

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ
НАЦІОНАЛЬНОГО АВІАЦІЙНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Факультет авіаційного менеджменту
Кафедра аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху

Мажура Владислав Сергійович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ
ДВИГУНІВ ЗА ВМІСТОМ МЕТАЛЕВИХ ДОМШОК У МАСТИЛАХ
ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЇХ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

ОПП «Авіаційний транспорт»

Освітній ступінь – магістр

«Допустити до захисту»

Завідувач кафедри:

к.т.н., доцент _____ Н.І. Кушнірова

« ____ » _____ 20__ р.

Науковий керівник:

к.т.н., доцент _____ І.І. Єніна

Робота захищена:

« ____ » _____ 2024 р.

з оцінкою _____

Голова ЕК _____

Кропивницький 2024 р.

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: Підвищення ефективності діагностування авіаційних двигунів за вмістом металевих домішок у мастилах для прогнозування їх технічного стану

Автор кваліфікаційної роботи: Мажура В.С.

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

Керівник кваліфікаційної роботи: к.т.н., доцент Єніна І.І.

Рік захисту: 2024

Робота складається з вступу, трьох основних розділів, загальних висновків, списку використаних джерел літератури.

У вступі обґрунтовано актуальність даної теми, а також поставлені основні цілі і завдання дослідження.

У першому розділі проведено детальний огляд сучасних методів діагностування авіаційних ГТД за результатами проб мастильних олив.

У другому розділі проаналізовано ефективність застосування та достовірності методів раннього діагностування ГТД Rolls-Royce, Pratt&Whitney, General Electric, підприємства «Мотор Січ» (турбовентиляторний двигун Д-36) по аналізам проб мастильних олив..

У третьому розділі досліджено та теоретично обґрунтовано параметри методик відбору проб для підвищення ефективності діагностування авіаційних двигунів за вмістом металевих домішок у мастилах. Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення існуючих методик відбору проб з змащувальної системи авіаційних двигунів та способів відбору проб мастильної оливи для підвищення ефективності їх діагностування.

У загальних висновках підведені підсумки дослідження.

Робота обсягом 84 сторінки друкованого тексту, має 27 рисунків, 3 таблиці і 51 найменування літератури.

Ключові слова: мастильна олива, авіаційний двигун, паливно-мастильні матеріали, авіаційна техніка, діагностування, газотурбінний двигун, контрольні елементи.

ANNOTATION

Topic of qualifying work: Improving the efficiency of aircraft engines diagnostics by the content of metal impurities in lubricants to predict their technical condition.

Author of the qualifying work: Mazhura V.S.

Specialty: 272 “Aviation Transport”

Head of qualifying work: PhD Ienina I.I.

Year of defense: 2024

The work consists of an introduction, three main sections, general conclusions, and a list of used literature sources.

The introduction substantiates the relevance of this topic, as well as sets the main goals and objectives of the research.

In the first chapter, a detailed review of modern methods of diagnosing aviation GTEs based on the results of lubricating oil samples was carried out.

In the second chapter, the effectiveness and reliability of the early diagnosis methods of Rolls-Royce, Pratt&Whitney, General Electric, Motor-Sich (turbofan engine D-36) based on analyzes of lubricating oil samples are analyzed.

In the third chapter, the parameters of sampling methods for increasing the efficiency of diagnosing aircraft engines by the content of metal impurities in lubricants are investigated and theoretically substantiated. Recommendations are offered for improving the existing methods of sampling from the lubrication system of aircraft engines and methods of sampling lubricating oil to increase the efficiency of their diagnosis.

The general conclusions summarize the results of the study.

The work is 84 pages of printed text, has 27 figures, 3 tables and 51 references.

Key words: lubricating oil, aircraft engine, fuel and lubricants, aviation equipment, diagnostics, gas turbine engine, control elements.

ЗМІСТ

ВСТУП		7
1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ГТД ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗІВ ПРОБ МАСТИЛЬНИХ ОЛИВ		11
1.1	Феррографічний метод аналізу мастильних олив	12
1.2	Сцинтиляційний метод аналізу мастильних олив	13
1.3	Спектральні методи аналізу мастильних олив	15
	1.3.1 Атомно-емісійні спектральні методи	15
	1.3.2 Атомно-абсорбційні спектрометри	16
	1.3.3 Рентгенофлуоресцентні спектральні методи	17
1.4	Вібраційний аналіз	20
1.5	Магнітний плаг	21
1.6	Гранулометричні аналізатори	22
2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДІВ РАНЬОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ГТД ПО АНАЛІЗАМ ПРОБ МАСТИЛЬНИХ ОЛИВ		24
2.1	Діагностування двигунів Rolls-Royce по аналізам проб мастильних олив	26
2.2	Діагностування двигунів Pratt&Whitney по аналізам проб мастильних олив	27
2.3	Діагностування двигунів General Electric з аналізів проб мастильних олив	29
2.4	Змащувальна система ГТД Д-36 та діагностування проб мастил	31
	2.4.1 Система змащування ГТД Д-36	31
	2.4.2 Діагностування двигунів Д-36 по аналізам проб мастильних олив	44
2.5	Системи діагностування авіаційних двигунів	44
2.6	Вплив відбору проб мастил на діагностування деталей,	49

		вузлів та агрегатів	
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДИК ВІДБОРУ ПРОБ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ЗА ВМІСТОМ МЕТАЛЕВИХ ДОМІШОК У МАСТИЛАХ		55
	3.1	Вибір основних параметрів методик діагностування відбору проб з авіадвигунів	55
		3.1.1 Дослідження гранулометричного складу проб масел на вміст механічних частинок	56
		3.1.2 Дослідження методики діагностування авіаційних двигунів Д-36 рентенофлуоресцентним способом по відбору мастила	68
	3.2	Рекомендації щодо вдосконалення існуючих методик відбору проб з мастилосистеми авіаційних двигунів та способів відбору проб мастильної оливи для підвищення ефективності їх діагностування	76
ВИСНОВКИ			79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			81

ВСТУП

Сучасні темпи зростання перевезень пасажирів у цивільній авіації ведуть до інтенсивного використання газотурбінних двигунів та посилення вимог до підвищення їх надійності в експлуатації. Практика показує, що ресурс газотурбінного двигуна, встановленого заводом виробником, може бути більшим за допомогою застосування ефективних методів оцінки стану вузлів тертя, що дозволяють запобігати появі несправностей агрегатів за наявності металів в мастильній оливі, тому що мастило з точки зору хімотології можна розглядати повноцінним елементом конструкції газотурбінного двигуна.

У середині минулого століття довели можливість раннього діагностування авіаційних двигунів шляхом відбору невеликої кількості працюючої мастильної оливи з мастилосистеми, тим самим започаткувавши новий напрям з розробки методів діагностування пар тертя, що омиваються мастилом.

Діагностування за результатами аналізів проб мастил на наявність у них металів на даний момент має важливе значення в загальній системі діагностування пар тертя авіаційних ГТД (підшипники кочення, шліцеві з'єднання, зубчасті зачеплення тощо), показано на рисунку 1.

Вважається, що підвищення ефективності діагностування авіаційних двигунів досягається шляхом створення більш сучасних приладів розпізнавання механічних домішок у пробах мастильної оливи, розроблення методик, що враховують великий статистичний обсяг, та уточнення цих методик у процесі експлуатації. Прилади ускладнюються з конструктивної точки зору, зменшуються у розмірах, автоматизуються, спрощуються для оператора експлуатації.

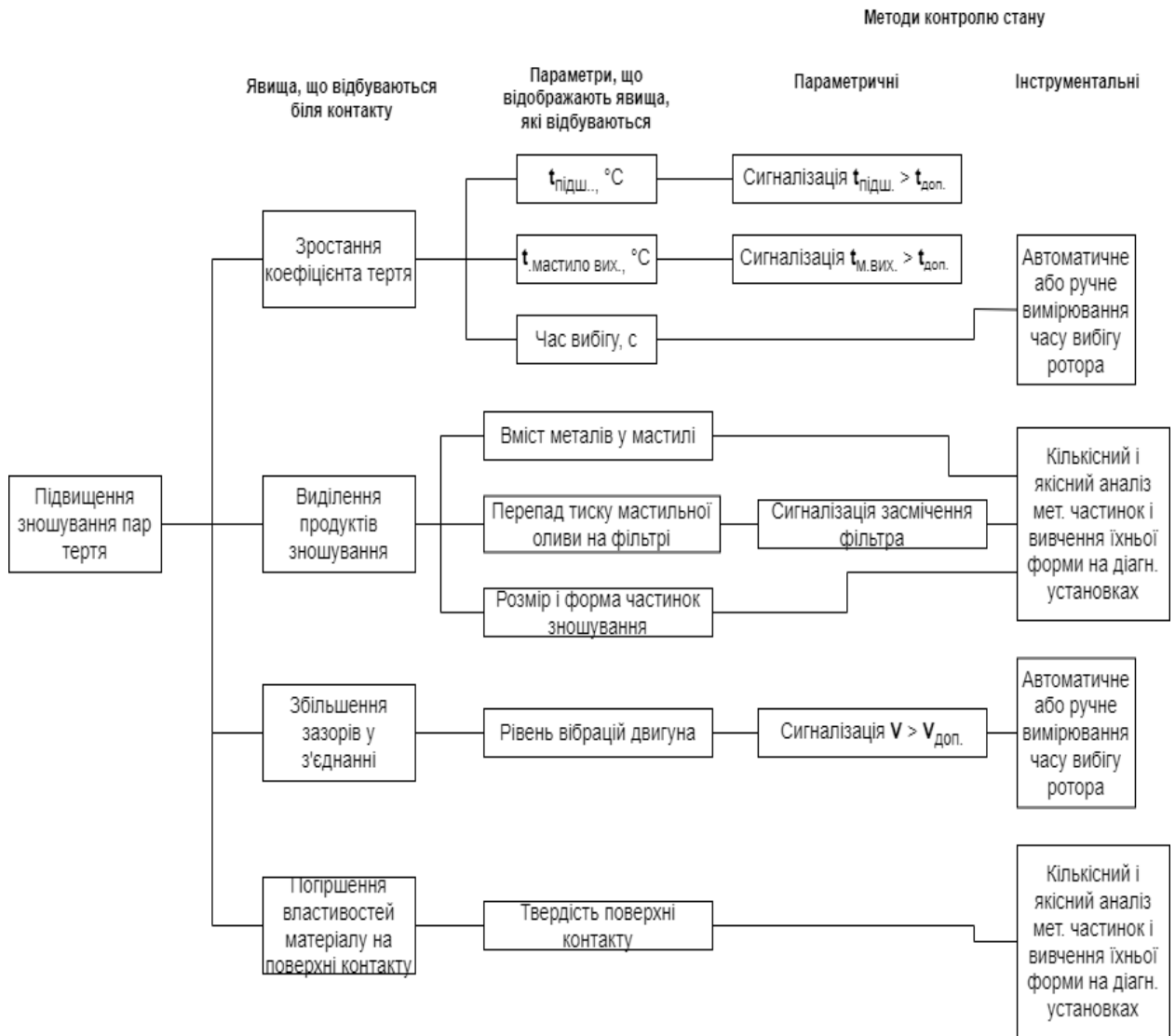


Рисунок 1 - Діагностування пар тертя авіаційних ГТД за різними параметрами

Будь-які сучасні установки з якісного та кількісного визначення домішок у робочих мастильної оливах при їх перевагах та недоліках щодо один одного є досить точними та дозволяють достовірно визначати матеріали частинок та їх кількість у зразках. Похибка вимірювань сучасних приладів не перевищує 15 % (порівняно з приладами 30-річної давності похибка зменшилася вдвічі), а для діапазону концентрацій по експлуатації – 5-7 %.

Але практичне застосування методів в експлуатуючих підприємствах показує їх невисоку практичну ефективність, незважаючи на те, що прилади рекомендуються до використання та використовуються не окремо, а цілими комплексами. Найчастіше методами фіксуються вже зруйновані елементи, а

не початкова стадія руйнування.

Важливим моментом при аналізі проб мастильних олив будь-якими діагностичними методами є відбір достовірних проб. Відбір проб мастильної оливи визначає весь подальший експертний аналіз.

Процедура відбору проб мастильної оливи з двигунів експлуатуючими організаціями має рекомендаційний характер на відміну чітко регламентованого відбору проб при контролі якості нафтопродуктів при прийомі, зберіганні, видачі тощо. Основною причиною низької ефективності застосування сучасних приладів при діагностуванні авіаційних двигунів за вмістом металевих домішок в мастильних оливах вказується відсутність відбираємої інформативності проби.

Тому дуже актуальним є встановлення причин відсутності інформативності проб мастил, що відбираються з авіаційних ГТД для аналізу і дослідження різних параметрів зношування, у тому числі вмісту металів в мастильній оливі за результатами аналізу відбираємих проб.

Також актуальним напрямом є розробка рекомендацій щодо збільшення інформативності проб мастильних олив по частинках зношування та способу відбору проб мастильної оливи з метою підвищення ефективності застосування приладів раннього діагностування для прогнозування технічного стану ГТД.

Актуальність теми. Застосування методів раннього діагностування двигунів для прогнозування їх технічного стану за результатами аналізів проб мастил на вміст механічних домішок є особливо актуальним.

Мета та завдання дослідження. Метою даної магістерської роботи є підвищення ефективності раннього діагностування для оцінки технічного стану ГТД за результатами аналізів проб мастил на вміст в них металів та підвищення надійності ГТД.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання дослідження:**

- встановлення причин низької ефективності результатів аналізів проб робочої мастильної оливи авіаційних ГТД, що відбираються в експлуатації;

- дослідити сучасні методи вимірювання мастильних олиव;
- дослідження можливості визначення стану вузла тертя, що омивається мастильною оливою, за аналізом вмісту металів в оливах при різних способах відбору проб мастильної оливи;
- розробка рекомендацій щодо підвищення інформативності проб мастильної оливи, що відбираються, з авіаційних ГТД для підвищення ефективності оцінки та прогнозування їх технічного стану.

Об'єктом дослідження є авіаційна мастильна олива, як носій інформації про процеси зношування в парах тертя.

Предметом дослідження є методи дослідження проб мастильних олив на металеві домішки.

Методи дослідження. Представлені у магістерській роботі матеріали отримані з використанням методів теорії вимірювань та аналізу систем контролю, математичного моделювання. Під час виконання досліджень використовувалися програмні пакети Microsoft Office, Компас 3D, MathCAD, Matlab.

Наукова новизна роботи полягає в дослідженнях що дозволяють проводити інформативний аналіз проб мастильних олив по металевим частинкам, що відбираються в експлуатації.

Апробація результатів дослідження.

Основні положення проведених у магістерській роботі досліджень доповідалися на XI Міжнародній науково-практичній конференції “Integration of science as a mechanism of effective development”, 28 November - 01 December, 2023, Helsinki, Finland.

Публікації. На тему магістерської роботи опубліковано тези доповіді: Ienina I., Mazhura V. Modern methods for diagnosis of aviation oils in aircraft engine systems. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Helsinki, Finland. 2023. Pp. 380-383.

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ГТД ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗІВ ПРОБ МАСТИЛЬНИХ ОЛИВ

Методи трибодіагностики авіаційних масел використовуються для моніторингу та аналізу стану мастильної оливи та, відповідно, стану двигуна або інших механічних систем. Дозволяють запобігати можливим аваріям та поломкам, більш ефективно планувати та проводити технічне обслуговування та ремонт обладнання, забезпечуючи його надійну та безпечну експлуатацію

Розглянемо методи які можуть застосовуватися для аналізу стану мастил в газотурбінних двигунах.

