (у відкритому тиглі), °С	230	215	≥ 220

Наприклад, зменшення індексу в'язкості оливи може призвести до зменшення пускових властивостей оливи при низьких температурах, зменшення лужного числа обумовлює інтенсифікацію корозійно-механічного зношування та ін. Таким чином, результати аналізу фізичних та хімічних властивостей мастильних матеріалів допомагають інженерам вибирати мастила, які забезпечують оптимальне змащення двигунів. Це, в свою чергу, позитивно впливає на тривалість служби двигунів, зниження тертя, підвищення ефективності пального споживання та зменшення забруднення двигунів.

Аналіз існуючих методів контролю АНТ та ПС при експлуатації дозволив узагальнити та конкретизувати наступні напрямки оцінки якості об'єктів контролю:

- 1) контактні та гідродинамічні завдання для різних об'єктів (поверхні,

підшипники, шини, зубчасті колеса та ін.);

2) дослідження динаміки, характеру та параметрів дефектоутворення, зношування;

3) дослідження впливу якості (шорсткості) поверхні на умови тертя;

4) вивчення параметрів вібрації, шуму, акустичної емісії (АЕ) машин та механізмів;

5) тертя, зношування та змащення залежно від експлуатаційних умов;

6) дослідження впливу складу, структури матеріалів та покриттів на умови та режими тертя;

7) оцінка теплових процесів під час тертя;

8) вивчення експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів, спрацьовування присадок та добавок, накопичення продуктів зношування, старіння мастильних матеріалів;

9) випробування на зношування за різними схемами тертя;

10) несуча здатність мастильного шару, оцінка стану та ефективної товщини мастильного шару.

2.1. Класифікація методів трибомоніторингу авіаційної техніки.

Визначено найбільш ефективні сфери застосування методів трибомоніторингу, що охоплюють широке коло завдань.

Механічні методи ефективно використовуються в наступних областях: випробування матеріалів та виробів на тертя та знос; моделювання процесів тертя та зношування; діагностування підшипників кочення та ковзання; прогнозування довговічності підшипників кочення; оцінка триботехнічних властивостей пластичних мастильних матеріалів; оцінка технологічних властивостей змащувально-охолоджуючих рідин.

Теплові методи трибомоніторингу мають такі сфери застосування, як: визначення термічних властивостей мастильних матеріалів; встановлення моменту початку руйнування виробу; оцінка триботехнічних властивостей мастильних матеріалів; контроль та діагностування підшипників кочення,

зубчастих передач, гальмівних систем автотранспорту.

Кінематичні методи трибомоніторингу широко використовуються для оцінки радіальних та осьових навантажень, перекосів кілець підшипників кочення, зносу деталей трибосполучення, прогнозування стану та визначення кута контакту підшипників, оцінки розмірів локальних дефектів робочих поверхонь деталей трибосполучень.

Віброакустичні методи успішно застосовуються в областях: контролю та діагностування технічного стану підшипників та редукторів; прогнозування технічного стану підшипників кочення; оцінки якості конструкцій та процесів їх руйнування.

Методи фото- та спектрометрії використовуються при оцінці якості мастил з присадками та діагностуванні механізмів машин за станом мастильного матеріалу (при цьому аналізу піддаються проби відпрацьованих мастильних матеріалів) (рис. 2.1).

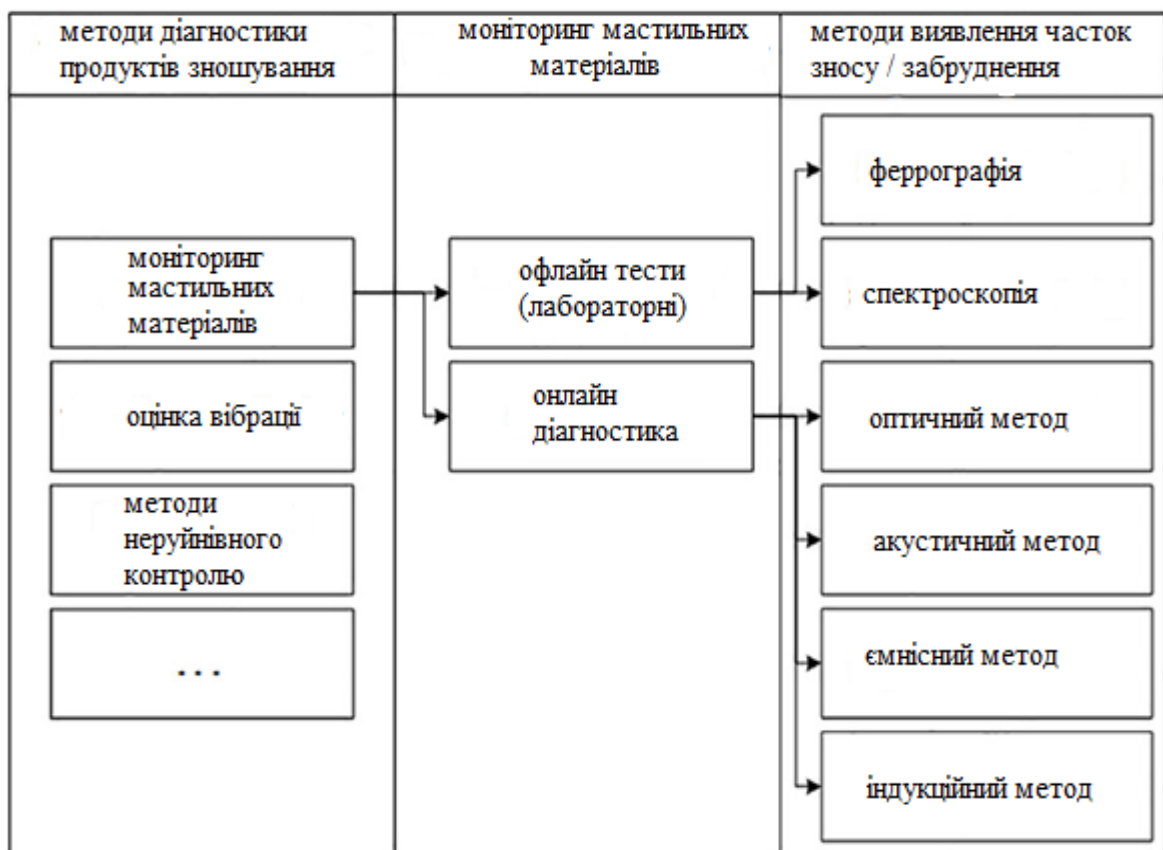


Рис. 2.1. Методи оцінки продуктів зносу та часток забруднення в мастильному матеріалі.

Електричні методи трибомоніторингу мають широку сферу застосування: контроль та діагностування підшипників та зубчастих передач; оцінка стану та ступеня забрудненості мастильних матеріалів; дефектоскопія, контроль та прогнозування швидкості розвитку локальних дефектів на поверхнях деталей виробів; випробування матеріалів на тертя та знос; створення інформаційно-вимірювальних систем для діагностування трибологічних об'єктів за комплексними діагностичними параметрами; оцінка та прогнозування ступеня зносу механізмів машин; оцінка триботехнічних властивостей багатошарових матеріалів.

Тенденції розвитку методів та засобів трибомоніторингу складаються в наступному:

- застосування нових діагностичних параметрів;
- розробка нових алгоритмів обробки вимірювальної інформації та алгоритмів діагностування, спрямованих на: виділення інформації про стан об'єкта контролю у виробі; роздільне діагностування поверхонь деталей об'єкта (інтегральна оцінка стану поверхні, пошук локальних дефектів; оцінка параметрів регулярних відхилень від правильної геометричної форми);
- вдосконалення методів випробувань мастильних матеріалів;
- удосконалення технічних засобів, націлене на розробку: стендового випробувального та контролюючого обладнання з розширеними функціональними можливостями та покращеними характеристиками; стаціонарних та бортових засобів контролю та діагностування; вимірювально-інформаційних та вимірювально-обчислювальних діагностичних комплексів;
- розробка комплексних методів моніторингу, діагностування та контролю, заснованих на спільному використанні різних діагностичних ознак та параметрів.

2.2. Інноваційні методики для оцінки якості авіаційних мастильних матеріалів.

Україна займає одне з провідних місць в світі по виробництву та удосконаленню конструкції авіаційних двигунів (АД). Зокрема, АТ «МОТОР СІЧ» являється одним з провідних підприємств у світі з випуску АД для літаків, вертольотів та промислових газотурбінних установок. Історія підприємства нараховує більше 100 років. На підприємстві випускають надійні АД та газотурбінні установки (рис. 2.2). Продукція підприємства експлуатується на літаках та вертольотах різного призначення більш ніж у 120 країнах світу.

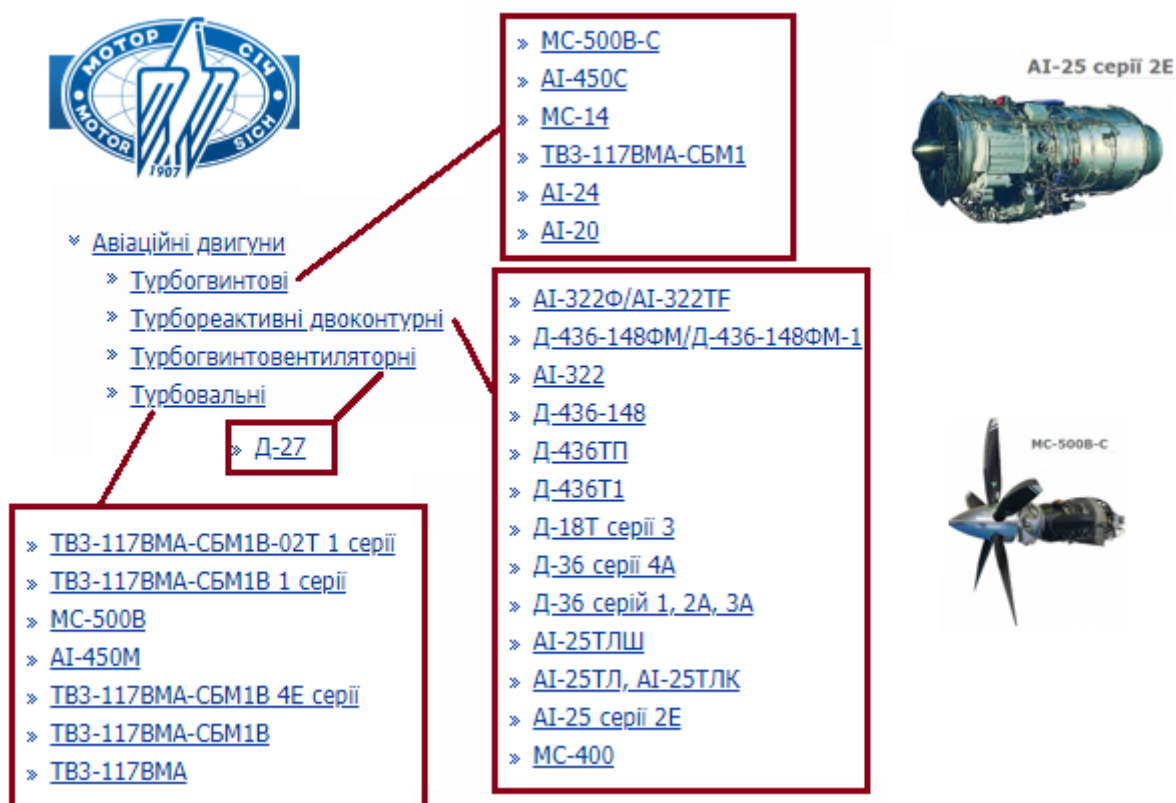


Рис. 2.2. Типи авіаційних двигунів АТ «МОТОР СІЧ».

Етап еволюції вітчизняного та світового авіадвигунобудування характеризується переосмисленням послідовності поколінь авіаційних двигунів (АД) та включає у себе формування інноваційних та унікальних інженерних рішень, застосування передових технологій, а також використання конструкційних матеріалів. Удосконалення сучасних АД

складним процесом, що базується на досягненнях різних галузей науки і техніки, включаючи хімотологію [22]. Сучасні авіаційні двигуни піддаються тепловому режиму експлуатації, характеризуються високим рівнем інтенсивності робочого процесу, працюють в умовах впливу високого навантаження та ін. При цьому кожне нове покоління АД ставить більш жорсткі вимоги до якості використовуваних авіаційних олив, необхідних для забезпечення надійної роботи, зокрема для маслосистем двигунів, підшипників опор роторів та інших вузлів. Зміни фізико-хімічних показників моторних олив можуть негативно впливати на роботу АД (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Вплив показників якості моторних олив на технічний стан авіаційних двигунів [23]

Показник оливи	Інші показники	Причини
Збільшення в'язкості на 3–4 сСт	Високий вміст нерозчинного осаду, різке зростання коксівності, потемніння та зменшення випаровуваності та відповідно дифузії на крапельному зразку	Незадовільні експлуатаційні властивості олив, збільшене проривання газів, неповне згорання палива (несправність паливної апаратури, закоксовування розпилювачів форсунок, забруднення повітряного фільтра), не працюють оливні фільтри
Збільшення вмісту води понад 0,3–0,5 %	Зменшення лужного числа, коксівності, зменшення нерозчинного осаду, зникнення зони дифузії та характерне згортання плями крапельного зразка	Витікання оливи; доливання оливи, обводненої під час зберігання; негерметичність теплообмінника
Істотне зниження температури спалаху	Зростання вмісту нерозчинного осаду та коксівності, наявність паливних фракцій у складі оливи	Витікання в паливній системі, незадовільне розпилювання палива

Одним із важливих факторів зменшення тертя і зносу сучасних АД є використання високоякісних олив із високим рівнем протизношувальних і антифрикційних властивостей, які дозволяють ефективно забезпечувати роботу двигунів при різних режимах змащування, таких як гідродинамічний, еластогідродинамічний та граничний. Для досягнення цього ефекту в

компонентні склади авіаційних олив вводять протизношувальні присадки на основі фосфору, передусім трикрезилфосфати, оскільки сполуки сірки в зазначених оливах при їх окисленні спричинюють утворення стійких граничних модифікованих шарів на поверхнях металу [24]. Також велике значення мають антифрикційні властивості олив, що сприяє зниженню витрат пального.