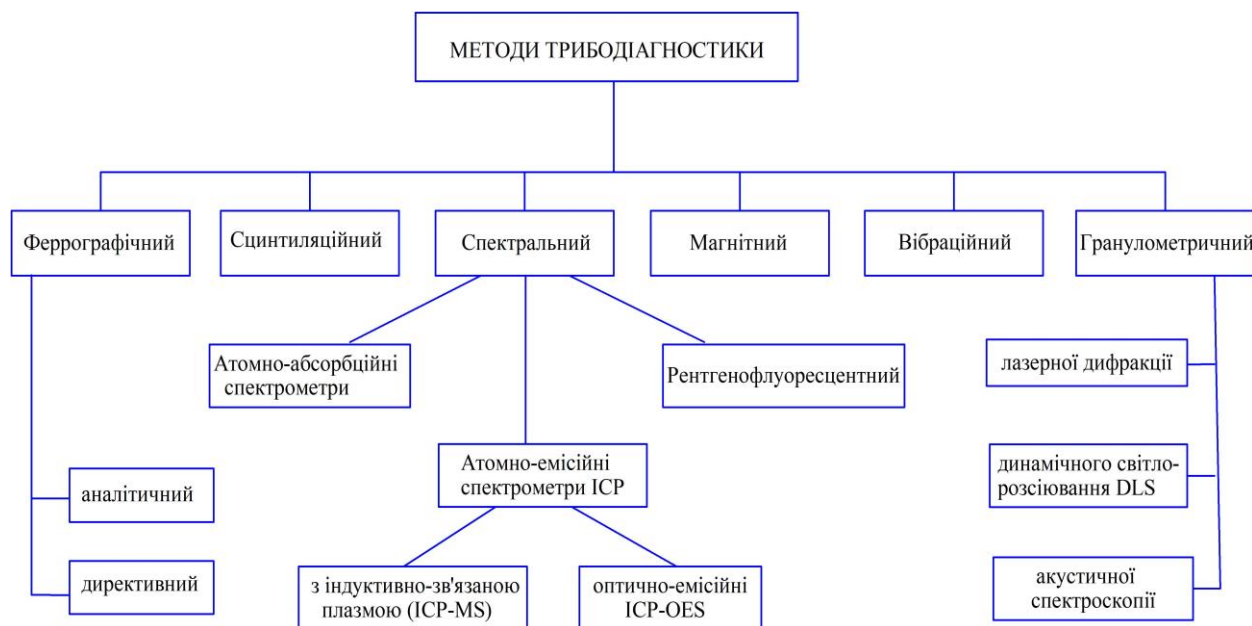


Рисунок 1.1 – Методи аналізу мастил в ГТД

1.1 Ферографічний метод аналізу мастильних олив

Ферографічний аналіз дозволяє визначити розмір та кількість металевих частинок у мастильній оливі, оцінити їх форму і походження за допомогою магнітного поля. Це допомагає оцінити знос та загальний стан механічних систем. Дослідження може бути директивним або аналітичним.

Аналітична ферографія застосовується для кількісного аналізу, при якому відбувається автоматичний підрахунок та класифікація частинок, що допомагає у визначенні ступеня зношування та швидкості його прогресування.

Директивна ферографія застосовується для детального вивчення частинок під мікроскопом, поділяючи частинки за розміром, для визначення конкретних проблем у механічній системі.

Ферографічний метод аналізу полягає в осадженні частинок зношування з проби мастильної оливи в магнітному полі на поверхні скляної пластини з подальшим аналізом на мікроскопі. Частинки з однаковими магнітними властивостями осідають на пластину відповідно до їх розміру: спочатку великі, потім дрібніші. Частинки однакового розміру, але з різними магнітними властивостями осаджуються відповідно до їх магнітної проникності. Метод дозволяє визначити вид зношування, інтенсивність та режими тертя та змащення за формою частинок, станом їх поверхні, розподілом розмірів частинок, матеріалами окремих частинок та наявністю сторонніх домішок.

Сукупність цих параметрів дозволяє ідентифікувати вид зношування, визначити місце можливої відмови та оцінити ступінь небезпеки дефекту. Наприклад, для часток задиру характерні борозни у напрямі руху. У разі утворення на поверхнях тертя втомних мікротріщин при коченні в мастильній оливі з'являються сферичні частинки. При втомному вифарбовуванні утворюються пластоподібні частинки, зазвичай, на їх поверхні є безліч мікрОВИРАЗОК, при корозійному зносі в пробі мастильної оливи з'являється безліч частинок розміром до 2 мкм, при мікрорізанні утворюються частинки у вигляді стружки і т.п.

Метод ферографії використовується не тільки при дослідженні феромагнітних частинок зношування, але і частинок з немагнітних матеріалів. Слабомагнітні та немагнітні матеріали, такі як алюміній, бронза, латунь, графіт, полімерні частинки і т.п., також будуть осаджуватися на ферограмі, тому що містять мікрровключення магнітних матеріалів, наявність яких обумовлено технологічними процесами та процесами тертя та зношування. Метод по суті є оптичним, але на сучасному етапі розвитку практично повністю автоматизований. Проведення ферографічного аналізу дозволяє рано виявляти зношування задовго до того, як воно стане критичним, прогнозувати терміну служби, а саме необхідність ремонту.

В авіації використовуються прилади ферографії: Predict (США), Laser Net Fines (США), Spectro Scientific FerroCheck 2000, Ferrography Laboratory (TANDEM), DR Ferrotest, PCM 400 Portable Condition Monitor, Parker Kittiwake.

1.2. Сцинтиляційний метод аналізу мастильних оливо

Сцинтиляційний метод вимірювання енергетичного спектру заснований на аналізі світлових спалахів (сцинтиляцій), що виникають при взаємодії випромінювання з детекторною речовиною.

Попередньо відібрану та підготовлену пробу мастильної оливи об'ємом 1 мл за допомогою ультразвукового розпилювача перетворюють на дрібнодисперсну золь. Отриманий золь, що складається з крапель рідини та частинок металів, потоком транспортуючого газу безперервно протягом 10 хв вдується в джерело збудження спектрів - повітряну плазму газового розряду НВЧ плазмотрону циклонного типу, температура якої становить близько 5200 К.

Металева частка, що потрапила в плазму, нагрівається, випаровується, і отримана атомна пара збуджується, тобто відбувається спалах (сцинтиляція) частинки. Швидкість надходження аналізованої проби обрана такою, щоб частинки металу мікродомішки надходили до плазми послідовно по одній.

Випромінювання атомної пари за допомогою конденсора надходить на

спектральний прилад - поліхроматор. Розкладене у спектр випромінювання реєструється фотоелектронними помножувачами.

Тривалість імпульсу випромінювання частинки пропорційна часу знаходження її у плазмі та становить 1-10 мс. Тому на виході фотопомножувачів утворюється послідовність імпульсів різних тривалостей та амплітуд. Електричні імпульси з фотопомножувачів надходять на аналогово-цифровий перетворювач та обробляються комп'ютером. У разі одночасної присутності в пробі розчиненого металу та металу у вигляді зносних частинок на виході фотопомножувачів присутній безперервний (фоновий) сигнал, що відповідає розчиненому металу, та імпульсний, - відповідний частинкам зношування.

За спеціальними графіками градуювання імпульсний сигнал перераховується в елементну концентрацію частинок зношування, безперервний - в концентрацію розчиненого елемента. Число спалахів (зареєстрованих імпульсів) пропорційне числу частинок.

Якщо в мастильній оливі присутні одночасно складні частинки металу, що складаються з декількох елементів (наприклад, легована сталь Fe-Mn), і прості, де кожна частка представлена одним елементом, комп'ютер сортує імпульси випромінювання за одночасною їхньою появою.

Збіг за часом двох і більше імпульсів випромінювання вказує на наявність складної частинки і, відповідно, її склад і тип сплаву.

Реєструюча апаратура налаштовується для реєстрації лише імпульсів, амплітуда яких перевищує певний заданий рівень. Число зареєстрованих імпульсів пропорційно кількості частинок, введених у джерело збудження спектрів, а сумарна величина імпульсів - вмісту металевої домішки у пробі. Матеріалом сцинтиляційного детектора в гамма-спектрометрії найчастіше є кристали йодистого натрію активованого талієм, йодистого цезію активованого талієм, а також пластичні сцинтилятори.

Даний метод дозволяє досить точно оцінити домішки, що знаходяться в мастильній оливі. На даний момент установки не поширені.

1.3 Спектральні методи аналізу мастильних олив

Спектроскопія дозволяє визначити присутність і концентрацію мікроскопічних частинок різних металів у мастильній оливі, що може вказувати на знос певних частин двигуна. Головний недолік - не дає інформації про їх розмір або форму частинок. Використовуються:

Спектрометри з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS) або оптична емісійна спектрометрія (ICP-OES), які працюють шляхом іонізації проби з подальшим виміром маси або інтенсивності світла випромінюваних іонів.

Атомно-абсорбційні спектрометри (AAS), працюють на принципі вимірювання поглинання світла атомами металів у пробі.

Розглянемо дані методи більш детально.

1.3.1 Атомно-емісійні спектральні методи

Атомно-емісійний спектральний аналіз – це метод визначення хімічного складу речовини за спектром випромінювання його атомів під впливом джерела збудження (дуга, іскра, полум'я, плазма).

Пробу досліджуваної речовини вводять у джерело випромінювання, де відбуваються її випаровування, дисоціація молекул і збудження утворених атомів (іонів). Останні випромінюють характерне випромінювання, яке надходить у реєструючий пристрій спектрального приладу.

При якісному атомно-емісійному спектральному аналізі (ICP-MS) спектри проб порівнюють зі спектрами відомих елементів, наведених у відповідних атласах та таблицях спектральних ліній, і таким чином встановлюють елементний склад аналізованих речовини. При кількісному аналізі визначають кількість (концентрацію) шуканого елемента в аналізованій речовині залежно від величини аналітичного сигналу (щільність почорніння або оптичну щільність аналітичної лінії на фотопластинці; світловий потік на фотоелектричний приймач) іскомого елемента від його вмісту в пробі. Ця залежність складним чином визначається багатьма важко контрольованими факторами (склад проб, їх структура, дисперсність,

параметри джерела збудження спектрів, нестабільність реєструючих пристроїв, властивості фотопластинок тощо). Тому, як правило, для її встановлення використовують набір зразків для градування, які за складом і структурою можливо ближчі до аналізованої речовини і містять відомі кількості визначаємих елементів.

Такими зразками можуть бути спеціально приготовлені металеві сплави, суміші речовин, розчини, зокрема і державні стандартні зразки (ДСЗ). Для усунення впливу результати аналізу немінучих відмінностей властивостей аналізованого і стандартних зразків використовують різні прийоми; наприклад, порівнюють спектральні лінії обумовленого елемента і так званого елемента порівняння, близького за хімічними та фізичними властивостями до шуканого. При аналізі однотипних матеріалів можна застосовувати одні й ті ж градувальні залежності, які періодично коригують за повірочними зразками.

Чутливість та точність АЕСА залежать головним чином від фізичних характеристик джерел збудження спектрів - температури, концентрації електронів, часу перебування атомів у зоні збудження спектрів, стабільності режиму джерела тощо.

Атомно-емісійні спектрометри: типу МОА (США), Spectroil - М (США) та ін.

1.3.2 Атомно-абсорбційні спектрометри

Атомно-абсорбційні методи (ААС) ґрунтуються на властивостях атомів поглинати світло з певною довжиною хвилі (резонансне поглинання).

Через шар атомної пари проби, одержуваних за допомогою атомізатора, пропускають випромінювання в діапазоні 190-850 нм. Внаслідок поглинання квантів світла атоми переходять у збуджені енергетичні стани. Цим переходам в атомних спектрах відповідають резонансні лінії, характерні для цього елемента.

Переведення аналізованого об'єкта в атомізований стан та формування

поглинаючого шару пари певної та відтворюваної форми здійснюється в атомізаторі.

Введення проб у поглинаючу зону полум'я або печі здійснюють різними прийомами. Розчини розпорошують (зазвичай в полум'я) за допомогою пневматичних або ультразвукових розпилювачів.

Пройшовши через фотопомножувач, результати фіксуються реєструючою апаратурою.

Методом атомно-абсорбційної спектрометрії (AAS) можуть визначатися близько 60 елементів (переважно метали та ряд перехідних елементів).

Найвищу чутливість в AAS мають прилади з електротермічною атомізацією, в яких проба залишається в замкнутому об'ємі кювети і не виноситься газовим потоком, тим самим більша кількість атомів проби поглинають випромінювання лампи і чутливість визначення зростає на 2-3 порядки в порівнянні з плазмовою або ін. видами атомізації.

Атомно-абсорбційні спектрометри: Agilent (США), AAnalyst (США).

1.3.3 Рентгенофлуоресцентні спектральні методи

Рентгенівська флуоресценція (XRF) використовується для визначення та кількісного аналізу склад металевих частинок у мастильній оливі. Не дає інформації про їх розмір або форму.

Установки XRF аналізують вторинне випромінювання, яке випромінюється матеріалом при його опроміненні рентгенівськими променями.

Рентгенофлуоресцентний метод використовується для визначення концентрацій елементів від берилію до урану в діапазоні від 0,0001% до 100% масового вмісту в речовинах різного походження.

Аналіз вмісту металів у мастильній оливі, дозволяє з високою точністю визначити вміст до 40 елементів, що знаходяться в пробі.

Метод ґрунтується на залежності інтенсивності рентгенівської

флуоресценції від концентрації елемента у зразку.

Відібраний зразок рідини об'ємом більше 25 мл прокачується через фільтр з тонкістю фільтрації 0,9 - 1,1 мкм для осадження на ньому механічних домішок. Фільтр встановлюється у кювету рентгенофлуоресцентного аналізатора.

При опроміненні зразка потужним потоком випромінювання рентгенівської трубки виникає характеристичне випромінювання флуоресцентне атомів, яке пропорційно їх концентрації в зразку. Випромінювання розкладається в спектр за допомогою кристал-аналізаторів, далі за допомогою детекторів та лічильної електроніки вимірюється його інтенсивність. Математична обробка спектра дозволяє проводити кількісний та якісний аналіз.

Коли атоми зразка опромінюються фотонами з високою енергією - збуджуючим первинним випромінюванням рентгенівської трубки це викликає випромінювання електронів. Електрони залишають атом. Як наслідок, в одній або більше електронних орбіталях утворюються "дірки" - вакансії, завдяки чому атоми переходять у збуджений стан, тобто стають нестабільними. Через мільйонні частинки секунди атоми повертаються до стабільного стану, коли вакансії у внутрішніх орбіталях заповнюються електронами із зовнішніх орбіталей. Такий перехід супроводжується випромінюванням енергії у вигляді вторинного фотона - цей феномен і називається "флуоресценція".

Джерелом збуджуючого (первинного) випромінювання високої енергії є рентгенівська трубка, що живиться високостабільним генератором високої напруги. Механізм виникнення первинного випромінювання схожий на механізм флуоресценції, за винятком того, що збудження матеріалу анода трубки відбувається при його бомбардуванні електронами високих енергій, а не рентгенівським випромінюванням, як при флуоресценції. Спектральний склад випромінювання трубки залежить від вибору матеріалу анода. Для більшості областей застосування оптимальним є родієвий анод, хоча інші матеріали, наприклад молібден, хром або золото, можуть бути кращими у

певних випадках. Для вивчення концентрації будь-якого елемента в зразку необхідно із загального потоку випромінювання, що надходить від проби, виділити випромінювання такої довжини хвилі, яка є характерною для досліджуваного елемента. Це досягається розкладанням сумарного потоку випромінювання, що надходить від проби, по довжинах хвиль та отриманням спектру.