Методологічна база, як українська, так і міжнародна у сфері оцінювання фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей авіаційних олив, не враховують оцінку протизношувальних характеристик. Наприклад, олива для газотурбінних двигунів TURBINE OIL 2197, розроблена американською компанією EASTMAN, в сертифікаті відповідності характеризується наступними показниками:

- тип оливи: синтетична вуглеводнева;
- кінематична в'язкість, $\text{мм}^2/\text{с}$: при 100°C (212F) : 5,19; при 40°C (104F) : 26,44; при -40°C (40F) : 11 692;
- температура займання, $^\circ\text{C}$: 248°C ;
- температура застигання, $^\circ\text{C}$: -57°C ;
- втрати на випаровування, %: 6,5 годин при 204°C - 2,0;
- стійкість до корозії і окисленню: 72 години при 218°C - витримує.

Для мастильних матеріалів першочергове значення має оцінка триботехнічних характеристик. Відзначаються суттєві розходження в методологічних підходах та використаному випробувальному обладнанні в сегменті лабораторій щодо оцінки триботехнічних показників мастильних матеріалів. Зокрема, в українських нормативно-технічних документах протизношувальні характеристики авіаційних олив оцінюються за допомогою чотирикулькової машини тертя (ЧМТ) за ГОСТ 9490, при цьому антифрикційні властивості не враховуються.

Випробування проводять за двома показниками якості: критичним навантаженням (короткочасні однохвилинні випробування) і діаметром плями зносу (випробування протягом 60 хв) за осьового навантаження 196 Н

[25]. Принцип дії ЧМТ ґрунтується на обертанні під заданим навантаженням верхньої кульки відносно трьох нижніх кульок, нерухомо закріплених у чашці машини та занурених у випробувальну оливу. Фактично вузол тертя ЧМТ містить у собі піраміду, що складається з чотирьох сталевих кульок діаметром 12,7 мм, які контактують в одній точці. Принципову схему вузла тертя ЧМТ наведено на рис. 2.3.

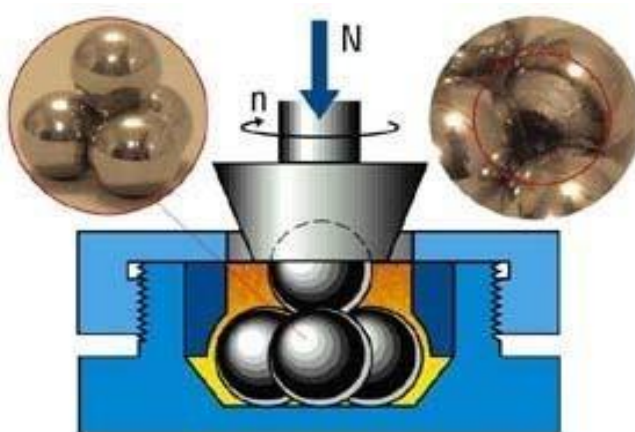


Рис. 2.3. Принципова схема вузла тертя чотирикулькової машини тертя.

Недоліками цієї схеми вузла тертя є методики вимірювання об'єму зносу верхнього і нижніх кульок ЧМТ і найчастіше розбіжність отриманих даних із результатами випробувань олив в умовах реальної експлуатації АД. Зазначений метод також не дає змоги отримувати інформацію про коефіцієнт тертя. Ці обставини спричиняють складнощі за необхідності достовірної та об'єктивної оцінки експлуатаційних властивостей олив на етапі їх застосування. При цьому за кордоном трибологічні характеристики олив оцінюють переважно на шестеренчастих стендах, а випробування на ЧМТ практично не входять до їхньої специфіки.

Зазначені методологічні відмінності обумовлені потребою впровадження більш сучасних та інтегрованих підходів до визначення фізико-хімічних та експлуатаційних характеристик авіаційних олив. Зокрема, можливе розширення методологічної бази експериментів за участю комплексу аналітичних та трибологічних методів досліджень. Це сприятиме більш повному врахуванню впливу мастильних матеріалів на робочий процес

авіаційних двигунів та дозволить надавати об'єктивні та достовірні відомості для подальших розробок у галузі авіаційних технологій.

На основі викладеного виникає необхідність розширення методологічного підходу до оцінювання якості авіаційних олив, зокрема, за експлуатаційними характеристиками, такими як протизношувальні та антифрикційні властивості. Важливо провести нові дослідження основних експлуатаційних параметрів за режимами, що наближені до реальних умов експлуатації, з урахуванням високого ступеня збіжності лабораторних і стендових результатів випробувань. У роботі [26] вказано, що дослідження авіаційних олив на трибометрі SRV вимагає використання геометрії контакту, що відповідає трибометру, а не точковому підходу.

Слід відзначити, що випробування авіаційних олив на трибометрах типу SRV, доповнюючи методику оцінювання експлуатаційних властивостей на чотирикульковій машині тертя, надають можливість отримувати більш об'єктивну оцінку рівня їхніх трибологічних характеристик. В якості пристрою для оцінки цих характеристик використовується вібротрибометр UMT-3, обладнаний термокамерою для забезпечення постійного нагріву пари тертя і випробовуваних мастильних матеріалів до визначеної температури (від 0 до 150 °C). У вузлі тертя вібротрибометра кулька діаметром 12,7 мм залишається нерухомою, виконуючи роль нерухомого елемента, тоді як пластина виконує зворотно-поступальний рух відносно притиснутої до неї кульки. На рис. 2.4 подано принципову схему вузла тертя вібротрибометра.

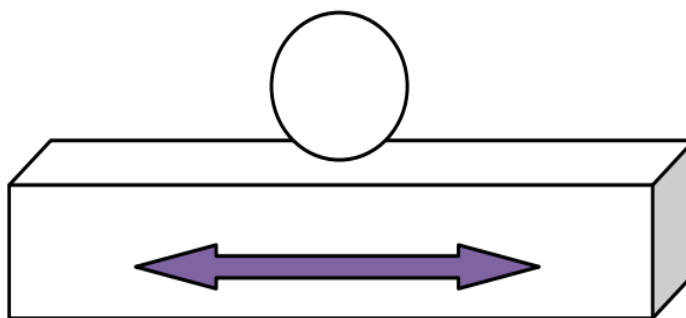


Рис. 2.4. Принципова схема вузла тертя вібротрибометра UMT-3 [26].

Дослідження дозволяють визначати трибологічні властивості ММ при різних швидкостях ковзання, від 0,01 до 0,3 м/с, та нормальних навантаженнях від 2 до 2000 Н, враховуючи частоту осциляції.

Отримані результати досліджень на можуть служити основою для подальших вдосконалень методів та стандартів оцінювання експлуатаційних характеристик авіаційних олив. Додатково, враховуючи важливість збіжності лабораторних та стендових експериментів, можна розглядати використання таких підходів і в інших областях нафтової промисловості та авіаційних технологій. Висновки та деталі цих досліджень можуть бути використані для покращення технічних та експлуатаційних властивостей авіаційних олив, що, в свою чергу, сприятиме подальшому розвитку авіаційних двигунів та підвищенню ефективності їх експлуатації.

У рамках безперервного процесу досліджень та розробок у галузі трибологічних вимірювальних приладів, найбільш важливими є міжнародні стандарти ASTM G99 та ASTM G133. Наприклад, стандарт ASTM G99 охоплює лабораторну процедуру визначення зношування матеріалів під час ковзання з використанням пристрою типу «штифт на диску». Матеріали тестуються парами у номінально неагресивних умовах. В стандарті описано основні напрямки експериментального розгляду під час використання даного типу приладів для вимірювання зносу. Також можна визначити коефіцієнт тертя. Оскільки метод випробування штифта на диску не намагається відтворити всі умови, які можуть виникнути при експлуатації (наприклад, мастило, навантаження, тиск, геометрія контакту, видалення залишків зносу та наявність агресивних середовищ), немає гарантії, що випробування передбачатиме швидкість зносу конкретного матеріалу в умовах, відмінних умов випробування.

Завдяки унікальній конструкції двох датчиків сили тертя та симетричній пружній фіксації вимірюваного зразка, трибометр типу штифт-диск TRB³ компанії Anton Paar широко використовується для досліджень [27]. Широкий діапазон параметрів тестування, геометрії контактів та

додаткових опцій дозволяє користувачам проводити трибологічні випробування, моделюючи всі умови експлуатації, такі як різні режими руху (лінійне, зворотно-поступальне), режими контакту, швидкість, змащування, матеріали, високі температури, вологість та ін. (рис. 2.5).

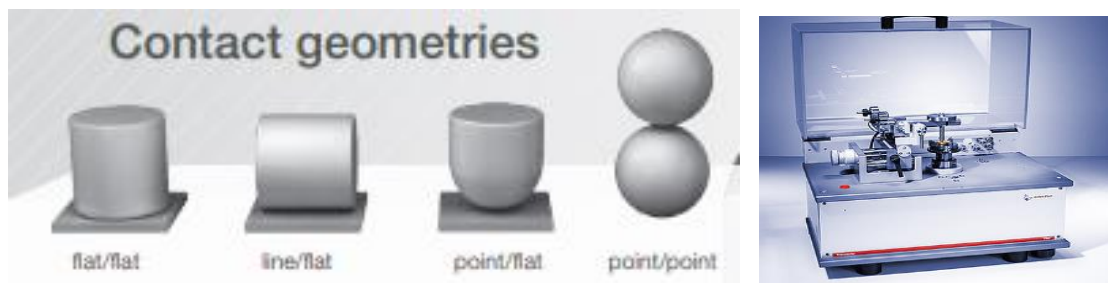


Рис. 2.5. Геометрія контакту пар тертя на трибометрі TRB.

До основних можливостей даного устаткування можна віднести:

- діапазон нормального зусилля – до 60Н;
- діапазон сили тертя – до 20Н;
- швидкість обертання – до 2000 об/хв;
- максимальний крутний момент – 450 мН·м;
- вимірювання зносу – від -2 мм до 2 мм;
- можливість нагріву до 450 °С.

Застосування трибометрів дозволить більш якісно оцінити експлуатаційні властивості ММ, надати рекомендації щодо початкового вибору ММ для вузла тертя та оцінити зміни експлуатаційних параметрів ММ в періоди ТО авіаційної та наземної техніки.

В процесі експлуатації ММ забруднюється продуктами зношування та окислення, водою та іншими речовинами.

2.3. Методи оцінки фізико-хімічних показників мастильних матеріалів.

Протягом ряду років аналіз ММ був широко прийнятий як одна з основних процедур профілактичного ТО, в першу чергу, орієнтованих на визначення оптимальної точки заміни мастил і олив. У порівнянні з методами

контролю працездатності АНТ, заснованими, наприклад, на вібрації, моніторинг стану ММ забезпечує приблизно в 10 разів більш ранні терміни попередження про несправність обладнання. Його мета полягає в тому, щоб за допомогою відстеження процесу розкладання компонентів ММ забезпечити раннє попередження про несправність техніки, а також збільшити тривалість роботи ММ, скорочуючи частоту його заміни і, отже, знизити витрати на технічне обслуговування. У ході моніторингу стану ММ, по-перше, визначається, чи не знизились показники ММ до такого ступеня, що воно більше не може виконувати свою захисну функцію. По-друге, визначається рівень його забруднення та необхідність його очищення чи заміни. На рис. 2.6 наведена схема забезпечення якості ММ в процесі їх виготовлення.

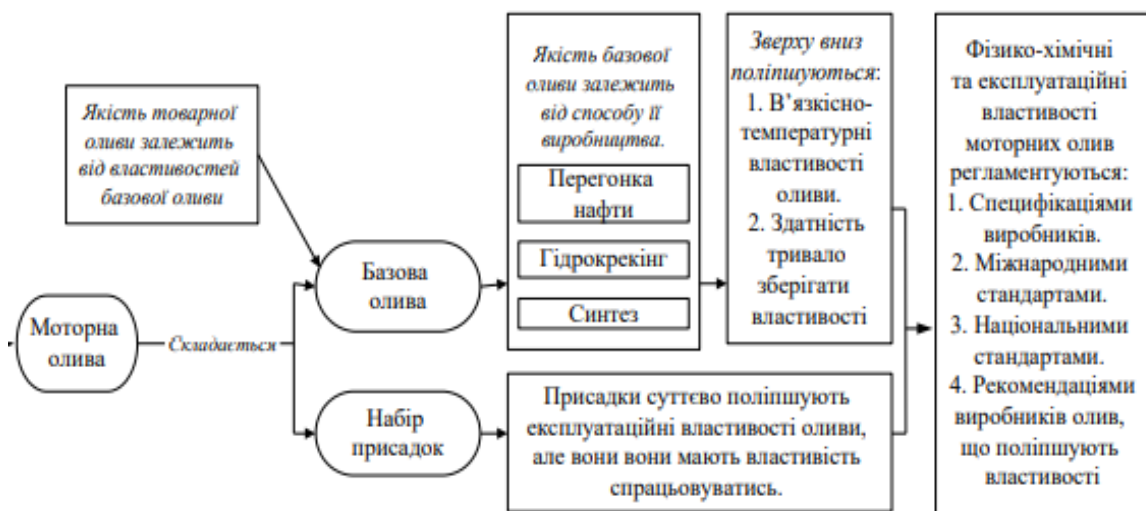


Рис. 2.6. Механізм забезпечення якості оливо з поліфункціональними присадками.

До загальних показників та стандартів для ПММ можна віднести: температура краплепадіння (ГОСТ 6793, ГОСТ 19832, ГОСТ 7171); анілінова точка та масова частка ароматичних вуглеводів (ГОСТ 12329); вміст фосфору (ГОСТ 9827, ASTM D 6481, ASTM D 6443, ASTM D 4927); температура помутніння (ГОСТ 5066, ДСТУ ISO 3015); індекс в'язкості, розрахунок

(ДСТУ ГОСТ 25371); вміст водорозчинних кислот та лугів (ГОСТ 6307); в'язкість динамічна (ГОСТ 1929); кислотне число (ГОСТ 11362, ASTM D 974); коефіцієнт фільтруємості (ГОСТ 19006); коксівність (ГОСТ 19932, ГОСТ 14298); колір (ГОСТ 20284, ГОСТ 3134, ГОСТ 1012, НД на продукт) та ін.

В процесі експлуатації небезпечним для ММ є спрацьовування присадок, окислення, поява домішок, води та ін. Тому необхідно вчасно, швидко та якісно оцінити стан ММ при ТО.

Впровадження різних портативних приладів мінілабораторій серії Minilab (Spectrosci, США) в європейських країнах, дозволило проводити моніторинг ММ безпосередньо на місці роботи агрегатів, своєчасно розпізнати ознаки відмови, яка може проявитися, і швидко їх усувати. Основною перевагою портативних мінілабораторій серії Minilab є можливість більш раннього попередження, від кількох годин до кількох днів, тому що не потрібен час на транспортування зразків ММ до лабораторії та очікування відповіді, що зменшує кількість поломок.

Прилади мінілабораторій серії Minilab дозволяють виконувати контроль не одного, а кількох параметрів робочих характеристик ММ. Наприклад, інфрачервоний ІЧ-аналізатор FluidScan 1100 (Spectrosci, США), що входить у всі типи даних мінілабораторій, дозволяє ефективно визначати вміст таких забруднювачів, як вода та гліколь, а також стежити за деградацією ММ шляхом вимірювання окислення, загального кислотного/лужного числа. З іншого боку, віскозиметр серії 3000, даючи тільки значення кінематичної в'язкості, тим не менш, також допомагає оцінити окислення ММ, забруднення його водою, частинками та деякі інші зміни властивостей, оскільки всі вони впливають на в'язкість олив. Саме тому в'язкість вважається об'єктивним показником для виявлення розкладання ММ, і для всіх рідких ММ насамперед слід виконувати саме контроль та моніторинг зміни в'язкості.

У лінійці мінілабораторій серії Minilab пропонується також лічильник

частинок серії LNF, який не тільки дозволить визначити код чистоти ММ за ISO 4406, а й класифікує їх за типом зносу (різання, втома та ін), а також визначить наявність і кількість частинок зносу, що намагнічуються. Наприклад, елементний аналізатор SpectrOil 120C (Spectrosci, США) надасть інформацію при діагностуванні проби ММ про тип наявних забруднень та елементному складі присутніх у ММ частинок (рис. 2.7). Аналізатору потрібна мінімальна кількість проби та часу, щоб дати відомості про наявність різних частинок зносу та забруднення ММ, що може запобігти аварійній ситуації.



Рис. 2.7. Елементний аналізатор SpectrOil 120C.

Використання калібрування для лабораторного обладнання дозволяє визначити 24 елементи та оцінити: зовнішні забруднення, ступінь зношування та залишковий ресурс присадок в ММ.

Вимірювані параметри:

- Елементний склад алюмінію (Al); барію (Ba); бору (B); ванадію (V); заліза (Fe); кадмію (Cd); калію (K); кальцію (Ca); кремнію (Si); літію (Li); магнію (Mg); марганцю (Mn); міді (Cu); молібдену (Mo); натрію (Na); нікелю (Ni); олова (Sn); свинцю (Pb); срібла (Ag); сурми (Sb); титану (Ti); фосфору (P); хрому (Cr); цинку (Zn);
- Одиниця виміру ppm (мг/кг);
- Стандарт ASTM D6595 – 17.

Хоча багато аспектів експлуатаційних мастильних матеріалів необхідно

контролювати, вміст металу надає повноцінну інформацію про стан агрегату та самої оливи, щоб допомогти визначити роботоздатний стан техніки та передбачити час заміни оливи.

Висновки до 2 розділу

1. Методи трибомоніторингу широко застосовуються в різних галузях. Механічні методи ефективно використовуються для випробувань матеріалів, моделювання тертя та зносу, а також для діагностики та прогнозування довговічності підшипників та оцінки властивостей мастильних матеріалів. Теплові методи застосовуються для визначення термічних властивостей та контролю підшипників і передач. Кінематичні методи широко використовуються для визначення навантажень та прогнозування стану трибосполучень. Віброакустичні методи успішно використовуються для контролю технічного стану підшипників та редукторів. Методи фото- та спектрометрії використовуються для оцінки якості мастил та діагностики механізмів за станом мастильного матеріалу. Загалом, ці методи сприяють покращенню ефективності технічного обслуговування та прогнозуванню робочого стану машин та обладнання.

2. Етап еволюції авіадвигунобудування характеризується необхідністю вдосконалення сучасних авіаційних двигунів, що вимагає використання високоякісних олив. Ці оливи мають високий рівень протизношувальних і антифрикційних властивостей, щоб забезпечити ефективну роботу двигунів при різних режимах змащування. Дослідження проводяться за допомогою трибометрів, таких як SRV, які дозволяють об'єктивно оцінювати трибологічні характеристики олив за реальних умов експлуатації. При цьому важливо враховувати геометрію контакту та використовувати інтегровані підходи до визначення фізико-хімічних та експлуатаційних характеристик. Розширення методології оцінювання якості авіаційних олив та вдосконалення досліджень за новими параметрами дозволить надавати більш повні та достовірні відомості для покращення авіаційних технологій.

3. Розглянуті методи моніторингу стану мастильних матеріалів в АНТ виявляються дуже перспективними та ефективними з точки зору попередження несправностей і продовження терміну служби обладнання. Протягом останніх років аналіз ММ набув широкого застосування як основний інструмент профілактичного технічного обслуговування, спрямованого на визначення оптимального моменту для заміни мастил і олів. Порівняно з іншими методами, такими як вібраційний контроль, моніторинг стану ММ надає можливість приблизно на 10 разів раніше виявляти ознаки несправностей обладнання. Основна мета цього підходу - відстеження процесу розкладання компонентів ММ для раннього виявлення несправностей та підвищення тривалості їх служби. За допомогою моніторингу визначається, чи не знизилась властивості ММ до того рівня, коли воно вже не може ефективно виконувати свою захисну функцію. Також враховується рівень забруднення та необхідність очищення чи заміни.

4. Портативні мінілабораторії дозволяють визначати різноманітні параметри робочих характеристик ММ, забезпечуючи комплексний контроль. Наприклад, інфрачервоний аналізатор FluidScan 1100 ефективно визначає вміст води та гліколю, а також відслідковує деградацію ММ за допомогою вимірювань окислення та загального кислотного/лужного числа. Віскозиметр серії 3000, хоча вимірює лише кінематичну в'язкість, також допомагає оцінити окислення ММ, забруднення водою та частинками, оскільки ці чинники впливають на в'язкість олів. Важливим елементом моніторингу є лічильник частинок серії LNF, який класифікує чистоту ММ за ISO 4406 та визначає наявність частинок зносу та їх тип. Всі ці засоби дозволяють ефективно контролювати та вчасно реагувати на зміни властивостей та стану мастильних матеріалів, забезпечуючи високий рівень надійності і продуктивності автотранспортного обладнання.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У ДЕРЖАВНІЙ АВІАЦІЇ УКРАЇНИ

3.1. Впровадження ефективних стратегій контролю для забезпечення якості мастильних матеріалів в авіаційній галузі.

Згідно «Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України» лабораторні дослідження якості мастильних матеріалів здійснюють відповідні центри в межах їх повноважень (рис. 3.1) [28].

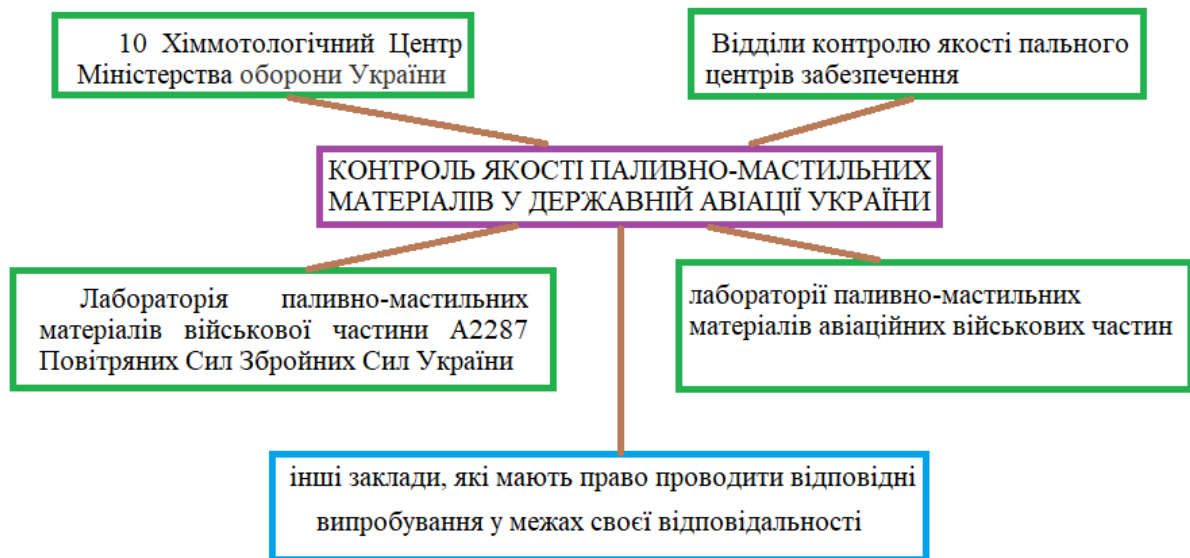


Рис. 3.1. Центри контролю якості паливно-мастильних матеріалів у державній авіації України.

Оцінка якості ПММ включає наступний контроль: приймально-здавальні, контрольні, повні та арбітражні випробування:

- Приймально-здавальне випробування проводять під час приймання ПММ залізничними цистернами (вагонами, автомобільним транспортом) до зливання і під час відвантаження - до відправлення.

- Контрольне випробування проводять після зливу ПММ з транспортних засобів; перевіряють ПММ, які знаходяться в резервуарах і

тарі; контролюють ПММ після їх перекачування по трубопроводах, при проведенні сезонних і регламентних робіт на ПС.

– Повне випробування проводять перед підготовкою ПММ до довгострокового зберігання; після закінчення строків зберігання в ємностях ПС та АНТ; після відновлення якості ПММ; під час розслідування причин відмови ПС та АНТ; в інших випадках, коли необхідно встановити фактичну якість ПММ.

– Арбітражне випробування проводять у разі виникнення розбіжності в оцінці їх якості лабораторіями в державній авіації або лабораторіями ПММ відправника та отримувача.

При зазначених випробуваннях (крім арбітражного) забороняється скорочувати перелік обов'язкових показників якості ПММ, які зазначені в сертифікаті якості мастильних матеріалів. Якщо акредитована лабораторія не в змозі виконати оцінку всіх зазначених фізико-хімічних показників якості, вона повинна залучити іншу лабораторію. У супроводжувальному листі обов'язково вказуються показники якості, які необхідно визначити, та строк надання результатів.

Всі ПММ, які направляються на потреби до авіаційних частин, надходять із паспортами якості, які мають містити наступну інформацію: показники якості ПММ, вказані в паспорті, номери транспорту і цистерни (вагона, автомобіля), якими прибули ПММ, в який резервуар їх зливо або в яке сховище розміщено. Під час надходження ПММ з паспортом якості від замовника їх якість повинна відповідати вимогам стандарту на ПММ за всіма показниками.

ПММ для державної авіації України переважно перевіряються в 10-му Хіммотологічному центрі. В Вінницькій області є потужна лабораторія контролю якості пального та мастильних матеріалів [29].

Дана лабораторія проводить випробування ПММ відповідно до вимог нормативних документів на нафтопродукти (ГОСТ, ДСТУ, ТУ тощо). В

лабораторії є обладнання для проведення оцінки якості ПММ в стаціонарних та польових умовах (пересувна лабораторія).

Пересувна лабораторія ПЛХ-3М обладнана системами водопостачання, опалення та вентиляції, в ній встановлено електрообладнання, лабораторні меблі, обладнання, прилади, посуд та реактиви. Причіп ПЛГ-3М обладнаний місцями для зберігання робочої документації, проживання та відпочинку персоналу. Бензоелектричний агрегат потужністю 8 кВт встановлено в окремому відсіку причепа. Встановлені у лабораторії ПЛГ-3М необхідні автономні системи життєзабезпечення (електрика, опалення, водопостачання) дозволяють виконувати поставлені завдання у відриві від стаціонарних систем життєзабезпечення. Нормативний час розгортання лабораторії – 30 хв. Лабораторія ПЛХ-3М здатна проводити 7-9 повних ПММ-тестів на добу.

Завдяки мобільній лабораторії перевірити якість палива можна у будь-якій точці України. Окрім перевірок організації контролю якості палива безпосередньо у військових частинах, пересувні лабораторії неодноразово забезпечували проведення польотів військової авіації на військових та цивільних аеродромах, виконуючи функції стаціонарної лабораторії авіаційної частини.