Для розкладання випромінювання у спектр (виділення різних довжин хвиль) використовуються кристал-аналізатори з кристалічними площинами, паралельними поверхні та мають міжплощинну відстань. Для збільшення селективності та чутливості апаратури, вимірювання спектру досліджуваної проби в широкому діапазоні енергій проводять за допомогою кількох кристал-аналізаторів з різних матеріалів. Монокристали, такі як германій, фторид літію, антимонід, індія є ідеальними аналізаторами для випромінювання багатьох елементів.

Аналіз та обробка результатів вимірювань проводиться в автоматичному режимі. Для цього розроблено методики аналізу багатьох елементів для різних типів речовин. Методики реалізовані у виді комп'ютерних програм. Під час вимірювання комп'ютер керує всіма вузлами спектрометра відповідно за заданою програмою аналізу. Рентгенофлуоресцентні спектрометри: БРА-17-02, Призма та ін.

1.4 Вібраційний аналіз

Вібраційний аналіз застосовується для виявлення змін у вібрації двигуна, які можуть вказувати на проблеми. Цей аналіз може проводитися за допомогою портативних віброаналізаторів або складніших систем моніторингу стану.

Він зазвичай не використовується безпосередньо для виявлення металевих частинок у мастильних оливах. Цей метод більше пов'язаний з моніторингом та аналізом вібрацій механічних систем та компонентів для

виявлення ознак зношування або несправності. Тим не менш, опосередковано вібраційний аналіз може вказувати на проблеми, які можуть призвести до появи металевих частинок мастила.

Принципи вібраційного аналізу:

Спеціалізовані датчики вібрації встановлюються різних частинах машини чи двигуна. Ці датчики вимірюють вібрації та передають дані на аналітичний пристрій або систему моніторингу.

Зібрані дані аналізуються визначення характеристик вібрації, таких як частота, амплітуда і фаза. Аналіз може виявити незвичайні вібраційні патерни, які можуть свідчити про проблеми в роботі машини.

На основі змін у вібраційних патернах можна діагностувати різні види проблем, включаючи незбалансованість, несправність підшипників, зношування зубчастих коліс та інші дефекти, які можуть призвести до утворення металевих частинок в мастильній оливі.

Хоча вібраційний аналіз сам по собі не виявляє металеві частинки в мастилі, він може бути раннім попереджувальним сигналом про проблеми, які можуть призвести до появи.

Так підвищена вібрація може вказувати на знос підшипників, що починається. Якщо цей знос продовжиться, він може призвести до утворення металевих частинок, які потраплять у мастильну оливу.

Незбалансованість ротора може спричинити нерівномірне зношування і, зрештою, відмову компонентів, результатом чого стане поява металевих частинок в мастилі.

1.5 Магнітний плаг

Магнітний плаг – це простий метод для визначення наявності металевих частинок у маслі газотурбінних двигунів та інших механічних систем.

Цей метод використовує магніт для тяжіння металевих частинок з мастильної оливи. Магнітний плаг вставляється в систему мастила і

періодично перевіряється на наявність частинок, що прилипли. Хоча цей метод менш точний та інформативний, ніж ферографія, він простий у використанні і може бути швидким індикатором зношування.

Магнітний плаг складається з магніту або магнітного матеріалу, який вставляється в потік мастильної оливи. Магніт притягує до себе феромагнітні частинки (зі сталі, заліза та інших металів), що знаходяться у мастилі. Частинки можуть бути результатом природного зносу, корозії чи інших несправностей двигуна.

Під час роботи двигуна або системи магнітний плаг безперервно притягує до себе металеві частинки. Періодично плаг витягується для огляду. На ньому можуть бути видно металеві стружки та частинки різних розмірів. Розмір і кількість уловлених частинок можуть змінюватись в залежності від стану та зносу компонентів. Після кожної перевірки магнітний плаг необхідно очистити від прилиплих частинок, щоб він був готовий до подальшої експлуатації.

Дозволяє оперативно виявити збільшення кількості металевих частинок, що може вказувати на прискорене зношування або початок несправності.

Магнітний плаг не дає інформації про неферомагнітні частинки та не може визначити точне походження частинок. Також для аналізу частинок потрібен регулярний огляд, що може бути не завжди зручним в умовах експлуатації.

1.5 Мікроскопія

Використання мікроскопа для візуального вивчення зразків мастильних олив у газотурбінних двигунах (ГТД), особливо для виявлення та аналізу металевих частинок та інших забруднень.

При проведенні мікроскопії для аналізу мастильної оливи у ГТД береться зразок мастила і розміщується на предметному склі для мікроскопії. Зразок може бути пофарбований або оброблений для кращого виявлення

частинок. Для детального вивчення застосовують електронні мікроскопи, які сканують або просвічують, здатні виявляти частинки нанометрового розміру. Знайдені частинки аналізуються за розміром, формою, кількістю та типом. Форма та розмір можуть дати інформацію про тип зношування (абразивний, адгезивний, корозійний тощо).

Мікроскопія дозволяє побачити частинки, які неможливо виявити неозброєним оком або іншими методами. Вона може точно визначити розмір, форму та приблизний тип частинок, допомагаючи визначити джерело зношування або забруднення.

1.6 Гранулометричні аналізатори

Гранулометричний аналіз відноситься до фізичних методів аналізу, заснований на вимірі фізичних властивостей частинок (розміру та концентрації) і використовується для визначення розміру та розподілу частинок у мастильних оливах.

Цим методом визначають ступень зношування внутрішніх частин двигуна; оцінюють ефективність фільтрації та прогнозують термін заміни мастила.

Гранулометричні аналізатори побудовані на різних методах вимірювання розміру частинок:

- лазерної дифракції, тобто властивості частинок розсіювати світлові хвилі визначення їх розміру.
- динамічного світлорозсіювання (DLS), аналізує зміни в інтенсивності розсіяного світла, викликані рухом частинок для визначення їх розміру.
- акустичної спектроскопії, по аналізу ультразвукових хвиль швидкості і згасання звуку для вимірювання розміру частинок рідини.

Деякі гранулометричні аналізатори використовують мікроскопічні зображення для візуального підрахунку та вимірювання частинок.

2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДІВ РАНЬОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ГТД ПО АНАЛІЗАМ ПРОБ МАСТИЛЬНИХ ОЛИВ

Напочатку розвитку засобів діагностування пар тертя за продуктами зношування в мастильних оливах, проведені в достатньому кількості дослідження показували такі похибки вимірів приладів: МФС-5 - 5-18%, МФС-2 - 8-15%, ІСП-28 - 20%, установки МФС - 5-15%, похибка спектральних методів - 10-30%, значення відносних похибок приладів: БАРС-3 - 15%, МФС - 35%.

Суттєвий внесок у формуванні даних похибок вносили і стандартні зразки, створення яких викликає значні труднощі досі. Сучасні установки з якісного та кількісного визначення домішок у робочих мастильної оливах при їх перевагах та недоліках є досить точними та дозволяють достовірно визначати матеріали частинок та їх кількість у зразках.

Однак практичне застосування методів у експлуатуючих підприємствах

показує їх низьку практичну ефективність, не дивлячись на те, що прилади рекомендуються до використання і використовуються не окремо, а цілими комплексами. Найчастіше методами фіксуються вже завершальні етапи руйнування деталей чи вузлів, а не початковій стадії і часто зустрічаються пропуски дефектів.

Статистичні дані, в доступних для дослідження джерелах, щодо ефективності застосування засобів раннього діагностування показують, що з 2010 по 2018 р у авіаційних підприємствах жодного випадку знімання двигуна за результатами аналізів мастильних олив не відбувалося.

При цьому є статистичні дані, які приведено у таблиці 1.1, щодо зняття двигунів зі спрацьовуванням аварійних сигналізаторів «Стружка в мастильній оливі».

Таблиця 1.1 - Статистичні дані авіаційних підприємств України.

Знімання двигунів зі спрацьовування аварійних сигналізаторів «Стружка в мастильній оливі».

Рік	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Сумарне напрацюва ння, 10 ³ год	57,8	62	74,3	80,1	104,1	92,1	80	80,1	95,9
СМ	3	4	0	1	2	1	2	1	2

За цими даними можна оцінити достовірність методів діагностування двигунів. Відповідно до ДСТУ 2389-94 «Технічне діагностування та контроль технічного стану» та ДСТУ 9118:2021 «Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій» достовірність технічного діагностування – це ступінь об'єктивної відповідності результатів діагностування (контролю) дійсного технічного стану об'єкта. Вона може бути розрахована за формулою:

$$Д = 1 - (P_I + P_{II}), \quad (1.1)$$

де

P_I - ймовірність помилкової відмови (помилка першого роду), тобто умовна ймовірність отримання рішення "не придатний" при контролі параметра, значення якого насправді відповідає вимогам технічної документації;

P_{II} – ймовірність невиявленої відмови (помилка другого роду), тобто умовна ймовірність отримання рішення «придатний» при контролі параметра, значення якого насправді не відповідає вимогам технічної документації.

Враховуючи вище наведені дані щодо ефективності методів трибодіагностики можна дати оцінку достовірності.

Таким чином, значення достовірності методів діагностування в експлуатації складає від 0 до 0,05. Сумарна ймовірність помилки методів (першого та другого роду) - 0,95. Тобто, методи для діагностування ГТД за параметрами продуктів зношування в оливі працюють не зовсім достовірно.

Тому далі є актуальним розгляд діючих методик діагностування різних ГТД по аналізам проб мастильних олив та рекомендацій до них.

2.1 Діагностування двигунів Rolls-Royce по аналізам проб мастильних олив

За допомогою трибодіагностичних методів виявляється до 55% відмов, за допомогою вібраційних – 24%, візуального контролю – 10%. Інші 11% припадають на контроль параметрів циклу, контроль температури оливи, що відкачується від опор і т.п. При цьому під трибодіагностикою розуміється дослідження форми, розмірів та кількості частинок зношування, уловлених магнітними пробками та мастилофільтрами.

Рекомендації щодо використання спектральних способів вимірювання вмісту металевої домішки в мастильній оливі в посібнику експлуатації двигунів Rolls-Royce (RR) відсутні. Фахівці RR пояснюють це тим, що частинки зношування несправного підшипника зазвичай мають великий

розмір, і спектральні методи вносять велику похибку в вимірювання їхнього вмісту. Негативне відношення RR до спектральних способів підтверджують і експлуатанти: так були випадки дострокового зняття двигунів з крила за результатами спектрального аналізу, у яких дефект при заводських дослідження не підтверджувався.

Особлива увага приділяється візуальному дослідженню частинок зношування, уловлених основним мастилофільтром. Для цього демонтований мастилофільтр промивається гасом, який проціджується через фільтрувальний папір. Додатково з колодязя мастилофільтра збирається олива і також проціджується через фільтрувальний папір. Рішення щодо технічного стану двигуна приймається виходячи з розмірів, форми та кількості частинок.

2.2 Діагностування двигунів Pratt&Whitney по аналізі проб мастильних олів

Вимірювання вмісту металевої домішки в мастилі для двигунів Pratt&Whitney (PW) проводиться двома атомно-емісійними способами - способом з використанням ІСР плазми (індуктивно-зв'язаної плазми) як джерело збудження спектрів і способом, що використовує дуговий розряд і подачу проби в нього зі спеціальної ванни обертальним дисковим електродом. При цьому пробопідготовка для спектрометра з плазмою ІСР може бути виконана у двох варіантах. В ІСР може вводитися проба, попередньо розведена бензином для зниження в'язкості, з метою отримання дрібнодисперсного золю при розпиленні проби у плазму. У другому варіанті проба мастильної оливи обробляється кислотами. У цьому випадку ІСР подається розчин, в якому метал у вигляді частинок зношування відсутній, оскільки знаходиться в розчиненому стані.

Відбір проб олів на спектральний аналіз здійснюється пізніше, ніж через 15-30 хвилин після зупинки двигуна. Періодичність відбору проб у компанії British Airways 100 годин, в авіакомпаніях JAL та TAP – 200 годин.

При прояві зовнішніх ознак дефекту часовий інтервал відбору проб може бути знижено до 25 годин.

Граничні значення по допустимому вмісту металів у оливі фірмою PW не встановлюються. Експлуатантам двигунів рекомендується встановлювати граничні значення самостійно.

Фахівці PW розглядають спектральний аналіз як один із кількох методів діагностики і вважають його застосування обов'язковим. Це пов'язано з тим, що авіакомпаніями зафіксовано безліч випадків, коли спостерігалися проблеми з вузлами та агрегатами в системі змащення двигуна, водночас час показання спектральних методів були відсутні. Тому остаточне рішення щодо можливості продовження експлуатації двигуна приймається з урахуванням цілого ряду інших методів контролю: витрати мастильної оливи, температури відкачуваного мастильної оливи від опор підшипників, результатів огляду магнітних пробок, масляних фільтрів (МФ) тощо.

В окремих випадках, коли частинки, уловлені МП, або МФ достатньо великі (більше 100 мкм), може бути проведена ідентифікація марки сплаву, від якого частинки відокремилися. Для вирішення завдання щодо аналізу таких частинок рекомендується використовувати досить велику кількість спектральних апаратних засобів:

а) мікросондові аналізатори типу SEM/EDX. Ця техніка особливо корисна для визначення елементного складу частинок зношування, починаючи з розмірів одиниць мікрометрів та більше. При дослідженні макрочасток (розмір більше 100 - 200 мкм) особлива увага повинна приділятися результатам аналізу у зв'язку з високим дозволом (близько 0,1 мкм) досліджуваних областей частки;

б) спектрометри із індуктивно зв'язаною плазмою (ICP спектрометри). ICP спектрометри є високоточним обладнанням при вимірі складу частинки масою кілька міліграмів. Проте пробопідготовка (кислотне розчинення частки) займає більшу частину часу аналізу. Тому метод рекомендується або у випадках виявлення досить великої стружки, або коли ICP спектрометр -

єдине доступне обладнання;

в) рентгенофлуоресцентна апаратура. Рентгенофлуоресцентні аналізатори рекомендується використовувати у випадках виявлення на магнітних пробках помірної кількості гомогенного матеріалу. Перевага даних аналізаторів - малий час, який витрачається виконання аналізу;

г) дуговий чи іскровий атомно-емісійний спектрометр. Ця техніка дуже трудомістка і рекомендується до використання тоді, коли потрібна загальна некатегорична інформація.

У посібнику з експлуатації особливо наголошується, що при використанні будь-якого з перерахованих вище методів склад стандартних зразків, що використовуються для градування даного обладнання повинен бути ідентичний складу аналізованої стружки. Однак і в цьому випадку інтерпретація отриманих результатів досить складна.

2.3 Діагностування двигунів General Electric з аналізів проб мастильних олів

Авіаційні компанії, що експлуатують двигуни фірми General Electric (GE), використовують два методи контролю вузлів тертя, що омиваються мастилом: виявлення стружки на контрольних елементах (КЕ) (контрольні магнітні пробки, сітки в насосах відкачування, фільтри) та спектрометричний аналіз проб мастильних олів.

У посібнику з експлуатації двигунів наведені докладні відомості на вигляд частинок, які можуть бути виявлені на КЕ. При виявленні металевих частинок КЕ потрібно визначити джерело їх появи. Для цього можуть встановлюватись додаткові магнітні пробки в місця, які при нормальній роботі двигуна заглушені. Крім форми частинок, точна ідентифікація марки матеріалу та визначення джерела стружки проводиться за допомогою спектрального аналізу.

Посібником з експлуатації передбачено також спектрометричний аналіз проб мастильних олів. Для цього застосовуються атомно-емісійні або

атомно-абсорбційні спектрометри. Добір проб на аналіз рекомендується виконувати через 200 годин. При цьому огляд магнітних пробок провадиться через 100 годин.

Найбільш важливими металами для оцінки технічного стану двигуна є залізо та титан. Мідь, алюміній, нікель, цинк, хром та срібло відносяться до вторинних ознак при визначенні дефекту. Фосфор та кремній дозволяють оцінювати ступінь забрудненості мастильної оливи.

Кожен експлуатант може встановлювати свої граничні норми та коло заходів у випадках збільшення вмісту металевої домішки. Стан вузлів тертя оцінюється фактично за швидкістю зміни вмісту:

- помірно виражена тенденція збільшення вмісту міді та заліза є характеристикою підвищеного зношування шліцевих сполук, заліза – при прослизі тіл кочення, викликаного перекосом підшипника, ослабленням кріплення горизонтальної шестерні та подальшим її перекосом;

- негайна перевірка двигуна повинна початися при раптовому та великому збільшенні вмісту заліза (до 10-12 г/т) або при одночасному збільшенні вмісту заліза та міді до 5-7 г/т. Такі результати свідчать про несправність підшипників;

- при збільшенні вмісту титану до 4-5 г/т необхідно зробити знімання двигуна, оскільки зволікання може призвести до дорогих наслідків. Найбільш ймовірними дефектами в цьому випадку є: знос підшипника вентилятора та (або) підвищений знос валу ротора компресора високого тиску (КВТ).

Досвід застосування спектрального методу показав, що, крім Cu, вторинні елементи (Al, Ni, Zn, Cr, Ag) не забезпечують надійного виявлення дефектних деталей. Тим не менш, у деяких випадках виявлення в пробі мастильної оливи перерахованих елементів допомогло виявити та локалізувати дефекти.

Посібник з експлуатації містить відомості про поєднання елементів, що допомагають виявляти дефекти різних деталей:

- Fe, Cu – дефект підшипників, Ag може грати роль непрямой індикації підвищеного зношування сепаратора;

- Fe, Si, Zn - дефект підшипників проміжного редуктора або підшипників нагнітальних і відкачувальних насосів;
- Fe, Cr – ослаблення кріплення конічної горизонтальної шестерні коробки приводів (КП), несправності підшипників КП;
- Fe, Ni, Cr - прослизання внутрішньої обойми підшипника на хромованому валу, знос бігових доріжок підшипників;
- Ti, Fe, Ni, Al - обертання внутрішньої обойми підшипника на валу ротора КВД;
- Ti, Fe, Cr - обертання внутрішньої обойми підшипника на шийці валу вентилятора.

2.4 Змащувальна система ГТД Д-36 та діагностування проб мастил

2.4.1 Система змащування ГТД Д-36

Система змащування двигуна турбореактивного двухконтурного двигуна Д-36 - автономна циркуляційна і забезпечує подачу мастила для змащування і охолодження деталей двигуна. Використовується в пасажирсько-транспортному Ан-72 та багатоцільовому Ан-74.



Рисунок 2.1 - Зовнішній вигляд двигуна Д-36

У конструкції сучасних авіаційних ГТД широке застосування знаходять зубчасті передачі та підшипники кочення, деталі яких працюють в умовах тертя. Деталі, які працюють в умовах тертя, потребують змащення.

Призначення мастила полягає в підтримці нормального температурного стану деталей, у зменшенні їх зношування і втрат на тертя, запобігання деталей від корозії і відведення продуктів зносу із зони тертя. Крім того, часто мастильна олива використовується і як робоче тіло в гідромеханізмах, розташованих на двигуні. Тому двигуни оснащуються змащувальною системою.

Змащувальна система виконує такі функції: зберігання мастильної оливи, постійну подачу мастильної оливи під необхідним тиском до вузлів тертя, відведення мастильної оливи від цих вузлів, охолодження та підтримання необхідної чистоти оливи, контроль параметрів.

Нагрів підшипників кочення, що застосовуються в ГТД, обумовлюється пружною деформацією кульок або роликів і бігових доріжок кілець підшипників під навантаженням, що діє на них. При деформації елементів підшипника та поверненні з деформованих ділянок у вихідне положення виникає внутрішнє тертя між частинками металу, що призводить до нагрівання.

Для підтримки температури підшипників у необхідних межах рекомендується підтримувати температуру мастила на виході не вище 130°C і на вході в межах $60-80^{\circ}\text{C}$ на режимі роботи двигуна. При цьому оптимальний перепад температур мастильної оливи t_2-t_1 (t_1 , t_2 - температура вхідна і вихідна) бажаний в межах $20...40^{\circ}\text{C}$. На двигуні Д-36 тепловіддача в мастило дорівнює $650+-2550$ кДж/хв при прокачуванні мастильної оливи 18 л/хв.

Витрата мастильної оливи в ГТД двигуні Д-36 витрата мастильної оливи не більше 0,8 л/год.

Оскільки до підшипників кочення підводиться мастило головним чином для їх охолодження, то доцільно застосовувати малов'язкі мастила, що мають низьку температуру застигання, що зменшує втрати на тертя кульок і роликів про мастило та полегшує запуск двигуна при низьких температурах навколишнього повітря. В двигуні Д-36 як основне застосовується мастило ПМ-10, а як резервне - ВНИИИМП 50-1-4Ф.

Для кращого охолодження підшипника мастило, що подається до нього, повинно омивати якомога більшу поверхню його елементів.

Двигун Д-36 має автономну циркуляційну систему змащення. У систему змащення входять такі основні вузли (рис. 2.2):

- мастилобак 5;
- паливно-масляний агрегат (ПМА), що складається з паливно-масляного радіатора 9 та термодіафрагми;
- мастилоагрегат, що складається з нагнітальної секції 30, чотирьох відкачувальних секцій 22, редукційного 23 і зворотнього 31 клапанів, фільтра тонкого очищення 28 і датчика 32 з сигналізатором 24 перепаду тиску на мастилофільтрі (сигналізатора засмічення мастилофільтра).
- повітрявідділювач 10 з фільтром грубого очищення 11, перепускним клапаном 13 і датчиком перепаду тиску на фільтрі грубого очищення 16;
- стружкосигналізатор 17;
- термостружкосигналізатори 26;
- датчик 29 та показчик 21 температури мастильної оливи на вході в двигун;
- датчик 25 з показчиком 19 тиску мастильної оливи на вході в двигун;
- сигналізатор 20 мінімального тиску мастильної оливи на вході в двигун;
- датчик 4 з показчиком 2 рівня мастильної оливи в баку;
- сигналізатори 1 рівня мастильної оливи в баку;
- трубопроводи, канали масляної системи та форсунки.

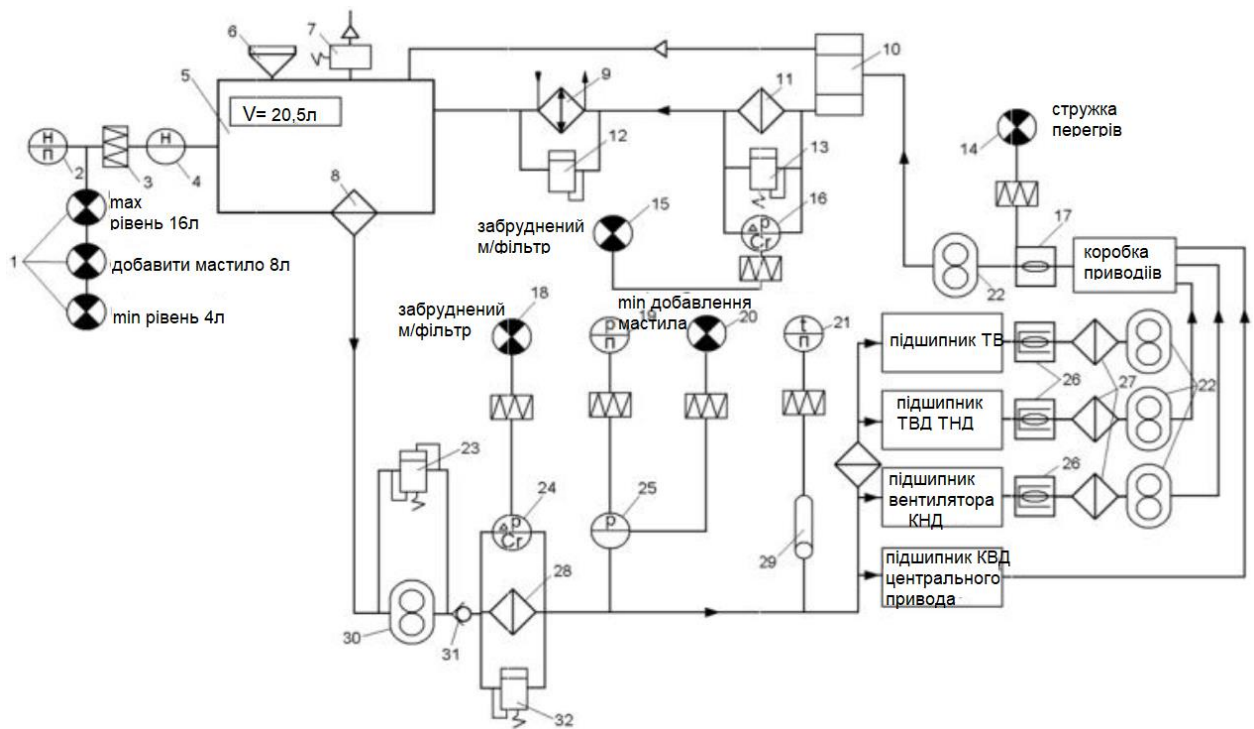


Рисунок 2.2 - Схема змащувальної системи та системи суфлювання двигуна:

1 - сигналізатори мастиломіру; 2 - мастиломір; 3 – передача електричного сигналу; 4-датчик рівнеміру; 5 - мастилобак; 6 -. заправна горловина з фільтром; 7 – запобіжний клапан; 8 -запобіжний мастилофільтр; 9 - паливно-мастильний агрегат; 10 -повітровідділювач; 11 - фільтр грубої очистки; 12 – термо-клапан; 13 – перепускний клапан; 14 - сигналізатор стружки в мастильній оливи та перегріву; 15 - сигналізатор засмічення фільтра грубої очистки; 16 - датчик перепаду тиску на фільтрі грубої очистки; 17 - стружкосигналізатор; 18 - сигналізатор засмічення фільтра тонкого очищення; 19 - показчик тиску мастильної оливи; 20 - сигналізатор мінімального тиску мастильної оливи; 21-показчик температури мастильної оливи; 22 - секції мастилоагрегату, що відкачують; 23 - редукційний клапан; 24 - сигналізатор перепаду тиску на фільтрі тонкого очищення; 25 - датчик вимірювання тиску; 26 - термостружкосигналізатор; 27 - запобіжний фільтр насосів; 28 - фільтр тонкого очищення; 29 - датчик температури мастильної оливи; 30 - нагнітальна секція мастилоагрегату; 31 - зворотний клапан; 32 - датчик перепаду тиску на фільтрі тонкого очищення.

Мастильна олива на підшипники роторів подається форсунками. Перед форсунками встановлені запобіжні фільтри. Далі з порожнин підшипників

вентилятора, компресора низького тиску та турбін відкачується секціями 22. З порожнини підшипників ротора компресора ГД мастило самопливом зливається в коробку приводів, по дорозі змащуючи та охолоджуючи деталі центрального приводу та колонки приводів. Мастило, що відкачується, зі всіх порожнин зливається в масляну порожнину коробки приводів. З піддона коробки приводів все мастило, пройшовши стружкосигналізатор 17, відкачується основний відкачує секцією 22 і по каналу в коробці приводів направляється в відцентровий повітровідділювач 10. Відокремлене повітрявідділювачем від повітря мастило надходить для охолодження в паливно-масляний агрегат 9.

Тиск масла на вході в двигун заміряється за допомогою датчика та показника 25, а мінімальний тиск фіксується за допомогою сигналізатора 20. Тиск мастила на вході в двигун підтримується в межах:

$-3,5 \pm 0,5$ кгс/см² - на землі при частоті обертання $n_{ГД} = 95\%$ та температурі мастильної оливи на вході в двигун $70 \pm 15^{\circ}\text{C}$;

$-2,0 \dots 4,5$ кгс/см² - всіх режимах і висотах польоту.

Температура мастила на вході в двигун контролюється показаннями датчика 29 і показника 21. У магістралях відкачування встановлені термостружкосигналізатори 26, що видають сигнали при появі в маслі феромагнітних частинок або перевищенні граничної температури масла, що відкачується.

Поява феромагнітних частинок в маслі, що відкачується з коробки приводів, виявляється стружкосигналізатором 17.

На панелі приладів пілотів є табло контролю параметрів змащувальної системи:

"Мінімальний тиск мастильної оливи" - спалахує при мінімально допустимому тиску мастильної оливи на вході в двигун;

"Стружка" - загоряється за наявності феромагнітних частинок і перевищенні температури масла, що відкачується;

"Засмічений мастилофільтр" - загоряється при заданому перепаді тисків на мастилофільтр тонкого очищення;

"Мінімальний рівень мастильної оливи" - спалахує при заданому мінімальному рівні мастильної оливи в мастилобаку.

На щитку централізованої заправки мастилобака, що знаходиться в хвостовій частині фюзеляжу з правого борту, розташовані: індикатор рівня масла в баку та табло "Мінімальний рівень мастила", "Добав мастила", "Максимальний рівень мастила" у нижній частині коробки приводів, на мастилобаку.

При максимальній заправці мастилобака загальний обсяг мастильної оливи в мастилосистемі становить 27 л, а 16 л. в мастилобаку, 2 л. у ТМА та інших порожнинах двигуна, агрегатах та трубопроводах. Табло "Додай мастильної оливи" загоряється при рівні мастильної оливи в мастилобаку 8 л., табло "Мінімальний рівень мастильної оливи" загоряється при рівні мастильної оливи в мастилобаку 4 л.

Агрегати змащувальної системи

Мастилобак МБ-36 (рис.2.3) призначений для зберігання запасу мастильної оливи в двигуні та поповнення оливою системи двигуна в міру її витрачання. Мастилобак встановлений на кронштейнах та закріплений за допомогою стрічок з правого боку на корпусі вентилятора.

Збоку мастилобака розташований датчик мастиломіру. Зворотний клапан служить для запобігання наддуву порожнини бака при випадковому підвищенні тиску в коробці приводів, а запобіжний клапан - для автоматичного стравлювання повітря з порожнини бака при зростанні в ній тиску понад $0,35 \text{ кгс/см}^2$. Повний обсяг мастилобака 20 літрів.

Паливно-масляний агрегат 5660Т призначений для охолодження мастила, що циркулює в змащувальній системі двигуна, фільтрації та підігріву палива з метою попередження льодоутворення на паливному фільтрі.

Паливно-олійний агрегат (рис.2.3) складається з паливно-масляного радіатора та паливного фільтра. Радіатор складається з корпусу, кришок, корпусу фільтра та охолоджуючого елемента. Охолодний елемент, розташований усередині корпусу, являє собою два пакети, набрані з плоских

алюмінієвих трубок. Зовні до корпусу приварені чотири кришки. У задній верхній кришці - фланець відведення мастильної оливи та запобіжний клапан, у задній нижній кришці - фланець підведення мастильної оливи. На верхній кришці є штуцер для стравлювання повітряних пробок з паливної системи та фланець для підведення палива. У корпусі паливного фільтра встановлені: пакет, що фільтрує, перепускний клапан, термостатичний клапан 12 (рис.2.1), призначений для перепуску мастила, минаючи охолоджувальний елемент, кран для зливу палива і штуцери для підключення сигналізатора перепаду тиску палива на фільтрі.