Розглянемо алгоритм перевірки мастильних матеріалів (суміші оливо), які рекомендовані для експлуатації двигунів і редукторів ПС, які утворюються в пропорції:

– маслосуміш СМ-11,5 – 75 % оливи МС-20 (МС-20С, МК-22, TURBONYCOIL TN-308) та 25 % оливи МС-8п (МС-8рк, МС-8, МК-8, TURBONYCOIL TN-321);

– маслосуміш СМ-4,5 – 75 % оливи МС-8п (МС-8рк, МС-8, МК-8, TURBONYCOIL TN-321) і 25 % оливи МС-20 (МС-20С, МК-22, TURBONYCOIL TN-308);

– маслосуміш СМ-8 – 50 % оливи МС-20 (МС-20С, МК-22, TURBONYCOIL TN-308) і 50 % оливи МС-8п (МС-8рк, МС-8, МК-8,

TURBONYCOIL TN-321);

– маслосуміш СМ-9 – 67 % оливи ТС-гіп і 33 % гідравлічної рідини АМГ-10 (FH-15, FH-51).

Проаналізуємо алгоритм перевірки маслосуміші СМ-9, яка забезпечує надійні експлуатаційні характеристики у складних зимових умовах та характеризується низькою температурою застигання. Маслосуміш СМ-9 рекомендована для змащування редукторів хвостової трансмісії вертольотів МІ-6 та МІ-8. Технічні показники даного типу мастильного матеріалу від двох виробників зазначені в табл. 3.1, 3.2.

Таблиця 3.1

Фізико-хімічні та триботехнічні показники маслосуміші СМ-9
(виробник: НВК МАСПРОМ)

Найменування показника	Норма
Кінематична в'язкість, мм ² /с при температурі 100°С	9-11
Температура спалаху в відкритому тиглі, °С, не нижче	120
Температура застигання, °С, не вище	-40
Кислотне число, мг КОН/г, не більше	1,0
Вміст водорозчинних кислот, лугів та механічних домішок	відсутність
Коксованість, %, не більше	—
Трибологічні характеристики на ЧКМТ при (20±5)°С:	
Критичне навантаження, Н(кгс)	не менше 765 (75)
показник зносу, мм, (Дз)	не більше 0,68
Навантаження зварювання, (Рс0, Н(кгс)	не менше 3283 (335)
індекс задиру (Із), Н(кгс)	не менше 569 (58,1)

Таблиця 3.2

Паспорт якості на (виробник: Спецсервіс Україна)

Найменування показника	Норма
Кінематична в'язкість, мм ² /с при температурі 100°С, не менше	11,0
Кислотне число, мг КОН/г, не більше	3,5
Температура, °С спалаху в закритому тиглі, не нижче	140
Температура, °С застигання, не вище	-45

В зазначених паспортах якості є суттєві розбіжності, зокрема за такими параметрами як кислотне число та температура спалаху. Слід зазначити, що виробник Спецсервіс Україна не вказує триботехнічні параметри маслосуміші.

В «Інструкції з контролю якості паливно-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України» зазначено, що оливи МС-20 (МС-20С, TURBONACOIL TH-308), МС-8п (МК-8рк, МС-8, МК- 8, TURBONACOIL TH-321) та суміші на їх основі, що виробили менше 50% встановленого ресурсу, при усуненні експлуатаційних дефектів під час ТО заливають у чисту тару і, після проведення всіх етапів ТО, ремонтних та відновлювальних робіт, їх знову заливають у систему за допомогою спеціальних заправних засобів типу МЗ-66, АМЗ-53МУ. При цьому з оливок необхідно злити осад. Мастильні матеріали, що виробили на ПС більше 75% ресурсу і злиті через виявлення нефільтрованих домішок, вважаються відпрацьованими.

При цьому в даній інструкції не зазначено чи необхідно проводити контроль якості мастильних матеріалів під час ТО. Адже не враховується імовірність спрацьовування присадок, перевірка на ступінь окислення мастильного матеріалу. Важливою умовою надійності мастильного матеріалу є його високі експлуатаційні показники. Насамперед, це триботехнічні параметри мастильного матеріалу, до яких відносяться змащувальні, антифрикційні та протизношувальні властивості. Перевірка мастильного матеріалу як товарних партій, так і під час експлуатації надасть можливість більш якісно проводити вибір мастильного матеріалу для певного агрегату ПС та АНТ. Залучення провідних фахівців та триботехнічного обладнання лабораторій Національної академії наук України та закладів вищої освіти до перевірки якості мастильних матеріалів за експлуатаційними показниками забезпечить більш якісний вибір ПММ як на стадії вибору продукції, так і під час експлуатації.

В даній кваліфікаційній роботі запропоновано програма моніторингу

оцінки якості мастильних матеріалів авіаційного призначення за триботехнічними показниками, яка надає змогу оцінити як експлуатаційні показники мастильного матеріалу, так і його вплив на матеріал контактних поверхонь під час лабораторних та стендових випробувань (рис. 3.2).

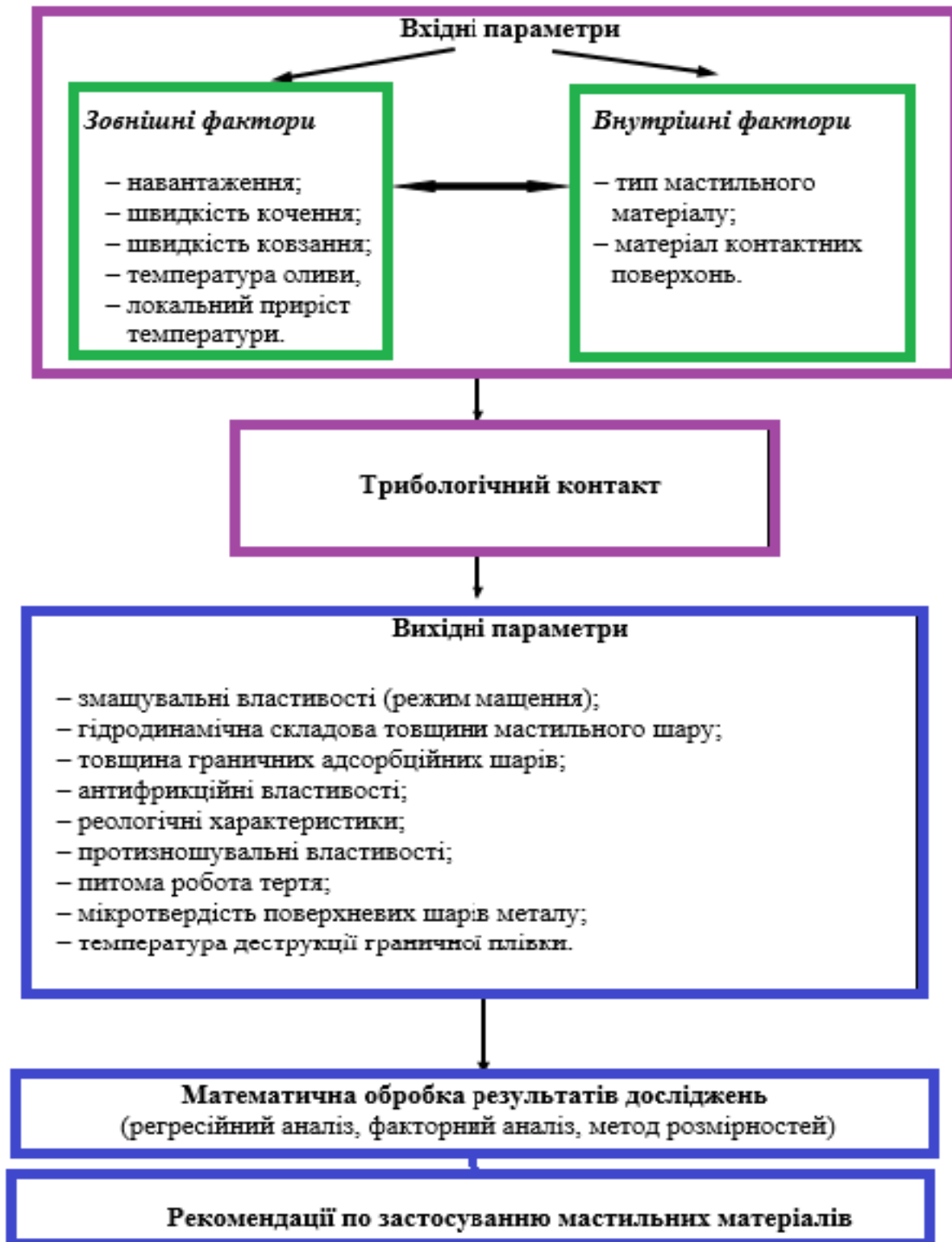


Рис. 3.2. Порядок оцінки триботехнічних параметрів мастильних матеріалів.

Тертя в механізмах безпосередньо призводить до втрати потужності. Витрати на мастильні матеріали складають значну частину витрат на експлуатацію обладнання ПС та АНТ. Знос є однією з основних характеристик, що визначають закінчення терміну служби механізмів та призводить до витрат на технічне обслуговування, заміну та простій техніки. Ефективний аналіз мастильних матеріалів та запропонована програма їх моніторингу можуть підвищити ефективність роботи вузлів тертя ПС та АНТ та знизити експлуатаційні витрати. Цінність цієї програми може бути реалізована лише в тому випадку, якщо її можна зібрати та проаналізувати своєчасно та організовано.

Надійність та працездатність працюючих механізмів багато в чому залежать від захисних властивостей мастильних матеріалів як конструкційного елемента. У авіаційній галузі необхідно впроваджувати періодичний аналіз мастильних матеріалів для моніторингу механізмів, зокрема, зносу підшипників, деталей двигунів та роботи зубчастих передач.

3.2. Аналіз результатів експериментів та їх вплив на вибір якісних мастильних матеріалів.

Більш глибоке розуміння трибологічних характеристик авіаційних олив, одержаних в цих дослідженнях, може визначити нові шляхи в розробці і вдосконаленні мастильних матеріалів та технологій виробництва, що мають безпосереднє застосування в авіаційній індустрії. Ці підходи враховують реальні умови експлуатації та сприяють вдосконаленню якості авіаційних олив з точки зору їх тривалої та надійної роботи в різних режимах та умовах.

Досліджувались авіаційні оливи, зокрема: авіаційна олива ПІМ-10 згідно з ТУ 38.1011299-2006, що використовується у теплонапружених газотурбінних двигунах з максимальною робочою температурою до 200 °С; олива синтетична Б-3В за ТУ 38.101295-85, призначена для газотурбінних двигунів та редукторів гелікоптерів; синтетична олива ЛЗ-240 за ТУ 301-04-010-92 для газотурбінних двигунів і редукторів гелікоптерів; оливи

синтетичні ВНП НП 50-1-4ф згідно з ГОСТ 13076 та ВНП НП 50-1-4у за ТУ 301-04-010-92; оливи синтетичні ВНП НП 50-1-4у відповідно до ГОСТ 13076 і ВНП НП 50-1-4у за ТУ 38.101295-85, призначені для газотурбінних і спеціальних двигунів і редукторів вертольотів; маслосуміш СМ-9 за ТУ 0253-001-49878493-2005.

Матеріалом, який використовувався для пари тертя, була сталь ШХ-15. Амплітуда зворотно-поступального руху пластини становила 0,5 мм, а частота осциляцій пластини – 50 Гц. Нормальне навантаження на нерухому кульку було встановлено на рівні 175 Н.

Здійснення досліджень ефективності зазначених авіаційних олив відбувалося шляхом використання вібротрибометра УМТ-3. Установлено, що сталий рух пластини відбувався в режимі зворотно-поступальних осциляцій з амплітудою 0,5 мм при частоті 50 Гц, забезпечуючи оптимальне відтворення умов реального експлуатаційного процесу.

Однією з ключових характеристик було нормальне навантаження, яке було зафіксовано на рівні 175 Н. Ця величина визначалася як оптимальна для досліджень з врахуванням специфічностей трибологічних взаємодій між пластиною та кулькою, що забезпечувало стабільність та повторюваність результатів [26].

Важливим аспектом вибору об'єктів дослідження став їхній широкий спектр, що враховував велику різноманітність сучасних авіаційних технологій та технічних вимог. Кожен тип оливи було обрано відповідно до його призначення та експлуатаційних умов, що забезпечило репрезентативність тестового набору та максимальну інформативність отриманих результатів.

Перед початком кожного експерименту здійснювалось занурення пластини та кульки у зразок авіаційного мастильного матеріалу, який попередньо завантажувався в мастильну ванну УМТ-3 та піддавався нагріванню протягом 90 хвилин до температури 80 °С. Наступні 120 хвилин проводились випробування пари тертя в масляному зразку за сталої

температури в термокамері пристрою. Для кожного зразка авіаційного мастила здійснювали два паралельні випробування, результати яких розраховувалися як середнє арифметичне значення. Після завершення випробувань кульку очищували від залишків масла за допомогою ультразвукової ванни, а наступною процедурою було промивання спиртом. Після виконання вказаної процедури тестування зразків авіаційного мастила повторювали за аналогічними режимами та послідовністю, але при температурі в камері пристрою, що становила 120 °С.

Досягнення стало можливим завдяки дотриманню протоколу експерименту та використанню високоточного обладнання, що гарантує відтворення однакових умов для кожного випробування. Такий підхід сприяє отриманню надійних та об'єктивних результатів, які визначають трибологічні властивості досліджуваних мастил під різними температурними умовами.

В якості критеріїв, що характеризують трибологічні властивості авіаційних олів, використовувались параметри лінійного зносу кульки ($d_{ш}$) та об'ємного зносу пластини ($WV_{\text{пласт}}$, $WV_{\text{шар}}$), а також значення середнього тиску в контакті тертя (РФПК) і динамічного коефіцієнта тертя (COF). Оцінка зносу пари тертя проводилась за допомогою оптичної системи приладу ПТМ-3 та профілометрії з використанням універсального вимірювача шорсткості TR-200. Робота приладу TR-200 ґрунтується на переміщенні алмазної голки по поверхні зношеної деталі (пластини) та реєстрації її відхилення від рівної поверхні пластини.

Антифрикційні властивості зразків авіаційних олів вивчалися відповідно до вимог СТО 08151164-0146-2013, аналізуючи значення динамічного коефіцієнта тертя наприкінці випробувань у інтервалі від 5 000 до 7 000 секунд. Ці дані реєструвалися прямим вимірюванням за допомогою датчиків приладу.

Додатково, необхідно відзначити, що отримані результати є об'єктивними та достовірними, завдяки застосуванню високоточного обладнання та дотриманню стандартизованих методик вимірювань, що

гарантує достовірність та повторюваність умов кожного випробування.

Результати дослідження, ілюстровані на рисунку 3.3, визначають характерний знос пари тертя, виявлений під час випробувань авіаційного мастила на вібротрибометрі, де наведено приклади лінійного зносу кульки та пластини.

Отримані дані, що вказані в таблиці 3.3 та представлені на рисунку 3.4, надають результати оцінки протизносних і антифрикційних характеристик різних авіаційних мастильних матеріалів.

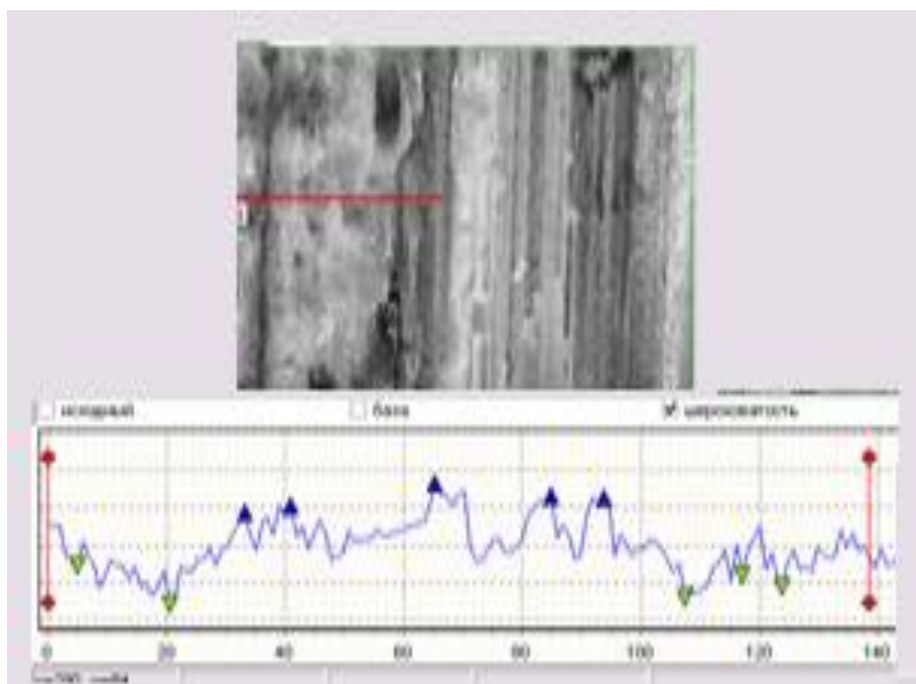
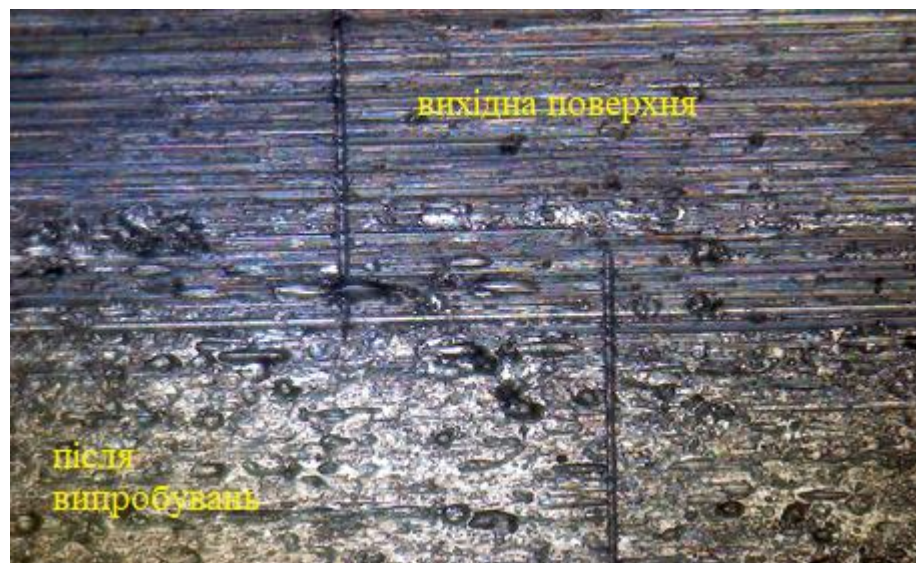


Рис. 3.3. Оцінка лінійного зносу.

Результати випробувань з оцінювання протизношувальних властивостей авіаційних олив

Найменування мастильного матеріалу	Найменування показників протизношувальних властивостей			
	об'ємний знос пластини, $W_{V, \text{пласт}}, 10^3 \text{ мкм}^3$	об'ємний знос кулі, $W_{V, \text{шар}}, 10^4 \text{ мкм}^3$	Лінійний знос, $d_{\text{ш}}, \text{мм}$	Середній тиск, $P_{\text{ФПК}}, \text{МПа}$
При температурі 80 °С				
ВНІНП-1-50-4у	1312	129	0,478	983
Б-3В	5014	2120	0,982	264
ЛЗ-240	2144	1060	0,681	420
ВНІНП-1-50-4ф	1340	136	0,480	972
ІПМ-10	1452	193	0,521	834
маслосуміш СМ-9	1613	152	0,492	885
При температурі 120 °С				
ВНІНП-1-50-4у	1922	623	0,575	646
Б-3В	6014	2656	1,257	149
ЛЗ-240	3044	1530	0,810	342
ВНІНП-1-50-4ф	1936	651	0,586	598
ІПМ-10	2057	984	0,677	492
маслосуміш СМ-9	2012	788	0,634	613

Обговорюючи висновки з проведених досліджень, слід зазначити, що авіаційна олива ВНІНП-1-50-4у вирізняється найвищим рівнем протизношувальних властивостей. Зауважимо, що найбільший знос пари тертя виявлений під час випробувань на оливі Б-3В, ймовірно, внаслідок випадання в осад сполук 2-меркаптобензтіазолу, що є присадкою каптаксу. Аналіз таблиці 1 демонструє, що зі зростанням температури оливи спостерігається пропорційне збільшення зносу у парі тертя "кулька - плоска кістка пластини", ймовірно, унаслідок зменшення кінематичної в'язкості авіаційних олив при збільшенні температури випробувань.

Отримані результати аналізу антифрикційних характеристик авіаційних олив, представлені на рис. 3.4, свідчать про те, що коливання температурного режиму практично не впливають на величину коефіцієнта тертя. Зауважимо, що мінімальний коефіцієнт тертя спостерігається у випадку використання авіаційної оливи ВНІНП-1-50-4у, тоді як максимальне значення визначено для оливи Б-3В.

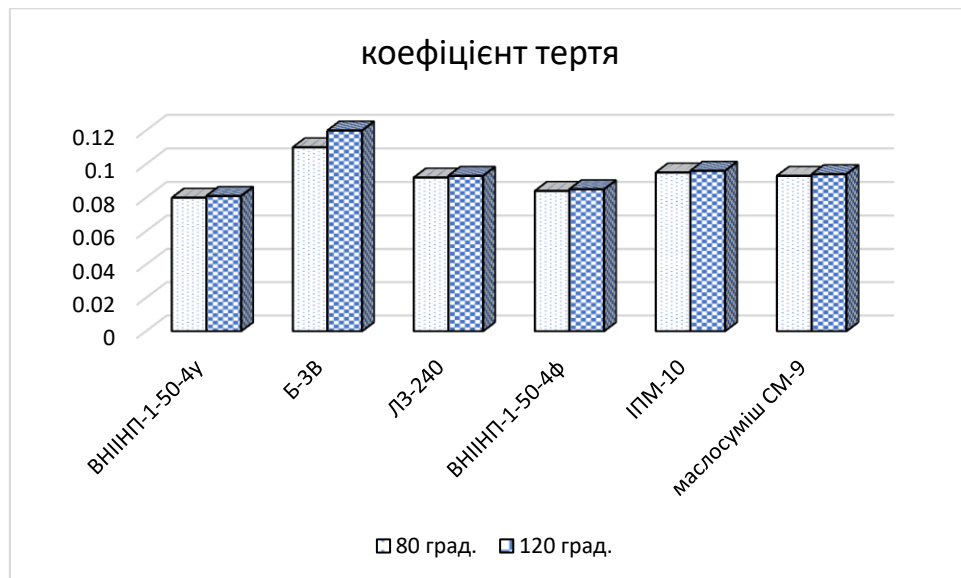


Рис. 3.4. Результати оцінки антифрикційних властивостей авіаційних олив за температури 80 та 120 °С.

У заключенні цього дослідження були отримані важливі дані про рівень протизношувальних та антифрикційних властивостей авіаційних олив. Використання універсального вібротрибометра надає можливість оцінювати експлуатаційні характеристики олив за режимів, які є найбільш характерними для реальної експлуатації авіаційних двигунів і механізмів в реальних умовах.

Порівняно із чотирикульковою машиною тертя, використання вібротрибометра передбачає включення цього методу в нормативно-технічну документацію на авіаційні оливи. Проте, перед впровадженням цього методу, необхідно зібрати достатньо статистичних даних з випробувань олив різного складу та встановити кореляцію з іншими методами оцінки трибологічних характеристик.

Отримані результати підтверджують, що олива Б-3В має підвищене зношування, яке може бути пов'язане з випаданням сполук 2-меркаптобензтіазолу (присадка каптакс). У той же час, авіаційна олива ВНІНП-1-50-4у виявилася із найкращими трибологічними характеристиками, вказуючи мінімальний знос та коефіцієнт тертя.

Олива ВНІНП-50-1-4у (ТУ 38.401-58-12-91) - синтетична діефірна, що

містить ефективну композицію антиокислювальних присадок. Застосовується в авіаційних турбореактивних двигунах для типів бойових та цивільних літаків "МіГ", "Ан" та в турбокомпресорній частині силової установки вертольотів "Мі-26", а також у авіаційних газотурбінних двигунів газоперекачувальних агрегатів.

Олива ВНІНП-50-1-4у (ТУ 38.401-58-12-91) містить ефективну композицію антиокислювальних присадок, що дозволяють застосовувати мастильний матеріал даного типу при температурі від -60 до 200°C з перегрівом до 225 °С. Може замінювати мастила ПМ-10, ВНДІ НП 50-1-4ф, Турбонікойл 210А, Мобіл Турбо 319А-2 та ін. Використовують як одне з основних у військовій техніці (наприклад, МіГ-29). Рекомендується для перспективної техніки.

3.3. Моніторинг якості мастильних матеріалів під час експлуатації авіаційної наземної техніки.

До визначальних триботехнічних показників якості ПММ можна віднести антифрикційні, реологічні, змащувальні та протизношувальні характеристики. Дослідження зносу сталі 40Х проводилось на установці СМЦ-2 (рис. 3.5) в умовах ковзання в нестационарному режимі (пуск – зупинка) при змащуванні трансмісійною оливою ТАД-17і (товарною партією та оливою з терміном експлуатації в механізмах наземної техніки – 5, 10, 15 та 20 тис. км пробігу автомобіля). Об'ємна температура мастильного матеріалу – від 20 до 90 °С. Загальна кількість циклів напрацювань становила 1000. Навантаження – 50 Н [30].



Рис. 3.5. Загальний вигляд вузла тертя колодка–ролик.

Олива ТАР-17і застосовувалася для змащування у важконавантажених циліндричних, спіральнo-конічних і гіпоїдних передачах легкових і вантажних автомобілів наземної техніки. Основні експлуатаційні функції оливи полягають в забезпеченні безперервного шару плівки між поверхнями тертя, щоб зменшити тертя і запобігти зносу елементів трибоспряжень. Також олива ТАР-17і виконує такі функції, як охолодження робочих частин, захист металевих поверхонь від корозії, запобігання осіданню забруднюючих речовин на поверхнях тертя. В процесі експлуатації, при дії високих градієнтів швидкості зсуву, навантажувально-швидкісних і температурних чинників, відбувається старіння та деградація оливи, що призводить, як правило, до погіршення його захисних властивостей.

Лінійний знос визначається за допомогою приладу ПМТ-3, відбитки на поверхню пар тертя наносять алмазним індентором з кутом 136° при вершині.

Глибина відбитка піраміди:

$$h = \frac{d}{7}. \quad (3.1)$$

Лінійний знос поверхні тертя визначається як різниця глибин відбитка вихідної поверхні і після експерименту (рис. 3.6):

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{(d_1 - d_2)}{7}, \quad (3.2)$$

де Δh – лінійний знос; h_1 – глибина відбитка вихідної поверхні; h_2 – глибина відбитка після дослідів; d_1 – довжина діагоналі відбитка перед дослідом; d_2 – довжина діагоналі відбитка після дослідів.

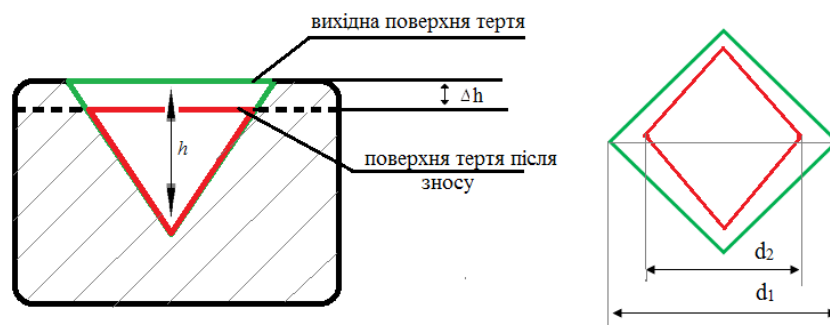


Рис. 3.6. Схема відбитків індентора.