Гаряче мастило з двигуна через зворотний клапан надходить у радіатор паливно-масляного агрегату, проходить послідовно по трубках обох пакетів, віддаючи при цьому тепло холодному паливу, що проходить між трубками, і направляється в мастилобак. При підвищенні опору до встановленого перепаду тиску масляної порожнини відкривається запобіжний клапан і мастило, минаючи радіатор, частково перепускається на вихід з радіатора. Паливо від відцентрового насоса агрегату 934 надходить у порожнину верхньої кришки, проходить між трубками і прямує до фільтра.

Відфільтроване паливо подається до насоса високого тиску агрегату 934. У разі засмічення фільтруючих елементів перепад тисків на фільтрі збільшується і при зростанні його до $0,32...0,48 \text{ кгс/см}^2$ сигналізатор СП-0,4Е включає сигнальну лампу, а при досягненні перепаду тисків $0,6...0,7 \text{ кгс/см}^2$ відкриється перепускний клапан і частина палива, минаючи елемент, що фільтрує, надійде в блок паливних насосів двигуна. При температурі палива 75°C починає відкриватись термостатичний клапан, за допомогою якого перепускається гаряче мастило з входу на вихід і тим самим обмежується температура палива на виході з агрегату, яка не повинна перевищувати 85°C .

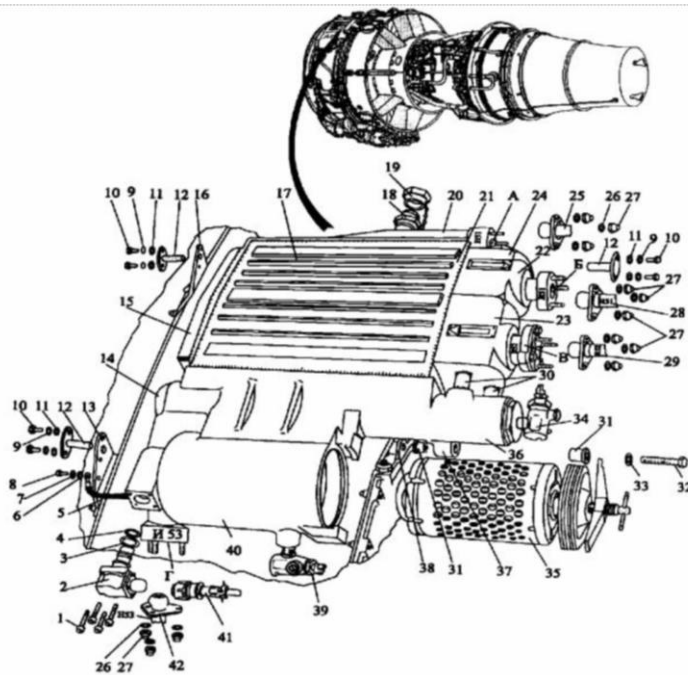


Рисунок 2.3 - Паливно-мастильний агрегат:

1.Гвинт; 2. Сигналізатор перепаду тисків СП-0.4Е; 3. Гумове кільце ущільнювача; 4.Гумове кільце ущільнювача; 5. Шині металізації; 6. Шайба; 7. Шайба пружинна; 8. Болт; 9. Шайба пружинна; 10. Болт; 11. Шайба; 12. Штир; 13. Кронштейн; 14.Клапан перепускний; 15. Кришка; 16. Кронштейн; 17. Корпус; 18. Клапан випуску повітря; 19. Ковпачок; 20. Кришка; 21. Кронштейн; 22. Кришка; 23. Кришка; 24. Клапан запобіжний; 25. Трубопровід підведення палива; 26. Шайба; 27. Гайка самоконтрольна; 28. Трубопровід відведення мастильної оливи; 29. Трубопровід входу мастильної оливи; 30. Мастилоперепускні трубки; 31.Втулка; 32. Болт; 33. Шайба пружинна; 34. Кран зливу мастильної оливи; 35. Фільтр паливний; 36.Термостатичний клапан; 37. Вушко поздовжньої фіксації; 38. Кронштейн; 39.Кран зливу палива; 40. Корпус фільтра; 41. Розетка штепсельного роз'єму; 42. Трубопровід відведення палива

Мастилоагрегат МА-36 розташований у нижній частині коробки приводів та прикріплений до її перехідника за допомогою хомути. Він складається з п'яти вмонтованих в один корпус секцій - мастилонасосів шестерного типу (рис.2.1): нагнітаючої секції 30; трьох секцій відкачування мастильної оливи з порожнин підшипників 22 і основний секції відкачування. Крім того, мастилоагрегат включає редукційний і зворотний

клапани, фільтр тонкої очищення масла 28 з сигналізатором перепаду тиску 24 і клапан стравлювання повітря.

Мастилофільтр 28 тонкого очищення МФТ-36 (рис.2.1), призначений для очищення мастила, що надходить до поверхонь деталей двигуна, що труться, від механічних домішок, розташований в колодязі корпусу мастилоагрегату. Фільтр прикріплений до кришки олійного агрегату за допомогою болта-зйомника. При відвертанні болт упирається буртом у завязе кільце і фільтр знімається. Тонкість фільтрації 40 мікронів. У нижній частині порожнини фільтра розташована пробка для зливу мастильної оливи з відстоєм перед зніманням фільтра.

Фільтр грубого очищення 1 повітрявідділювача ПВ – 36, призначений для очищення мастила, що відкачується з двигуна, розташований в колодязі корпусу повітровідділювача і прикріплений до корпусу повітровідділювача за допомогою болта-зйомника. Тонкість фільтрації 160 мікронів.

Перепускний клапан 13 повітрявідділювача ПВ – 36 (рис.6.1) забезпечує надходження мастильної оливи у двигун при забрудненні сіток фільтра. У припливі розташований сигналізатор 16 перепаду тиску СП-0,6Е, , що подає сигнал при наявності перепаду тиску на фільтрі понад $0,6 \text{ кгс/см}^2$. У нижній частині колодязя фільтра грубої очистки розташована пробка для зливу мастильної оливи з відстоєм бруду перед зніманням фільтра.

Стружкосигналізатор СС-36 (рис. 2.4) встановлений у нижній частині коробки приводів і прикріплений до неї за допомогою болта-зйомника. Стружкосигналізатор складається з корпусу магнітів 6, виготовленого з діелектрика, кришки 9 і болта-знімач 5.

Корпус магнітів на периферії має 8 вікон. У стійках між вікнами розташовані постійні магніти 4, полюси яких встановлені послідовно, завдяки чому утворюється магнітне поле з поперечними потоками мастила силовими лініями. Магніти розташовані з певним проміжком, в якому збирається стружка. До магнітів 4 за допомогою скоб 8 приєднані дроти 3. Проводи закінчуються колодкою 1 штепсельного роз'єму, до якої приєднані джерело живлення та сигнальна лампа.

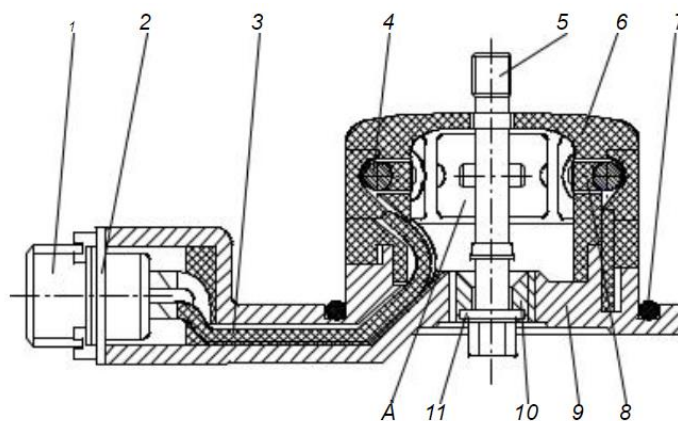


Рисунок 2.4 - Стружкосигналізатор СС-36

1 - колодка штепсельного роз'єму; 2-прокладка; 3 - дроти; 4 – магніти; 5 – болт-знімач; 6 – корпус магнітів; 7 - кільце ущільнювача; 8 - скоба; 9 – кришка; 10 - футорка; 11 - кільце ущільнювача

За наявності стружки в маслі сталеві частинки притягуються магнітами і за певної кількості замикають електричний ланцюг. В результаті світиться табло на панелі приладової дошки.

Характерні відмови та технічне обслуговування змащувальної системи

Більшість відмов і несправностей змащувальної системи пов'язані з пошкодженням її агрегатів або з підвищеним зносом деталей омивних оливою, і навіть через порушення правил технічної експлуатації системи та двигуна загалом.

До ознак, що свідчать про появу несправностей в мастилосистемі, відносяться: підвищена витрата масла, зниження подачі мастила до систем, його забруднення і перегрів.

Підвищена витрата мастильної оливи спостерігається у випадках розгерметизації масляних магістралей і порожнин, наприклад, при руйнуванні трубопроводів та їх з'єднань, внаслідок зношування ущільнень опор роторів, при виникненні тріщин у корпусних деталях агрегатів змащувальної системи та коробки приводів тощо.

Великі втрати мастильної оливи можуть бути пов'язані з його викидом через систему суфлювання у разі руйнування приводів відцентрового суфлера або відокремлювача повітря. Істотне збільшення витрати мастильної

оливи неприпустимо через можливість подальшого повного припинення його подачі в двигун, що призведе до руйнування підшипників опор роторів.

Зменшення подачі масла в двигун супроводжується погіршенням умов змащення та охолодження вузлів тертя («мастильна недостача»), що викличе їх інтенсивне зношування, перегрів і може призвести до заклинювання роторів. «Мастильна недостача» виникає при падінні тиску мастила за нагнітаючою секцією насоса і збільшення гідравлічного опору магістралі нагнітання, наприклад, внаслідок засмічення фільтра тонкого очищення або закоксовування масляних форсунок. Причинами падіння тиску в нагнітальній магістралі можуть бути великі втрати мастильної оливи, підвищене зношування деталей нагнітальної секції насоса, ослаблення пружини редукційного клапана або його зависання у відкритому положенні *при засміченні механічними частинками*.

Забрудненість мастильної оливи викликає засмічення фільтра тонкого очищення. Засмічення фільтра призводить, зазвичай, до відкриття перепускного клапана. В результаті неочищена мастильна олива надходить у двигун. При цьому продукти зношування, кокс та інші домішки можуть викликати підвищений знос вузлів тертя і ущільнень опор, зменшення прохідного перерізу масляних форсунок, заклинювання вузлів насосів, що качають, і руйнування їх приводів і т.п.

Перегрів мастила відбувається за рахунок підвищеного тепловиділення при інтенсивному зносі деталей, що змащуються, в результаті «мастильного голодування», а також при збільшенні частоти обертання роторів, температури газів і т.п. Перевищення допустимих температур викликає окислення мастила, виділення з нього коксу і смол, що засмічують фільтри та форсунки, погіршення змащувальних та антикорозійних властивостей мастильної оливи.

Забрудненість і перегрів мастильної оливи, що виражається в потемнінні мастильної оливи, є ознаками руйнування та перегріву деталей, що омиваються оливою. Насамперед це стосується підшипників опор роторів.

Ушкодження підшипників роторів переважно виникають з таких причин:

- втомне руйнування матеріалу в зоні контакту тіл кочення;
- підвищене прослизання та знос деталей підшипника.

Робота підшипника в умовах мастильної недостатчі. Втомне руйнування підшипників спостерігається у вигляді точкового фарбування матеріалу доріжок і тіл кочення. Воно може виникнути через великі навантаження від відцентрових сил, що діють з боку тіл кочення, зниження твердості матеріалу деталей підшипника через короточасне перегрівання при виготовленні або експлуатації, корозії через погану консервацію.

При запуску холодного двигуна через підвищену в'язкість мастила подача його до підшипників ускладнена. Тіла кочення за відсутності достатньої мастила можуть нагрітися, вибрати зазор з кільцями, що призведе до заклинювання та руйнування підшипника.

При руйнуванні деталей підшипника через мастильну недостатчу завжди має місце оплавлення і зношування тіл кочення, наволікання матеріалу кульок на поверхню бігових доріжок, зношування зовнішньої поверхні сепаратора і його гнізд, розрив бічних перемичок сепаратора.

Обслуговування змащувальної системи двигуна є складовою загального комплексу підготовки повітряного судна до польоту та виробляються в період виконання оперативних та періодичних форм технічного обслуговування.

Основними роботами при технічному обслуговуванні змащувальної системи є перевірка стану агрегатів та трубопроводів, контроль кількості мастила, злив мастильної оливи та заправка змащувальної системи. У виконання всіх видів технічного обслуговування проводиться огляд змащувальної системи. Під час оглядів необхідно перевірити відсутність течії мастильної оливи та пошкоджень трубопроводів, кріплення трубопроводів та цілісність перемичок металізації. Через кожні 50 годин роботи двигуна перевіряють рівень мастильної оливи в баках, оглядають та перевіряють фільтри. Через 200 годин роботи двигуна необхідно замінити мастило у

двигуні, перевірити спрацювання сигналізатора рівня мастильної оливи, промити сигналізатор.

Перед запуском двигуна необхідно перевірити рівень та температуру мастила. Мінімальна температура на вході в двигун, при якій дозволяється запуск без підігріву. - 40 °С. При температурі навколишнього повітря нижче - 40 °С двигун слід підігрівати, якщо температура мастила на вході в двигун нижче - 20 °С. Підігрівають протягом 30...40 хв, поки температура мастильної оливи не досягне + 5 °С. У ході випробування двигуна стежать за тиском та температурою мастильної оливи, контролюють спрацювання сигналізаційних табло.

2.4.2 Діагностування двигунів Д-36 по аналізам проб мастильних оливи

Одночасно з виконанням спектральних вимірювань на авіаційних підприємствах проводиться фєрографічний аналіз на устаткуванні фірми Predict.

Бюлетенем встановлено рівень підвищеного вмісту заліза та міді в мастильної оливи – 1,5 г/т. При цьому бюлетенем не регламентується величина граничного вмісту металів залежно від типу застосовуємого обладнання. Вказується лише, що для вимірювання вмісту може бути застосований будь-який аналізатор, мінімальна межа виявлення якого становить близько 0,1-0,3 г/т.

Для отримання додаткової інформації допускається обробка результатів спектрального аналізу по розширеному колу елементів - Ag, Al, Cr, Ni, Mg, Ti, Zn, Si та ін.

Методика встановлює процедуру контролю технічного стану вузлів тертя за результатами фєрографічних досліджень проб мастильної оливи,

відібраних так само, як і на спектральний аналіз із коробки приводів (КП) двигуна.

Вид частки визначається шляхом порівняння її з атласом частинок зношування, тип зношування - за формою і співвідношенням розмірів виявлених частинок.

2.5 Системи діагностування авіаційних двигунів

Чотирьохкулькова машина тертя (ЧМТ-1)

Машина тертя – пристрій для відтворення трибологічного процесу у контрольованих умовах, що забезпечує контроль вхідних та вихідних параметрів. Трибологічний процес здійснюється між зразками із досліджуваних матеріалів заданої форми.



Рисунок 2.5 - Зовнішній вигляд ЧМТ-1

Машини тертя чотирикулькові ЧМТ-1 призначені для забезпечення випробувань рідких та пластичних мастильних матеріалів, що застосовуються для змащування поверхонь, що труться, з метою визначення основних трибологічних характеристик мастильних матеріалів відповідно до ДСТУ «Матеріали мастильні, рідкі та пластичні. Метод визначення трибологічних характеристик на чотирикульковій машині». В США ASTM D 2783, ASTM D 2596; в Англії IP 239; у Німеччині DIN 51350. Зовнішній вигляд ЧМТ-1 приведено на рис. 2.5.