В табл. 3.4 представлено приклад узагальнення результатів зношування.

Таблиця 3.4

Статистичний розрахунок зносу сталі 40Х при змащуванні мастильним матеріалом ТАД-17і (пробіг 10 тис.км)

Параметри	колодка				ролик			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Номер відбитка								
довжина діагоналі відбитка перед дослідом d_1 , мкм	25	24	23	24	23	25	24	24
довжина діагоналі відбитка після досліду, d_2 , мкм	10	9	10	11	18	22	20	21
Різниця довжин діагоналей ($\Delta d = d_1 - d_2$), мкм	<u>15</u>	<u>15</u>	<u>13</u>	<u>13</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>3</u>
Середнє арифметичне різниці довжин діагоналей, $\Delta d_{сер}$ мкм	<u>14</u>				<u>3,75</u>			
Знос, ($\Delta h_{сер} = \Delta d_{сер} / 7$), мкм	<u>2</u>				<u>0,53</u>			

Аналіз протизношувальних характеристик двох зразків оливи ТАД-17і для АНТ з терміном експлуатації до 20 тисяч км пробігу показав зростання лінійного зносу для зразку 2 в 5,8 разів (рис. 3.7, 3.8).

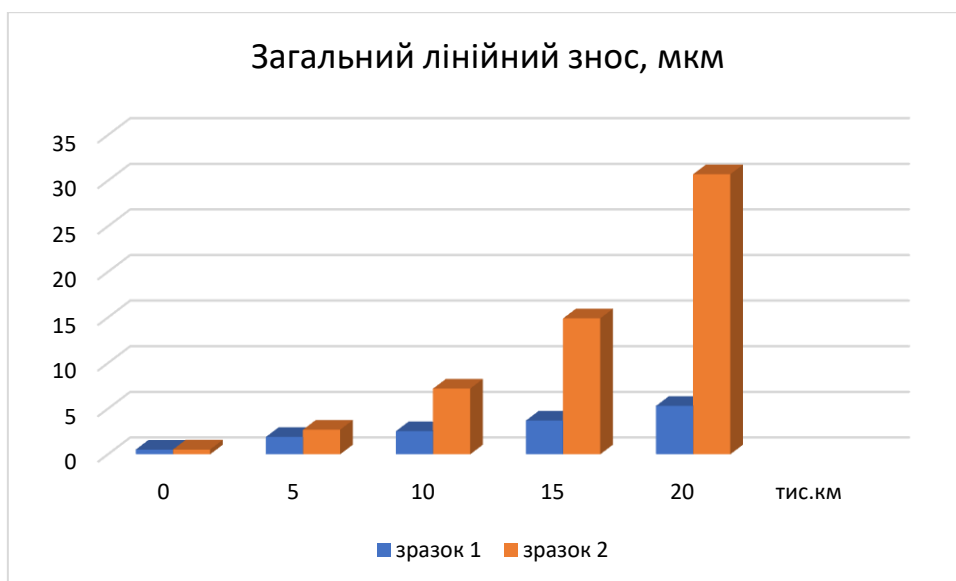


Рис. 3.7. Знос сталі 40Х при змащуванні трансмісійною оливою ТАД17і залежно від терміну експлуатації оливи.

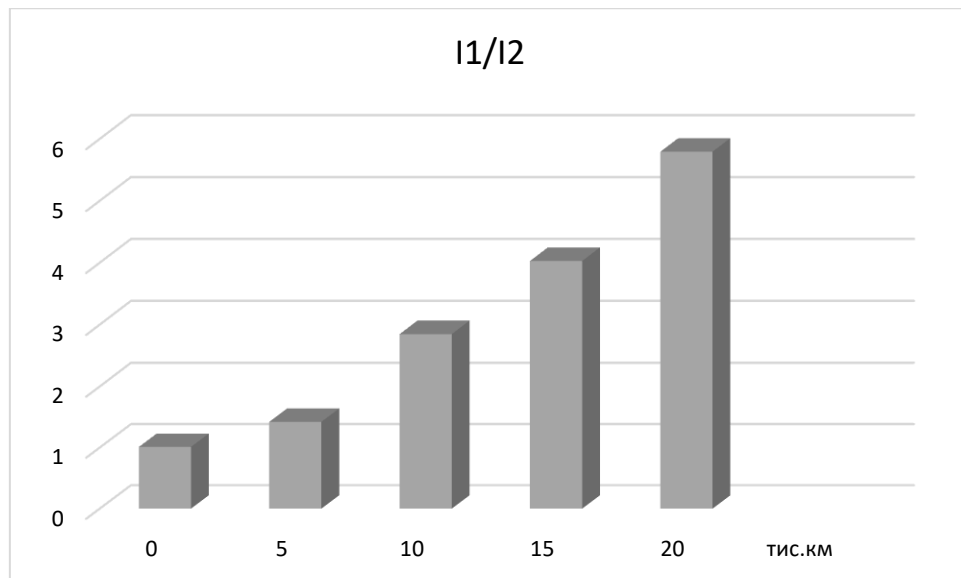


Рис. 3.8. Відношення показників лінійного зносу сталі 40X при змащуванні трансмісійною оливою ТАД17і двох зразків залежно від типу АНТ.

Основними причинами зниження протизношувальних властивостей оливи є її окислення, забруднення частинками зносу та водою, спрацювання присадок.

Коробка передач АНТ, деталі якої змащуються зразком оливи №2, працює в більш навантажених умовах, що свідчить про інтенсивний знос дослідних зразків, який обумовлений спрацюванням присадок та зниженням протизношувальних властивостей оливи.

Таким чином, при проведенні лабораторних досліджень необхідно розробити рекомендації стосовно заміни мастильного матеріалу з розрахунку, що допустимий знос зуб'їв зубчастих передач становить не більше 20% початкових лінійних розмірів.

Висновки до розділу 3.

1. Дослідження, спрямоване на оптимізацію експлуатаційної надійності технічних систем через моніторинг мастильних матеріалів, виявило ключові аспекти, впливаючі на тривалість служби обладнання в авіаційній галузі.

2. Враховуючи "Інструкцію з контролю якості пально-мастильних матеріалів та рідин у державній авіації України", розглянуто стратегії контролю, такі як прийнятно-здавальне, контрольне, повне та арбітражне випробування. Це сприяє виявленню проблем та розробці ефективних заходів на кожному етапі життєвого циклу мастильних матеріалів.

3. Науковий підхід до контролю якості, представлений паспортами якості та відомими лабораторіями, такими як 10-й Хімотологічний центр та Вінницька лабораторія контролю якості, визначає стандарти та забезпечує надійність пально-мастильних матеріалів. Мобільні лабораторії відіграють ключову роль у розширенні контрольних можливостей та забезпеченні якості у всіх регіонах України.

4. Основна увага дослідження була зосереджена на аналізі впливу мастильних матеріалів на тертя в механізмах, що визначає ефективність та тривалість служби обладнання. Запропонована програма моніторингу мастильних матеріалів може бути ефективною лише при систематичному та своєчасному аналізі даних. Робота визначає напрямки подальших наукових досліджень та практичних заходів для вдосконалення моніторингу мастильних матеріалів в авіаційних технологіях.

5. Проведений аналіз експериментів з трибологічних характеристик авіаційних олив вказує на перспективи вдосконалення мастильних матеріалів для газотурбінних двигунів. Результати досліджень, зокрема, антифрикційні властивості авіаційних олив, свідчать про перевагу оливи ВНІНП-1-50-4у через її мінімальний знос та коефіцієнт тертя. Ці дані підкреслюють важливість правильного вибору та вдосконалення мастильних матеріалів для газотурбінних двигунів.

6. Аналіз результатів відкриває нові можливості для подальших досліджень та вдосконалення технологій мастильних матеріалів, спрямованих на забезпечення високої ефективності та безпеки в авіаційній індустрії.

7. Дослідження впливу мастильних матеріалів на тривалість та продуктивність наземної авіаційної техніки виявило ключові триботехнічні показники, такі як антифрикційність, реологія, змащення та протизношувальність. Експерименти зі зносом сталі 40Х, використовуючи трансмісійну оливу ТАД-17і, підтвердили, що експлуатаційні функції мастильних матеріалів грають ключову роль у попередженні тертя та зносу.

8. Лабораторні дослідження лінійного зносу показали, що температурні зміни та старіння оливи впливають на протизношувальні властивості. Зокрема, олива ТАД-17і втрачає свою ефективність під впливом експлуатаційних факторів.

9. Рекомендації заміни мастильного матеріалу, враховуючи не більше 20% зносу зубчастих передач, можуть підвищити тривалість та надійність механізмів наземної техніки. Отримані результати становлять основу для подальших наукових досліджень та розробки практичних рекомендацій у сфері моніторингу мастильних матеріалів у військовій індустрії.

РОЗДІЛ 4

ОСНОВНІ АСПЕКТИ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ПЕРЕРОБКИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Відпрацьовані мастильні матеріали є серйозним джерелом небезпеки для навколишнього середовища. За інформацією від корпорації Exxon-Mobil, один літр використаної оливи може забруднити мільйон літрів питної води. Україна споживає понад 1 мільйон тонн свіжих олив щороку. У відсутності ефективних нормативів щодо збору, в країні утилізується лише близько 500 тисяч тонн використаної нафтопродукції офіційно, що приблизно рівно до обсягу, який обробляє Німеччина – 660 тисяч тонн на рік. Але, на жаль, в нашій країні 90% цих відпрацьованих ресурсів викидається в природне середовище або використовується неефективно, негативно впливаючи на атмосферу, ґрунти та водоймища. Цей недбало оброблений сировинний матеріал шкодить усім компонентам природи.

Постійне використання різноманітних поліфункціональних присадок з метою поліпшення експлуатаційних характеристик та продовження терміну служби мастильних олив сприяє накопиченню відпрацьованих моторних олив (ВМО) токсичних сполук, які становлять загрозу для екосистеми. У відпрацьованих маслах виявлено понад 140 видів канцерогенних поліциклічних вуглеводнів (КПВ), кількість яких збільшується із зростанням строку експлуатації олив. Наприклад, середнє збільшення КПВ для легкових карбюраторних автомобілів складає 26,8 мг/кг на кожні 1000 км пробігу, призводячи до значного накопичення від 270 до 400 мг/кг КПВ після 10-15 тисяч км пробігу. Ці речовини утворюються внаслідок згоряння оливи та потрапляння їх у відпрацьовані масла через пальне, представляючи серйозну загрозу для довкілля.

Місткість світового ринку мастильних матеріалів оцінюється в 36,5 мільйона тонн (27,9 мільярда доларів), їх лише четверта частина (10-12 млн. вагових тонн) використовується повторно, переробляється чи спалюється.

4.1. Забруднення навколишнього середовища відпрацьованими мастильними матеріалами.

В даний час особливої важливості набуває раціональна та економна витрата нафтопродуктів. Це стосується не тільки моторних оливо, але й індустріальних, компресорних, трансформаторних, турбінних та ін. Відпрацьовані оливи, які потрапляють в навколишнє природне середовище, лише частково видаляються або знешкоджуються внаслідок природних процесів. Основна їх частина є джерелом забруднення ґрунту, водоймищ та атмосфери.

Нагромаджуючись, вони призводять до порушення відтворення птахів, риб та ссавців, надають шкідливий вплив на людину. Таким чином, проблема збору та утилізації відпрацьованих нафтопродуктів є актуальною, більш того, рентабельною та наукомісткою областю, оскільки за правильної організації процесу регенерації вартість відновлених оливо на 40-70% нижче вартості свіжих оливо при практично однаковій якості.

Один із найсуттєвіших факторів забруднення атмосфери безумовно пов'язаний з випаровуванням мастильних матеріалів. Рівень випаровування піддається впливу хімічного та фракційного складу оливо, а також температурного режиму, при якому працює змащувальна система об'єкта. Збільшення вмісту в оліві легкокиплячих фракцій та робочої температури призводить до збільшення втрат оливи в результаті випаровування. Цьому сприяють також конструктивні особливості системи змащування машин і механізмів, такі як змащування масляним туманом чи розприскуванням [31].

При проектуванні мастильних матеріалів необхідно підтримувати як екологічні, так і прикладні властивості. Тому вони повинні характеризуватися не тільки точним рівнем здатності до біологічного розкладання, але й відповідними фізико-хімічними властивостями.

Роль присадок полягає в покращенні якості оливо. Частка присадок у оливах може коливатися від кількох сотих до кількох відсотків. В даний час все більше і більше збагачувальних добавок створюються в ході передових

технологій виробництва, які сприяють навколишньому середовищу. Екологічно чисті нафтопереробні добавки можуть стати вигідною альтернативою нафтопродуктам.

Більшість базових олив, які використовуються для виробництва мастильних матеріалів, виробляються під час переробки сирової нафти. Це було пов'язано з тим, що ці оливи характеризуються значно нижчою вартістю, ніж синтетичні або натуральні базові оливи. У своєму складі вони містять переважно суміші рідких малолетких аліфатичних вуглеводнів (розгалужених) і аліциклічних аліфатичних заміщених вуглеводнів і температуру дистиляції вище 360 °С. Мінеральна олива містить багато класів хімічних компонентів, включаючи парафіни, нафтени, ароматичні сполуки, гетероатомні сполуки тощо. Завдяки різним джерелам походження нафти та технологіям переробки мінеральні оливи можуть мати різноманітний склад, який може включати розгалужені аліфатично-аліфатичні та аліциклічно-аліциклічні вуглеводні, аліфатичні або аліциклічні ароматичні вуглеводні, переважно похідні бензолу, а також біфеніл, дифенілметан, трифенілметан, нафталін, антрацен, фенантрен і похідні хризену. Використання мастила, що містить компоненти, отримані з сирової нафти, негативно впливає на навколишнє середовище та здоров'я [32]. Поширеним стало виробництво масляних сумішей, які покращують властивості мінеральних олив шляхом додавання натуральних олив.