Автоматизований діагностичний комплекс (АДК) «Призма»

АДК «Призма» - рентгенофлуоресцентний спектрометр, що дозволяє високою точністю визначити зміст до 40 хімічних елементів у пробах робочих рідин та мастил.

При високій приладовій чутливості «Призми» у паспортних даних зазначена похибка вимірювань 5 % для стандартних зразків із вмістом елементів від 0,1 г/т і більше. Інколи спостерігаються похибки, що залежать від хімічного елемента та його вмісту в пробі.



Рисунок 2.6 - АДК «Призма»

Гранулометричний аналізатор ГРАН 152-1

Для визначення гранулометричного складу часток забруднення у пробі може бути використано використано прилад ГРАН 152-1 (рис. 2.7).

Прилад ГРАН-152.1 – автоматичний фотометричний лічильний аналізатор механічних домішок – є спеціалізованою моделлю, призначеною визначення рівня забрудненості авіаційних змащувальних матеріалів. Межі дозволеного значення відносної похибки підрахунку кількості частинок розмірами 5, 10, 25, 50, 100 мкм – трохи більше $\pm 2\%$.



Рисунок 2.7. Загальний вигляд ГРАН 152-1

Принцип роботи лічильного аналізатора ґрунтується на вимірі параметрів (числа імпульсів та їх інтенсивності) розсіяного світла окремими механічними частинками. Прилад, що працює за принципом вимірювання параметрів розсіяного світла, відноситься до класу фотометрів. На рис. 2.8 зображено принципову схему приладу.

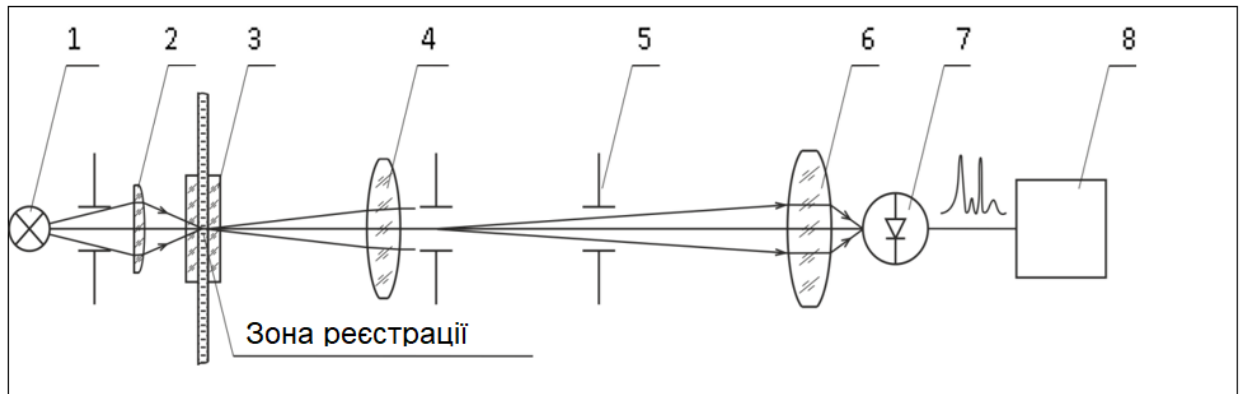


Рисунок 2.8 - Функціональна схема аналізатора ГРАН-152.1: 1 – джерело світла, 2 – конденсор, 3 – вимірювальна кювета, 4 та 6 – лінза, 5 – польова діафрагма, 7 – фотоприймач, 8 – мікропроцесорний блок.

Аналізована суспензія з резервуару з пробою з постійною швидкістю прокачується через вимірювальну скляну кювету квадратного перерізу за допомогою автоматичного дозатора.

Освітлювач через вимірювальну кювету та оптичну систему посилає світловий потік на фотоприймач. Світловий потік від освітлювача створює у вимірювальній кюветі рівномірно освітлену зону реєстрації. Як джерело світла використовується галогенна лампа.

У разі відсутності рідини частинок світлове випромінювання практично без змін потрапляє на фотоприймач. Електричний сигнал з фотоприймача надходить на мікропроцесорний блок обробки та управління.

Кожна з виважених у аналізованій рідині частинок, проходячи зоною реєстрації, короткочасно екранує світловий потік. Зміни світлового потоку, екранованого (ослабленого) поперечним перерізом частинки, реєструються фотоприймачем і перетворюються на відповідні електричні сигнали. При цьому фотоприймач формує електричний імпульс, амплітуда якого пропорційна площі поперечного перерізу частинки. Розміри частинки та інтенсивність розсіяного світла кількісно пов'язані між собою: інтенсивність світлового імпульсу пропорційна розміру частки. Завдяки цьому кількісному взаємозв'язку визначається розмір частинки. Відповідно до методики вимірювання приладу при аналізі частинок неправильної геометричної форми визначається її усереднений розмір, рівний діаметру сферичної частинки, що має таку ж площу поперечного перерізу, що і реєстрована частка (тобто обчислюється діаметр сфери, яка відкидає тінь такої ж площі, що і частка неправильної геометричної форми). Саме це значення видається як результат.

Електричний сигнал фотоприймача надходить у мікропроцесорний блок, де вони проходять через амплітудний аналізатор. Процесор порівнює стан виходів всіх компараторів і зараховує частку в одну з груп. В результаті утворюється цифровий масив даних (гістограма), адекватний гранулометричному складу частинок механічних домішок проби.

Далі програма зіставляє дані підрахунку частинок за розмірами нормами, наведеними в ДСТУ.

Даний прилад рекомендований до застосування в цивільній авіації для оцінки ступеня дисперсності авіаційних гідравлічних рідин, олій та палив.

2.6 Вплив відбору проб мастил на діагностування деталей, вузлів та агрегатів

Огляд методик діагностування ГТД по аналізам проб мастил та їх застосування в експлуатації показує, що інформації, яка надходить для аналізу з пробами в переважній більшості випадків недостатньо для раннього виявлення початку руйнування вузлів та агрегатів, що омиваються мастильною оливою.

Доповнюючи відібрану пробу аналізами частинок, змитих з КЕ і фільтрів, також або не вдається відслідковувати початок руйнування, або методи фіксують існуючі руйнування, тобто запізнюються.

Це відбувається тому, що сітки фільтрів тонкого очищення мастильної оливи в авіаційних двигунах мають комірки розміром приблизно 15 мкм та 30 мкм. Гранулометричні аналізи показують, що при нормальному зношуванні (двигун справний) розмір часток рідко перевищує розмір від 1 мкм до 5 мкм. У разі пошкодження деталей та вузлів розмір часток зростає до 10-150 мкм. Великі розміри частинок характеризують початок схоплювання металів, великі втомні ушкодження, корозію та за великої кількості частинок розміром понад 30 мкм - несправний двигун.

Магнітні пробки фіксують тільки феромагнітні частинки при тому, що велика кількість деталей двигуна виготовляється з нержавіючих немагнітних сплавів. Електричні стружкосигналізатори мають розмір уловлювальних комірок 15-30 мкм. І для замикання контактів потрібна значна кількість частинок.

Дані моменти вказують на недостатню можливість визначення початку руйнування деталей та вузлів за вмістом металів у мастильних оливах. Так зареєстровані приклади непридатності методів раннього діагностування для виявлення початку руйнування деталей і вузлів: при виявленні можливої відмови спектральним та ферографічним способом по стрибку вмісту металів в мастильній оливі та підтвердження припущення вібраційним методом, при

дефектації виявлено руйнування роликотідшипника двигуна. При цьому огляд контрольних елементів показував параметри частинок зношування, незважаючи що раннє зростання вмісту металів у мастильній оливі не виявлено. Це може бути пов'язано з особливостями руйнування втоми і з процедурами відбору проб.

Відомі приклади виявлення стружки у магістралі відкачування від р/підшипника на ТО двигуна при знятті його у ремонт. При цьому будь-якого зростання вмісту металів у пробах мастильної оливи за результатами дослідження спектральними методами не спостерігалось. За цим дефектом за період експлуатації було достроково знято двигуни, але жодного випадку не виявлено засобами раннього діагностування за результатами аналізів мастильної мастильної оливи на вміст металів.

Реєструється велика кількість випадків перевищень ГДК за результатами аналізів мастильних олив, однак двигун знаходиться у справному стані, а також відсутність перевищень ГДК, коли двигун пошкоджений.

Таким чином, важливим моментом при аналізі проб мастильних олив будь-якими діагностичними методами є добір достовірних проб.

З виникненням методик діагностування вузлів і деталей омиваємих мастильною оливою, за продуктами зношування і дотепер вважається, що підвищення достовірності методів полягає у вдосконаленні приладів, їх автоматизації, забезпеченні якісним математичним апаратом, а також у пошуках нових критеріїв діагностування. Методикам відбору проб не приділяли належної уваги.

В даний час методики відбору проб також не в повній мірі науково обгрунтовані тому, що відсутність інформативності проби по частинках зношування призводить до невисокої ефективності застосування приладів раннього діагностування в експлуатації. Зараз деякі розробники приладів рекомендують їх використання для ефективного пошуку несправностей після виявлення руйнування (початку руйнування) іншими методами контролю.

Процедура відбору проб із двигунів експлуатуючими організаціями має рекомендаційний характер на відміну чітко регламентованого відбору проб при контролі якості нафтопродуктів при прийомі і видачі.

Відбір проб визначає всю подальшу експертизу. Зазвичай (передбачено більшістю бюлетенів для ГТД) відбір проб проводять не пізніше 30 хв після зупинки двигуна з можливих точок зливу для конкретного двигуна. Для більшості двигунів – це зливні крани мастильної оливи з змащувальної системи в окремих нижніх точках.

Є інші варіанти відбору проб із авіаційних ГТД. Для деяких двигунів відбір проб мастильної оливи проводиться з мастилобака не пізніше 5 хв після зупинки двигуна за допомогою забірної пристрою, тобто шприцом з фторопластовою трубкою. Пристрій поміщається в мастилобак на глибину 250 мм та проводиться відбір проби у кількості 70 мл. Після цього мастило зливається з фторопластової трубки у ємність для відбирається проби.

Даний відбір проби критикується з погляду занадто малої кількості відбирається проби і втратою діагностичної інформації при використанні додаткових пристроїв, в яких утримуються частинки.

Також викликає сумнів той факт, контроль може відбуватися тільки для двох металів – Cu та Fe, хоча інші метали однозначно можуть виступати індикаторами підвищеного зношування деталей та вузлів ГТД та практично завжди виявляються у пробах.

В деяких бюлетнях вказується, що при перевищенні значень ГДК двигун ставиться на особливий контроль, але якщо в трьох останніх пробах мастильної оливи з двигунів, що знаходяться на «особливому контролі», не виявлено підвищеного вмісту заліза та міді, «особливий контроль» скасовується. Цей момент не може не викликати сумнівів щодо працездатності методів раннього діагностування за даними методиками.

Для отримання достовірних результатів необхідний правильно відібраний зразковий зразок мастильної оливи. Таким умовам задовольняє зразок, відібраний з масляної магістралі при температурі, що дорівнює або

близька до робочої температури мастильної оливи. Пробовідбір може здійснюватися трьома способами:

- зливом з мастильного картера;
- відбір зверху за допомогою шприца;
- відбір знизу зливом через краник.

Взяття проби з масляного картера.

Зливна пробка розташована на днищі масляного піддону. Зазвичай пробовідбір здійснюють у момент зливу мастильної оливи з конкретного двигуна. Недоліками взяття проби з масляного піддону або відстійника є можливе потрапляння до неї металевих частинок або забруднень, що не мають відношення до поточного технічного стану двигуна. При взятті проби олива має бути нагріта; в іншому випадку можливе розшарування рідкої та густої фази в оливі. Під час відбору струменя мастильної оливи, що зливається, щоб уникнути опіків потрібно не допускати попадання гарячої мастильної оливи на шкіру. Для утримання ємності для збирання застосовують спеціальні щипці. Якщо пробовідбір здійснюється з струменя, що зливається з картера, то пробу слід брати тільки після зливу однієї третини або половини мастильної оливи, що знаходиться в системі. Це гарантує правильність відбору представницького зразка мастильної оливи, що циркулює у двигуні. Взяття проби з картера не можна проводити на холодному двигуні. Його потрібно спочатку прогріти до робочої температури, а сам пробовідбір слід здійснювати відразу після зупинки двигуна. Взагалі даний спосіб пробовідбору не є кращим.

Існують різні типи призначених для пробовідбору шприців. В принципі, шприц складається з трьох частин: самого шприца, пляшечки для проби та пластикової трубки. Шприц створює розрідження у пляшці, і зразок мастильної оливи через пластикову трубку зливається до неї. Для кожного зразка використовується окрема пляшечка. При правильному використанні сам шприц залишається чистим від мастильної оливи і не забруднює їм наступну пробу. Залежно від конструкції застосування шприців може бути не зовсім зручним, якщо пластикову трубку доводиться

промивати або міняти після кожного пробовідбору, щоб уникнути змішування різних зразків.

Взяття проби через краник.

Мабуть, найакуратнішим способом взяття проби мастильної оливи є установка на двигуні спеціальних краників. Вдалим місцем для краніка вважається основна мастильна магістраль. З зовнішнього боку блоку встановлюється патрубок, який, своєю чергою, вставляється краник. Дані пристрої слід встановлювати в таких місцях, де мастило знаходиться під тиском. Наприклад, поруч із відцентровим фільтром. У цьому випадку патрубок можна було б встановити на вході у фільтр.

Не слід наповнювати пляшечки для проб догори, оскільки в цьому випадку в лабораторії неможливо отримати представницький зразок вмісту, навіть при застосуванні тривалого механічного струшування. Для повного комплексу аналізів достатньо 300 мл мастильної мастильної оливи у ємності об'ємом 450 мл.

Якщо така кількість зразка відбирається з малолітражного двигуна, це може значно підвищити загальну витрату мастильної оливи у процесі експлуатації. Тому обсяг зливої з двигуна проби потрібно відшкодувати та прийняти надалі до розрахунку. У крайніх випадках для загального аналізу достатньо 80 мл зразка.

Важко переоцінити значення раціонального відбору проби та правильної її підготовки для отримання надійних та достовірних результатів аналізу. Щонайменше половина помилкових результатів аналізу пов'язана з помилками при пробовідборі та підготовці проб.

Слід мати на увазі, що реальному аналізу піддається кілька міліграмів проби з її поверхні. Тому для отримання правильних результатів проба має бути однорідною за складом і структурою, при цьому склад проби повинен бути ідентичним складу аналізованої мастильної мастильної оливи.

Таким чином, дуже важливим і актуальним є встановлення причини недостовірності діагностування вузлів тертя за результатами аналізів проб

мастильних олиив до руйнування та визначення етапів процесу руйнування деталей та вузлів за результатами аналізів проб мастил на вміст металів.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДИК ВІДБОРУ ПРОБ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ЗА ВМІСТОМ МЕТАЛЕВИХ ДОМІШОК У МАСТИЛАХ

3.1 Вибір основних параметрів методик діагностування відбору проб з авіадвигунів

Результати аналізу проб мастильних олиив на наявність продуктів зношування значно залежать від часу відбору проб. Більшістю методик відбору проб передбачено обмеження часу відбору проб трохи більше 30 хвилин. При цьому в більшості випадків олиива відбирається із зливних кранів змащувальної системи. Цікавим є визначення розмірів та щільності частинок забруднень, що осідають у зазначений часовий інтервал.

Найбільш поширені методи відбору проб: злив невеликої кількості мастильної олиив знизу (з нижньої точки) та відбір проби мастильної олиив зверху.

На даний момент існує практика верхнього відбору проб для аналізів шляхом занурення пробовідбірників або спеціальних шприців, щоб оцінити можливість визначення стану вузла тертя.

Ці результати пояснюються тим, що більшість частинок швидко осідають на дно затиску і не потрапляють у пробу при зливі мастильної олиив самопливом, а також багато великих частинок утримуються за рахунок

магнітних сил і сил тертя на металевих поверхнях затиску та кульок. дрібні частинки, що знаходяться в маслі, і частинки, які не встигли осісти або затрималися на кульках і затиску, не несуть повної та достовірної інформації про стан вузла тертя.

В експлуатації відбір проб для аналізу стану ГТД здійснюється в кількості 0,5-1% (200-600 мл) від загальної кількості мастильної оливи в мастилосистемі (25-50 л). Значення кількості частинок при даному виді відбору проб не відрізняються зі збільшенням навантажень на вузол тертя і призводять до дефекту пропуску.

Верхній відбір проб не несе у собі інформації, достатньої визначення стану вузлів і агрегатів ГТД.

Відбір проб шляхом зливу мастильної оливи з нижніх точок є найпоширенішим, тому що максимальна кількість частинок зношування концентруватиметься точно над точкою зливу.

Результати досліджень показують, що це розташування точки зливу мастильної оливи є більш вдалим порівняно з верхнім відбором проб. Однак, якщо тренд Fe, вміст частинок якого в пробі великий, має вигляд, близький до достовірного, то тренди Zn і Cr не відображають процесів, що реально відбуваються у вузлі тертя при навантаженнях. Велика кількість частинок, що знаходяться в затиску не над точкою зливу, не потрапляють у пробу при зливанні масла самопливом через нижню пробку зливу. Максимальна кількість частинок зношування концентруватиметься точно над точкою зливу.

3.1.1 Дослідження гранулометричного складу проб масел на вміст механічних частинок

Гранулометричні аналізи показують, що при нормальному зношуванні (двигун справний) розмір часток рідко перевищує розмір 1 мкм і не перевищує 5 мкм. У разі пошкодження деталей та вузлів розмір часток зростає до 10-80 мкм. Великі розміри часток характеризують початок

схоплювання металів, великі втомні ушкодження, корозію та при розмірах частинок понад 30 мкм – несправний двигун.

У зв'язку з цим доцільно обмежитися при аналізі осідання частинками розмірами від 1 до 300 мкм.

В якості модельних частинок приймаються частинки сферичної форми, так як у них швидкість осідання найвища.

Представляє практичний інтерес оцінка часу осідання металевих частинок зношування та співвідношення його з нормативним часом відбору проб. При цьому необхідно враховувати вплив температури мастильної оливи та природи частинок на параметри процесу седиментації.

Для оцінки в'язкісно-температурних властивостей мастильних олив використовують залежність в'язкості від температури за рівнянням:

$$\ln \ln(v_m + 0,8) = A - B \lg T, \quad (3.1)$$

де

v_m – кінематична в'язкість мастильної оливи (мм²/с),

T – температура мастильної оливи, К,

Величина B – тангенс кута нахилу прямої – індивідуальна для кожної мастильної оливи.

Знаючи кінематичні в'язкості v_1 і v_2 при температурах T_1 і T_2 , можна обчислити B по наступному рівнянню:

$$B = \frac{\ln \ln(v_1 + 0.8) - \ln \ln(v_2 + 0.8)}{\lg T_2 - \lg T_1} \quad (3.2)$$

Для цих розрахунків можна вибрати будь-яку авіаційну мастильну оливу. З таблиці 3.1 для мастильної оливи ПМ-10 вибираємо значення v_1 , v_2 , T_1 , T_2 і за формулою (3.2) обчислюємо значення:

$$B=4,099$$

Коефіцієнт А визначаємо за формулою (3.1) при відомих з таблиці 3.1 значеннях в'язкості та температури:

$$A=24,457$$

Таблиця 3.1 - В'язкісно-температурні характеристики мінеральних мастильних оливи для авіаційних двигунів

Показники	Мастильні оливи			
	ПМ-10	МС-8п	МК-8п	МК-8
Кінематична в'язкість, мм ² /с, при температурі: 50 °С, не менше	8,0		8,3	
-40 °С, не більше	4000	5000	6500	6500
Щільність при 20 °С, кг/м ³ , не більше	875	900	885	885

Таким чином, остаточне рівняння в'язкісно-температурної характеристики мастильної оливи ПМ-10, отримане з рівняння (1.1) підстановкою обчислених коефіцієнтів:

$$\ln \ln(\nu_m + 0.8) = 24,457 - 4,099 \lg T \quad (3.3)$$

У явному вигляді залежність в'язкості від температури має вигляд:

$$\nu_m = 2,7182,718(24,457 - 4,099 \lg T) - 0,8 \quad (3.4)$$

де ν_m – в'язкість моторної мастильної оливи (мм²/с), T – температура моторної мастильної оливи, К.

В'язкісно-температурна характеристика мастильної оливи ПМ-10 за формулою (3.4) представлена на рис 3.1-3.2

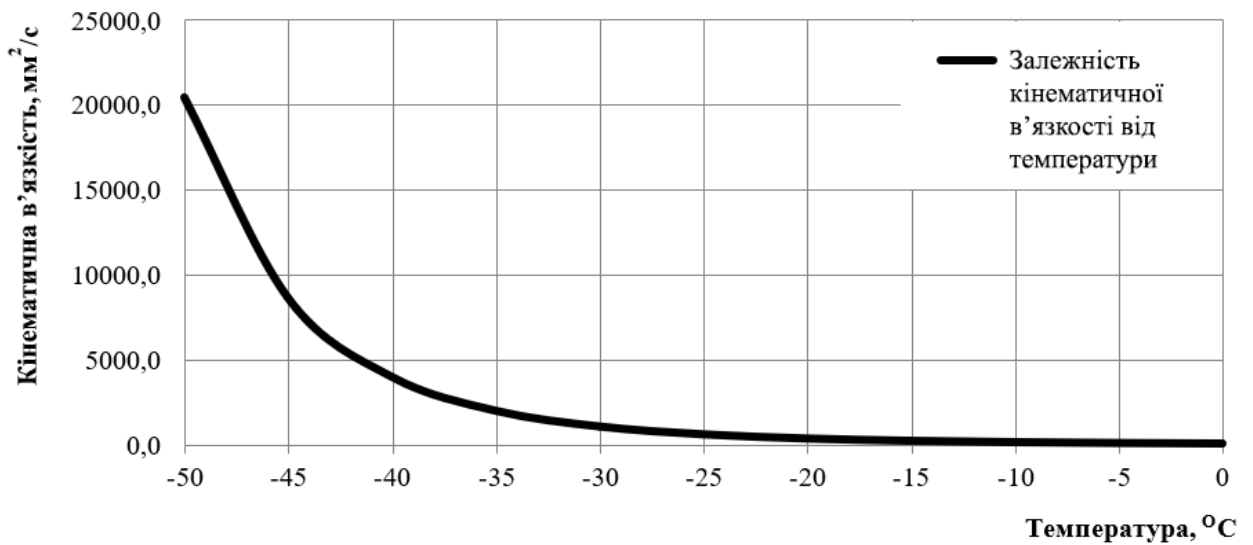


Рисунок 3.1 - В'язкісно-температурна характеристика мастильної оливи ПМ-10 для діапазону температур від -50 до 0 °C

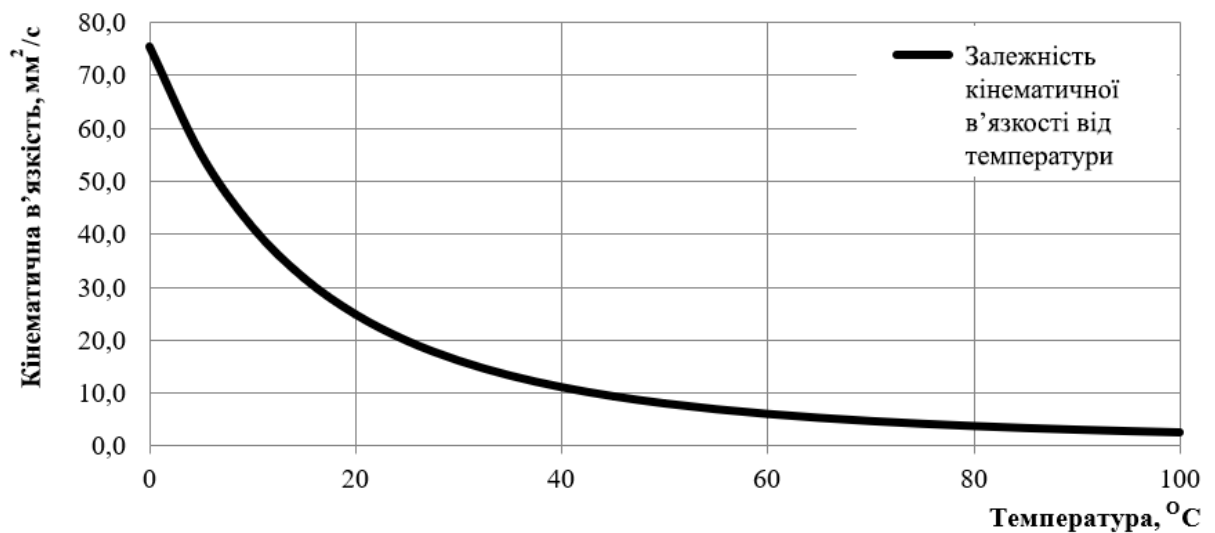


Рисунок 3.2 - В'язкісно-температурна характеристика мастильної оливи ПМ-10 для діапазону температур від 0 до 100 °C

Проведемо оцінку часу осадження різних частинок мастильної оливи ПМ-10.

Для визначення встановленої швидкості осідання кулеподібних частинок скористаємося формулою Стокса:

$$V_0 = \frac{2180 r_3^2}{\nu_m} \cdot \left(\frac{\rho_3}{\rho_m} - 1 \right) \quad (3.5)$$

В формулі (3.5) використовуються наступні розмірності: V_0 - мм/с; r_3 - мм; ν_m - мм²/с.

Швидкість осідання для кулеподібних часток найбільша.

З формули (3.5) очевидно, що швидкість осідання частинки V_0 залежить від в'язкості мастильної оливи ν_m та її щільності ρ_m , які, у свою чергу, залежать від температури мастильної оливи t .

Для розрахункового визначення щільності мастильної оливи ρ_m в залежності від температури використовується вираз:

$$\rho_m = (1 + 0,001317(t - 20))\rho_{20} - 0,001825(t - 20), \quad (3.6)$$

де

t - температура, $^{\circ}\text{C}$,

$\rho_{20} = 875 \text{ кг/м}^3$ - щільність мастильної оливи ПІМ-10 при 20°C .

У явному вигляді швидкість осідання частинок:

$$V_0 = \frac{2180 r_3^2}{\nu_m} \cdot \left(\frac{\rho_3}{(1+0,001317(t-20))\rho_{20}-0,001825(t-20)} - 1 \right), \quad (3.7)$$

де

r_3^2 - радіус частки забруднення, мм;

ν_m - щільність мастильної оливи при температурі осідання, $\text{мм}^2/\text{с}$; ρ_3 - щільність частки забруднення;

$\rho_{20} = 875 \text{ кг/м}^3$ - щільність мастильної оливи ПІМ-10 при 20°C ;

t - температура, $^{\circ}\text{C}$.

Залежність швидкості осідання частинок діаметром 25 мкм від температури мастила показано на рисунку 3.3.

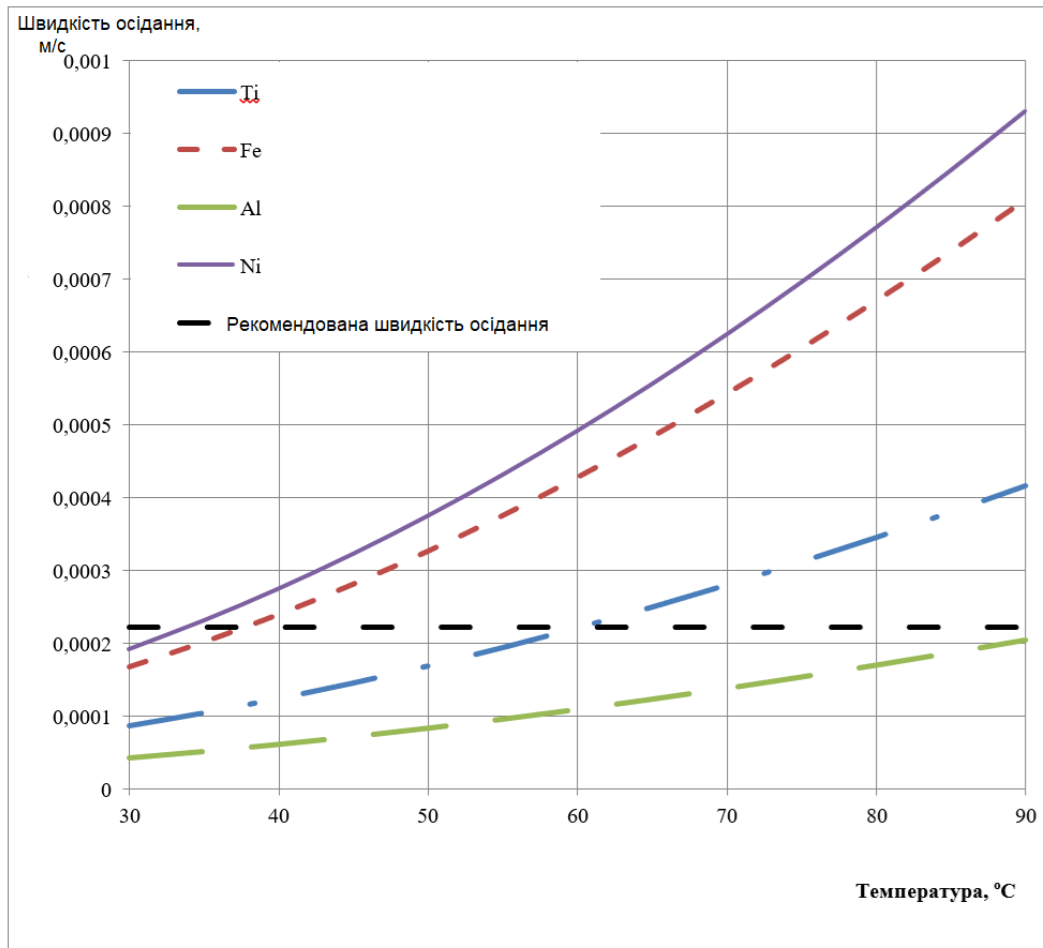


Рисунок 3.3 - Залежність швидкості осідання частинок діаметром 25 мкм від температури мастильної оливи

З формули (3.7) полягає, що швидкість осідання менша у частинок матеріалів із меншою щільністю. Із розглядаємих часток забруднення найменшу щільність має Al (2700 кг/м^3). Тому і час осідання у нього буде найбільшим.

Враховуючи, що рівень мастила згідно рекомендацій становить приблизно 40 см, на рис. 3.4 показано залежність часу осідання частинок металів діаметром 25 мкм від температури (діапазон 30-90 °C). Приймається, що частинки осідають із верхньої точки рівня мастильної оливи.