Суттєве забруднення атмосфери також виникає внаслідок спалювання використаних моторних олив для їх утилізації чи в якості котельно-пічного палива. Небажані викиди, що виникають у результаті цього процесу, можна класифікувати на кілька груп:

- Свинець та інші метали, які зазвичай містяться в використаних оливах, розчинені у галогенідах свинцю з етильованого бензину.

- Інші елементи, такі як сірка, азот, фосфор, хлор, бром, що можуть присутні у відпрацьованих оливах у вигляді органічних та неорганічних сполук.

- Поліциклічні ацени та інші поліциклічні органічні сполуки, що зазвичай присутні в усіх важких вуглеводнях, і можуть виділятися при спалюванні відпрацьованих олив.

- Поліхлордифеніли (ПХД), які, хоча вони рідко містяться в моторних оливах, можуть з'явитися у результаті змішування з трансформаторними оливами.

- Інші органічні сполуки, такі як розчинники без галогенів, гліколіз та бензин, які можуть підвищити леткість, тиск насичених парів і температуру спалаху відпрацьованих олив.

Проаналізуємо вплив відпрацьованої оливи на людину. Окрім негативного впливу на природу, забруднення відпрацьованою нафтою також може зробити воду непридатною для сільського господарства та порушити роботу очисних споруд. Відпрацьована олива може забруднювати запаси питної води, і її очищення є дуже дорогим. Якщо відпрацьована олива розливається поблизу будівлі, випари оливи можуть проникнути в будівлю, зробивши її непридатною для перебування, доки не будуть виконані ремонтні роботи. Через вдихання, ковтання або контакт зі шкірою забруднювачі у відпрацьованій оливі можуть спричинити різноманітні хвороби та захворювання у людей. Ліпідна пневмонія, ліпідна гранульома в легенях, екзематозний і контактний дерматит, фолікуліт, масляні вугрі та меланоз були зареєстровані як побічні ефекти впливу відпрацьованих мастильних матеріалів [33].

Плоскоклітинний рак шкіри, а також рак сечового міхура та печінки можуть бути спричинені забрудненням використаним маслом. Наявність бензолу, толуолу і хлорованих розчинників можуть призводити до токсичності. Деякі з цих добавок можуть завдати шкоди здоров'ю людини та навколишньому середовищу, а інші є абсолютно безпечними. Фізичні та хімічні домішки присутні у відпрацьованій оливі в результаті фізичного забруднення, хімічних реакцій і зношування, що відбувається під час його використання.

Мастильна олива викидається в навколишнє середовище у вигляді масляного туману та мікрокрапель, становлячи серйозну загрозу для навколишнього середовища. Сила та ефекти взаємодій нафтопохідних тісно пов'язані зі складом, об'ємом і частотою викидів у даній зоні. Ступінь біологічного розкладання мінеральних олив дуже низький. У природному середовищі олива нафтового походження створює первинну небезпеку, а також вторинну небезпеку через накопичення оливи в тканинах рослин, тварин і ґрунтових водах. Мастильні матеріали, вироблені з сирової нафти, також становлять серйозну загрозу для водних екосистем.

Багато відпрацьованих мастильних матеріалів може забруднювати природні водойми. Плівка нафтової речовини на дзеркалі резервуара для води може викликати порушення киснево-газообміну між водою та атмосферою, але також може зменшити доступ світла до глибини резервуара. Ці обмеження можуть призвести до змін у функціонуванні та метаболічних порушень гідробіонтів і, як наслідок, до утворення зони кисневого голодування в придонних частинах водойми, що може призвести до розладу екосистеми. Зниження процесу фотосинтезу та підвищення температури води за рахунок поглинання сонячної радіації може загрожувати правильному розвитку водних рослин і призвести до евтрофікації водойми. Евтрофікація водойм є всесвітньою проблемою, яка відбувається в річках, озерах і морях і навіть впливає на океани. Забруднення нафтопродуктів є предметом громадських дебатів переважно під час аварії танкерів. Розливи нафти, що поширюються у воді та узбережжі, не пропускають кисень, що спричиняє повне зникнення життя на даній території. Однак найбільшою проблемою є відсутність реальної здатності оцінити кількість забруднення та його наслідки.

Забруднення відпрацьованими мастильними матеріалами також завдає серйозної шкоди ґрунтам через багатоступінчасті фізико-хімічні процеси, що призводять до зміни форм і розподілу органічної речовини в діапазоні вуглецю, води, азоту та фосфору. Оскільки ґрунт є середовищем для

різноманітних мікроорганізмів і вищих живих організмів, його забруднення мастильними матеріалами на основі нафти стає небезпечним і може мати згубний вплив на біологічне життя. Може бути порушено належне функціонування екосистеми. Мінеральна олива може закупорювати пори в ґрунті, що призводить до зниження аерації та проникнення води. Наявність нафтових сполук може зменшити або обмежити водопроникність ґрунтів і, як наслідок, викликати деградацію ґрунтів через дефіцит кисню [33].

Для зменшення ступеня забруднення навколишнього середовища перспективним є розробка екологічних мастильних матеріалів, що повинні містити лише компоненти, які біологічно розкладаються. Інгрідієнти мастильних матеріалів, вироблених із сирової нафти, негативно впливають на навколишнє середовище та здоров'я; отже, їх використання у відкритих вузлах тертя повинно бути мінімальним. Методи випробувань на біологічний розклад оливо повинні підтверджувати загальну здатність до біологічного розкладання [34].

Законодавчі норми щодо мастильних матеріалів повинні визначати швидкість і потенціал їх біологічного розкладання. На жаль, поточні методології не повідомляють про 100% здатність до біологічного розкладання речовини, а методи оцінки здатності до біологічного розкладання є трудомісткими та дорогими. Тому необхідно розробити та впровадити недорогі та прості процедури контролю для кожного виду оливо, що забезпечують можливість однозначного висновку про наявність або повну відсутність у оліві компонентів нафтового походження, а також вміст натуральних компонентів.

4.2. Використання та регенерація відпрацьованих моторних оливо: перспективні методи.

У США Конгрес в 1975 р. ухвалив національний закон про регенерацію оливо. Утилізована відпрацьована олива може використовуватися для тих же цілей або для зовсім інших потреб. Наприклад, відпрацьована моторна олива

може бути регенерована і потім продаватися в магазині як моторна олива або перероблений мазут. Крім цього за допомогою спеціальних технологій очищена відпрацьована олива змішується з дизпаливом і застосовується надалі як паливо для дизельних двигунів.

Управління відпрацьованими оливами в країнах ЄС підпорядковане окремій Директиві з утилізації відпрацьованих олив 75/439/ЄЕС (утилізація включає збирання, транспортування, переробку (у тому числі регенерацію) та захоронення). У Директиві ЄС відпрацьовані оливи вперше розглядаються не як відходи, що підлягають знищенню, а як відпрацьовані продукти, що підлягають вторинному використанню. Діяльність збирачів, перевізників та переробників підлягає обов'язковому ліцензуванню. Важливим фактором реалізації положень Директиви ЄС є передбачені у ній щорічні звіти країн - членів ЄС до Комісії ЄС про технічний рівень, досвід та досягнуті результати.

Загалом у Європі потрапляє до навколишнього середовища близько 25% обсягу всіх відпрацьованих олив; а 75% збирається для подальшого використання, з них 25% – йде на регенерацію, 49% використовується як паливо і 1% знищується.

Забезпечення раціонального використання мастильних матеріалів та вирішення проблеми екології включає у себе вторинне використання відпрацьованих моторних олив. Різноманітні методи ефективної утилізації включають: спалювання для енергії, використання для технологічних потреб; термічний розклад; очищення, регенерація та повторне використання.

Регенерація включає два основні напрямки:

1. Відновлення властивостей: Це передбачає відновлення показників до встановлених стандартів.

2. Одержання Базових Олив: Цей напрямок полягає в очищенні від забруднень та вилученні присадок.

Найпоширеніший спосіб утилізації олив в Україні – спалювання в енергетичних печах після змішування з мазутом. Технологія має як свої

переваги, так і недоліки. Це простота та дешевизна використання, висока швидкість та ступінь утилізації. Недоліками є присутність у викидах важких металів через наявність у оливах присадок [36].

Товариство "ЕКОГРИНЛАЙН" проводить утилізацію відпрацьованих олив декількома способами:

- відстоювання – через деякий час відбувається процес розшарування. Верхній шар відправляється на переробку для подальшого використання, середній та нижній шари очищаються до гранично допустимого рівня;

- сепарація – відокремлення води від оливи;
- фільтрація – видалення механічних домішок та розчиненої води;
- регенерація – за допомогою іонообмінних смол відновлюються робочі властивості.

Використовуючи сучасні установки, в яких використовуються новітні технології "ЕКОГРИНЛАЙН" може утилізувати близько 2000 тонн на місяць.

На основі аналізу експериментальних даних розроблено комплексну блок-схему процесу регенерації ВМО (рис. 4.1), яка дозволяє ефективно регенерувати оливи з різним вмістом води та різним вмістом присадок [31]. Цей комплексний процес включає в себе виділення та переробку всіх відходів та екологічно небезпечних речовин, що можуть бути використані в інших сферах. Розроблена блок-схема містить наступні етапи:

- 1) коагуляція;
- 2) адсорбційне очищення;
- 3) відстоювання;
- 4) центрифугування;
- 5) відгін палива.

Для етапу коагуляції використано деемульгатор Sot, який допомагає зменшити в'язкість ВМО та знизити температуру підігріву, що сприяє швидкому зневодненню та зменшує енергетичні витрати.

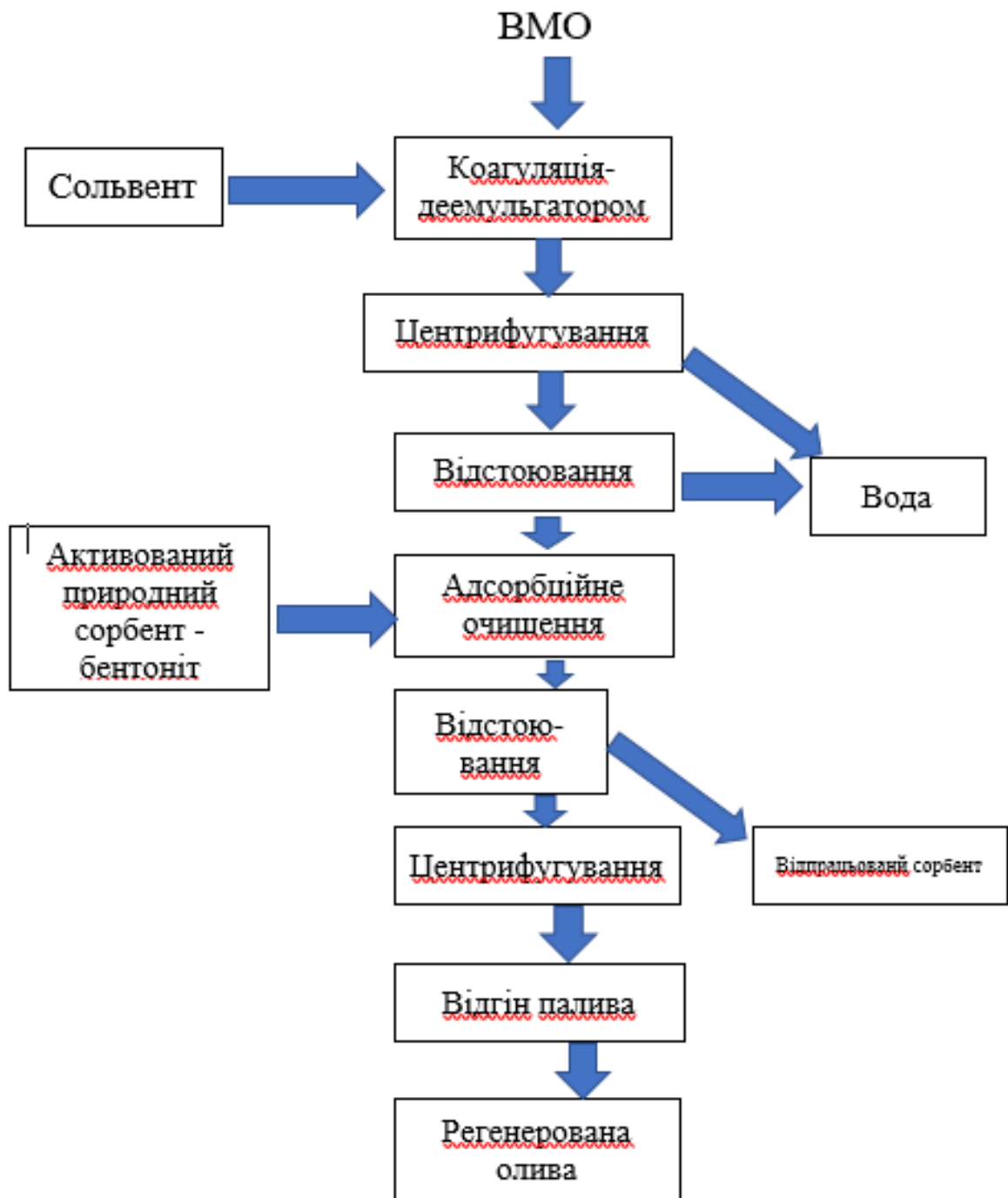


Рис. 4.1. Блок-схема комплексного процесу регенерації ВМО.

Перший етап очищення включає коагуляцію, центрифугування та відстоювання, що призводить до отримання очищеної ВМО з вмістом води 0,8%. Другий етап регенерації включає адсорбційне очищення, яке одночасно забезпечує видалення води до 0,1%, а також механічних домішок, смол та асфальтенів.

Адсорбційне очищення обов'язкове для регенерації всіх видів ВМО,

оскільки воно сприяє підвищенню виходу високоякісної оливи та забезпечує екологічно чистий процес.

Для ВМО з вмістом води 0,8% регенерація починається з другого етапу, який включає адсорбційне очищення та видалення води та домішок. Процес центрифугування ВМО включає очищення від механічних домішок та адсорбенту. На завершальному етапі регенерації використовується відгін паливних фракцій.

Ректифікаційна колона відділяє паливні фракції з регенованої моторної оливи, що дозволяє отримати бензинову фракцію при температурі 50-215 °С та дизельну фракцію при температурі 180-350 °С. Це забезпечує високу якість регенованої оливи, відповідно до технічних вимог ТУ У 23.2-22340203-044:2011.

Висновки до розділу 4.

1. Оливи, отримані з сирової нафти, негативно впливають на навколишнє середовище, спричинюючи серйозне забруднення ґрунтів, підземних вод і можуть накопичуватися в тканинах рослин, а також наземних і водних тварин. Крім того, вони становлять значну небезпеку для здоров'я, викликаючи численні алергічні реакції та захворювання нервової та дихальної систем, а тривалий контакт з масляним туманом може бути причиною раку. Оскільки оливи, які використовуються для нанесення, мають значний вплив на навколишнє середовище та здоров'я, вони повинні містити компоненти, які підлягають біологічному розкладанню.

2. Існує потреба в розробці та впровадженні в якості методологій технічного контролю недорогих і нескладних процедур контролю для кожного виду мастильного матеріалу, що забезпечують можливість беззаперечного висновку про наявність і вміст компонентів нафтового походження, а також вміст натуральних компонентів.

3. Розглянуто перспективи технології регенерації відпрацьованої моторної оливи, що включає етапи зневоднення, адсорбційного очищення,

центрифугування та відгонку оливи. Дана технологія дозволяє отримати регенеровану оливу, яка відповідає всім необхідним параметрам, та може бути повторно використана в промисловому обладнанні як компонент базової оливи для виробництва моторних та індустріальних олив. Такий підхід є кроком у напрямку сталого використання ресурсів та збереження природи.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано значення мастильних матеріалів у забезпеченні ефективності та надійності механічного обладнання, зменшенні тертя, захисту від корозії та зносу.

2. Визначено, що якісний вибір мастильного матеріалу з урахуванням їх взаємодії з матеріалами вузлів тертя на етапі проектування визначають подальшу експлуатаційну надійність агрегатів. Вибір ефективних мастильних матеріалів за фізико-хімічними та триботехнічними параметрами для повітряних суден та авіаційної наземної техніки у авіаційній промисловості є стратегічно важливим, оскільки умови експлуатації, такі як високі температури та тиск, можуть створювати критичні умови для конструкційних матеріалів.

3. Проаналізовано значення трибомоніторингу мастильного матеріалу для надійності, ефективності та безпеки АНТ та ПС. Дослідження параметрів трибосистеми на основі аналізу частинок зносу, забруднення, окиснення мастильних матеріалів та їх протизношувальних властивостей дозволяє оперативно виявляти та вирішувати проблеми в процесі експлуатації, впливаючи на ефективність та надійність механічних систем.

4. Визначено покращення ефективності технічного обслуговування АНТ та ПС методами трибомоніторингу: механічні методи випробувань матеріалів та моделювання тертя, теплові методи визначення термічних властивостей, кінематичні методи для визначення навантажень і прогнозування стану трибосполучень, віброакустичні методи для контролю технічного стану обладнання, і методи фото- та спектрометрії для оцінки якості мастил.

5. Проаналізовано перспективність впровадження досліджень з використанням трибометрів, таких як SRV, що дозволяє об'єктивно оцінювати трибологічні характеристики оливи за реальних умов експлуатації. Вдосконалення авіаційних технологій в авіадвигунобудуванні вимагає

використання високоякісних оливо з високими антифрикційними та протизношувальними властивостями, що можливо оцінити на етапах лабораторних та стендових випробувань.

6. Визначено перспективність застосування портативних мінілабораторій для АНТ в попередженні несправностей та продовженні терміну служби обладнання. Аналіз мастильних матеріалів на етапі профілактичного технічного обслуговування надає можливість виявляти ознаки несправностей раніше, порівняно з іншими методами, такими як вібраційний контроль.

7. Проаналізовано стратегії контролю, такі як приймально-здавальне, контрольне, повне та арбітражне випробування для ефективного виявлення проблем на різних етапах життєвого циклу мастильних матеріалів за "Інструкцією з контролю якості пально-мастильних матеріалів та рідин у державній авіації України". Розглянути перспективи залучення провідних фахівців та триботехнічного обладнання лабораторій Національної академії наук України та закладів вищої освіти до перевірки якості мастильних матеріалів за експлуатаційними показниками для забезпечення більш якісного вибору ПММ як на стадії вибору товарної продукції, так і під час експлуатації.

8. Запропоновано програму моніторингу оцінки якості мастильних матеріалів авіаційного призначення за триботехнічними показниками, яка надає змогу оцінити як експлуатаційні показники мастильного матеріалу, так і його вплив на матеріал контактних поверхонь під час лабораторних та стендових випробувань. Ефективний аналіз мастильних матеріалів та запропонована програма їх моніторингу можуть підвищити ефективність роботи вузлів тертя ПС та АНТ, зокрема, підшипників, деталей двигунів та зубчастих передач, та знизити експлуатаційні витрати.

9. На основі експериментальних досліджень протизношувальних та антифрикційних показників мастильних матеріалів для газотурбінних двигунів визначено перспективність використання оливи ВНІНП-1-50-4у

для покращення ефективності та тривалості служби авіаційного обладнання.

10. Моніторинг якості трансмісійної оливи ТАД-17і під час експлуатації авіаційної наземної техніки на основі лабораторних досліджень виявив вплив температурних змін та старіння оливи залежно від терміну експлуатації на протизношувальні властивості оливи. На основі результатів лабораторних досліджень можуть розроблятися рекомендації щодо терміну заміни мастильного матеріалу, враховуючи допустимий граничний знос зубчастих передач для АНТ.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. J. M. Wakiru, L. Pintelon, P. N. Muchiri, P. K. Chemweno A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 118. P. 108-132.
2. Перелік виданих сертифікатів в системі "10 ХЦ" - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://10xcentr.com.ua/1/289/385/>
3. Ten Ways to Improve Your Lubrication Reliability Programme - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maintworld.com/Applications/Ten-Ways-to-Improve-Your-Lubrication-Reliability-Programme> (дата звернення 29.10.2023)
4. Обзор рынка авиационных смазочных материалов - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.grebenka.com/blog/obzor_rynka_aviacionnykh_smazochnykh_materialov/2022-10-19-11662 (дата звернення 01.11.2023)
5. Net zero carbon 2050 resolution - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet--iata-net-zero-resolution/> (дата звернення 01.11.2023)
6. Німецькі інженери почали виробляти авіаційне паливо зі звичайної води - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dzi.gov.ua/press-centre/news/nimetski-inzhenery-pochaly-vyroblyaty-aviatsijne-palyvo-zi-zvyhajnoyi-vody/> (дата звернення 01.11.2023)
7. Greases - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aeroshell/aeroshell-greases.html> (дата звернення 01.11.2023)
8. Nyco Grease GN 148 - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://spec-ua.com/product/nyco-grease-gn-148/> (дата звернення 01.11.2023)
9. К.И. Грядунов, А.Н. Козлов, М.Л. Немчиков, И.С. Мельникова Диагностика авиационных двигателей по содержанию металлов в маслах. *Civil Aviation High Technologies*. Vol. 22, No. 03, 2019. P.35-44.

10. J. A. Addison, W. M. Needelman Diesel engine lubricant contamination and wear. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://p2infohouse.org/ref/31/30453.pdf> (дата звернення 01.11.2023)
11. McCullagh P.J., Campbell W.E. Application of ferrography to contamination control in fluid power systems. *Wear*. 1983. 90(1):89–100.
12. Zhang, Rc., Yu, X., Hu, Yl. *et al.* Active control of hydraulic oil contamination to extend the service life of aviation hydraulic system. *Int J Adv Manuf Technol* 96, 1693–1704 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0833-9>
13. Sniderman, D. (2020). What it Takes to be a Commercial Aviation Jet Engine Lubricant. *Machine Design*. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21124388/what-it-takes-to-be-a-commercial-aviation-jet-engine-lubricant> (дата звернення 03.11.2023)
14. Boichenko, S., Yakovlieva, A., Kale, U., Nagy, András, Analysis of Technological Potential for Utilization of Waste Aviation Lubricating Materials (April 30, 2021). *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(58)), 26–32, 2021. doi:10.15587/2706-5448.2021.229673, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3847217>
15. Evdokimov, A. Iu., Fuks, I. G., Liubinin, I. A.. *Smazochnye materialy v tekhnosfere i biosfere: ekologicheskii aspekt*. Kyiv: Atika, 2012. 292с..
16. Sethuramiah, A. (Ed.) (2003). *Lubricant technology a survey*. Vol. 42. Tribology Series. Elsevier, 35–65. doi: [http://doi.org/10.1016/s0167-8922\(03\)80005-6](http://doi.org/10.1016/s0167-8922(03)80005-6)
17. The impact of hydrolysis on grease performance - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.exxonmobil.com/en/aviation/knowledge-library/resources/grease-hydrolysis> (дата звернення 01.11.2023)
18. Шматко Д.З., Авер'янов В.С., Сасов О.О., Чернета О.Г. Mathematical modeling of roller wear. *Математичне моделювання*. 2019. № 2(41). С. 109-117. DOI: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(41\)2019.185065](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(41)2019.185065)

19. Коробочка О. М., Скорняков Е. С., Сасов О. О. Основи розрахунків, проектування і експлуатації технічного обладнання для автомобільного транспорту : навч. посіб. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. 226 с.
20. М-10ДМ (SAE 30) олива моторна турбодизельна - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://masla-smazki.com/ua/p172633630-10dm-sae-maslo.html>
21. Корчак Б.О. Регенерація відпрацьованих мінеральних моторних олив. Автореф. дисертації на здобуття наук. Ст. к.т.н. за спеціальністю 05.17.07. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2019. 22с.
22. Liberio P.D., Garver J.M. Lubricity of military jet fuels. *Lubrication Engineering*. 1995. Vol. 51. P. 27–32.
23. Оливи. Моторні, турбінні, гідравлічні та трансмісійні: властивості та якість. Підручник / Сергій Бойченко, Андрій Пушак, Петро Топільницький, Йосип Любінін, Казимир Лейда; за редакцією проф. С. Бойченка. – К.: «Центр учбової літератури», 2019. – 323 с.
24. A. Thirupathi, K. Kamalakar, V. Siddaiah et al. Эпоксацилированные оксикасторполиоловые эфиры: многофункциональное базовое масло для авиационного и судового применения. *Нефтехимия*. 2022. Т. 62, № 6. С. 1059–1070. DOI: 10.31857/S0028242122060260
25. Кравець А.М., Кравець В.Г. Дослідження трибологічних характеристик мастильних матеріалів на чотирикульковій машині тертя: методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Засоби підвищення надійності машин та економії нафтопродуктів". Харків: Українська державна академія залізничного транспорту, 2021. 24с.
26. Gavrilov, K.V., Rozhdestvenskii, Y.V., Khozeniuk, N.A., Doikin, A.A., Hudyakov, V.S., Morozov, A.V., Seleznev, M.V. (2020). Evaluation of anti-friction properties of solid lubricant coatings for a piston skirt of a highforce diesel.

Journal of Friction and Wear, vol. 41, no. 5, pp. 480–485. DOI: 10.3103/S1068366620050104

27. Трибометр штифт-диск TRB³ - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dlu.com.ua/%D0%A2%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80-%D1%88%D1%82%D0%B8%D1%84%D1%82-%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BA-TRB%C2%B3>

28. Про затвердження Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України. НАКАЗ МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ 08.12.2016 № 662 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0060-17#Text>

29. Без унікальної військової лабораторії з Вінниччини польоти військової авіації неможливі як такі - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://armyinform.com.ua/2021/03/12/bez-unikalnoyi-vijskovoyi-laboratoriyi-z-vinnychchyny-poloty-vijskovoyi-aviacziyi-nemozhlyvi-yak-taki/>
(дата звернення 02.12.2023)

30. Березівський Н. Система контролю якості пально-мастильних матеріалів у державній авіації України. XXIII Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки», 4-7 квітня 2023 р. НАУ, Київ

31. Студентська наукова робота на тему: «Попередження забруднення навколишнього природного середовища відпрацьованими моторними оливами» - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%91%D0%9A_%D0%90%D0%9D%D0%A1/VIDPRATS OVANI_MASTYLA.pdf (дата звернення 01.12.2023)

32. Nowak P, Kucharska K, Kamiński M. Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment. *International Journal of*

Environmental Research and Public Health. 2019; 16(16):3002.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16163002>

33. How Waste Oil Affects the Environment - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gte.sg/waste-oil-management/how-waste-oil-affects-the-environment/> (дата звернения 01.12.2023)

34. Abosede E.E. Effect of Crude Oil Pollution on some Soil Physical Properties. *IOSR J. Agric. Vet. Sci.* **2013**, 6, 14–17.

35. Cravedi J., Perdu E. In vitro metabolic study on alkanes in hepatic microsomes from humans and rats. *EFSA Support. Publ.* 2012;**9** doi: 10.2903/sp.efsa.2012.EN-263.

36. Отработанные масла - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecogreenline.com.ua/services/oils> (дата звернения 01.12.2023)