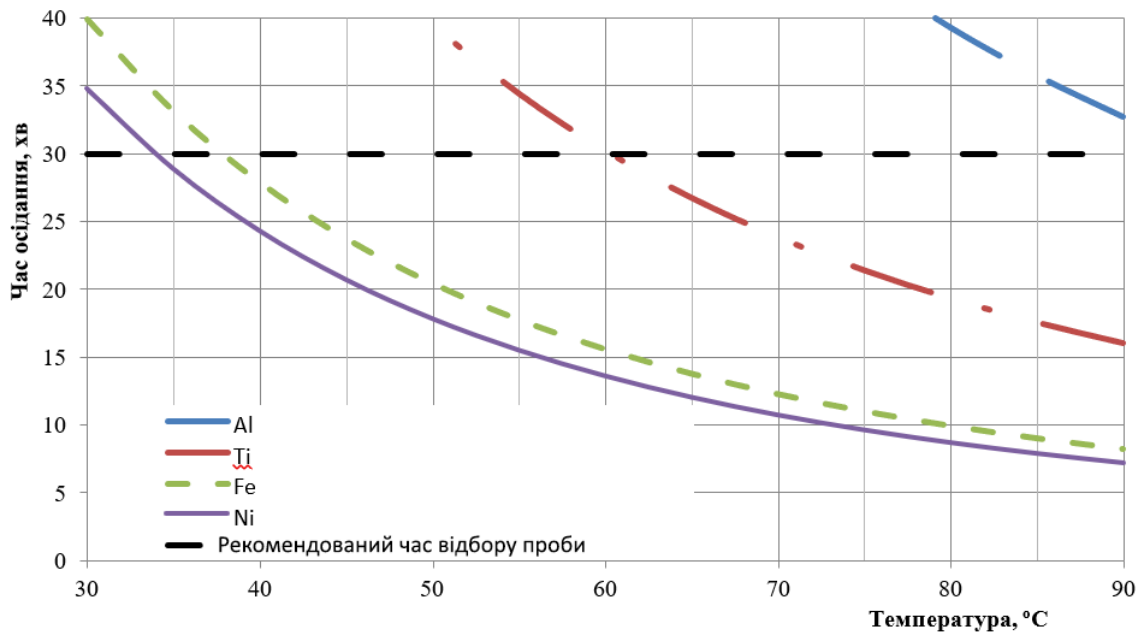


Рисунок 3.4 - Залежність часу осідання частинок діаметром 25 мкм від температури мастильної оливи

Враховуючи, що характерна температура після зупинки двигуна 70 °C на рис. 3.5 показані залежності часу осідання частинок (рівень мастильної оливи 40 см) від їхнього радіусу при даній температурі за рекомендований час відбору проб (до 30 хв).

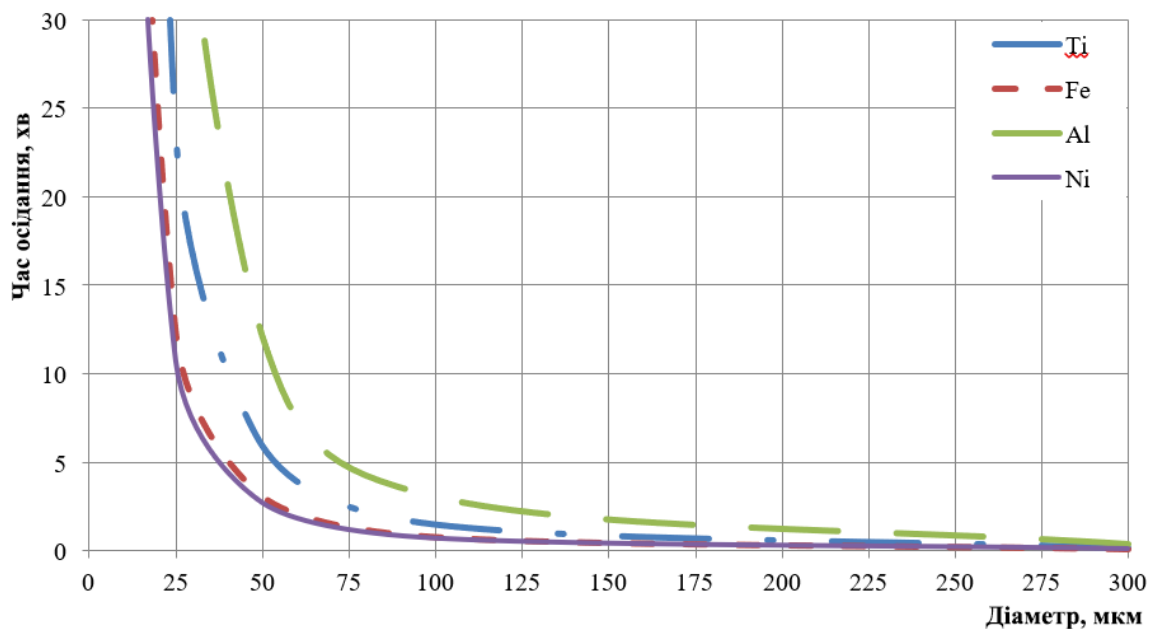


Рисунок 3.5 - Діаметри частинок, що осідають за час до 30 хв при температурі мастильної оливи 70 °C

По проведеним дослідженням можна зробити наступні висновки:

1. Процедури відбору проб мастил з авіадвигунів не досить обґрунтовані.

2. Найбільш важливі для діагностування частинки діаметрами понад 25 мкм осідають на дно порожнин відбору проб за час близько 15...20 хв. (Рис. 3.3). До відбору проб більшість частинок даного розміру вловлюються фільтрами тонкого очищення (ФТО), стружкосигналізаторами та магнітними пробками ГТД. Комірочки сіток ФТО мають розмір від 15 до 30 мкм.

3. Частинки діаметром менше 15 мкм, що становлять найбільший інтерес з точки зору діагностування початкового етапу процесу зношування, осідають з рівня в 40 см більше 2-х годин, але також не потрапляють у пробу, за винятком тих, які виявляються точно в потоці, що зливається. Дрібні частинки (1-5 мкм), вміст яких у справному двигуні становить близько 95-99 % від загальної кількості частинок, осідають в маслі дуже повільно, час осідання вимірюється десятками і сотнями годин, враховуючи, що температура мастила становить 70 °С. При зниженні температури мастильної мастильної оливи час осідання часток значно збільшується.

5. Таким чином, в пробу, що відбирається протягом 30 хвилин (після зупинки двигуна) потрапляє незначна кількість частинок розмірами 1-10 мкм, що не встигли осісти на дно, а також інші більші частинки, що опинилися точно над кранами зливу, не затримані контрольними елементами двигуна. Очевидно, що відібрати дані частинки, викид яких у малій кількості характеризує початок руйнування деталей та вузлів ГТД, звичайними способами майже неможливий.

Для розрахунку похибки вимірювань будемо використовувати наявні в джерелах інформації дані про державні стандартні зразки (ДСЗ) Fe та Cu із вмістом 0,1; 1 і 3 г/т, представлені у вигляді фільтроелементів із задалегідь заданим вмістом металів, а також експериментальні зразки моторного мастила ПІМ-10, з набором великої кількості елементів вмістом від декількох сотих г/т до 3 г/т.

Розрахункова модель оцінки абсолютної та відносної похибок при безпосередніх вимірах наступна:

1. Обчислюється середнє з n вимірів (при відомих значеннях ДСЗ, приймаємо його за середнє):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.8)$$

2. Визначається середньоквадратична похибка середнього арифметичного:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3.9)$$

3. Задається довірча ймовірність α і визначається коефіцієнт Стюдента $t_{\alpha,n}$ для заданого α та числа вироблених вимірів n за табл. 2.2, значення $\alpha = 0,99$.

4. Знаходиться напівширина довірчого інтервалу (абсолютна похибка результату вимірів):

$$\Delta x = t_{\alpha,n} S \quad (3.10)$$

5. Оцінюється відносна похибка результату вимірів:

$$\delta = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \quad (3.11)$$

Таблиця 3.2 - Коефіцієнти Стюдента

$t_{\alpha,n}=0,68$		$t_{\alpha,n}=0,95$		$t_{\alpha,n}=0,99$	
n	$t_{\alpha,n}$	n	$t_{\alpha,n}$	n	$t_{\alpha,n}$
2	2	2	12,7	2	63,7

3	1,3	3	4,3	3	9,9
4	1,3	4	3,2	4	5,8
5	1,2	5	2,8	5	4,6
6	1,2	6	2,6	6	4,0
7	1,1	7	2,4	7	3,7
8	1,1	8	2,4	8	3,5
9	1,1	9	2,3	9	3,4
10	1,1	10	2,3	10	3,3
15	1,1	15	2,1	15	3,0
20	1,1	20	2,1	20	2,9
30	1,1	30	2,0	30	2,8
100	1,0	100	2,0	100	2,6

Результати розрахунків наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Результати розрахунків

Елемент	Середнє/ДСЗ значення, г/т	Кількість повторів вимірів	Середньо-квадратичне відхилення, г/т	Абсолютна похибка, г/т	Відносна похибка, %
	0,100	10	0,016	0,023	23
	1,000	10	0,029	0,041	4
	2,021	15	0,033	0,026	1
	2,691	15	0,073	0,057	2
	3,000	10	0,078	0,215	7
Cu	0,100	10	0,011	0,032	32
	0,576	15	0,010	0,008	1
	0,823	15	0,028	0,022	3
	1,000	10	0,021	0,106	11
	3,000	10	0,060	0,094	3
Zn	0,036	20	0,006	0,004	11
	0,170	15	0,004	0,003	2
	0,245	15	0,014	0,011	4
Ti	0,064	15	0,043	0,033	52
	0,579	15	0,097	0,075	13
Ca	2,937	15	0,115	0,089	3
	3,003	15	0,142	0,110	4
Ni	0,059	15	0,006	0,005	8
	0,087	10	0,008	0,009	10
Cr	0,116	15	0,017	0,013	12
	0,211	15	0,033	0,025	12
Pb	0,462	15	0,009	0,007	2
	0,571	15	0,018	0,014	3

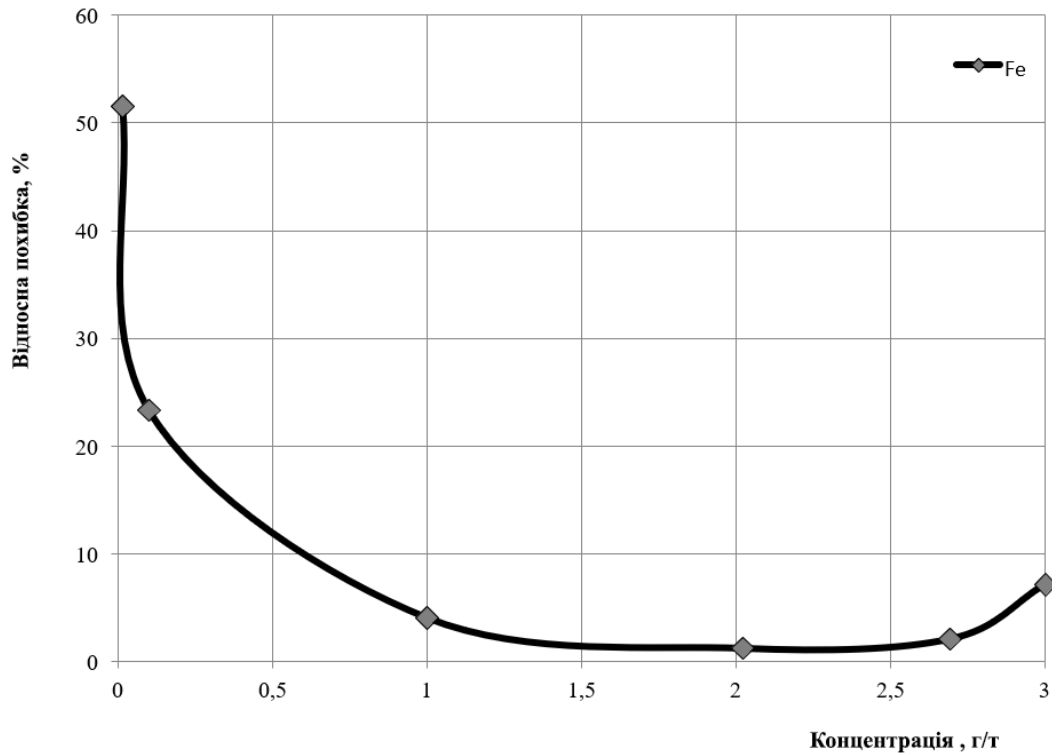


Рисунок 3.5 - Залежність відносної похибки вимірів від концентрації елемента в пробі

Значення у таблиці 3.3 та на рисунку 3.5 показують, що зі збільшенням вмісту металу у зразку, відносна похибка вимірювання зменшується, тобто при збільшенні відносної похибки, абсолютна похибка зменшується.

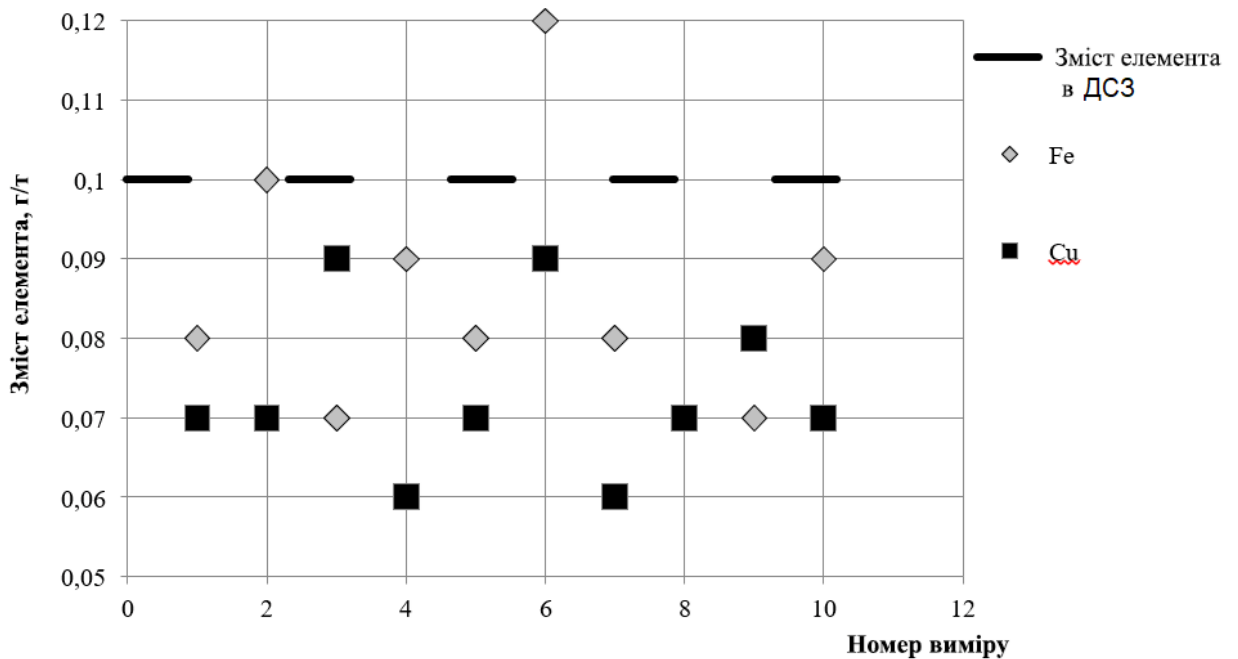


Рисунок 3.6 - Розподіл значень вимірювань

На рисунку 3.6 показано розподіл вимірювань вмісту заліза та міді у пробах для ДСЗ зі значенням 0,1 г/т. Видно, що вимірювання здебільшого занижують значення вмісту металів.

При збільшенні концентрації до 0,1 г/т значення відносної похибки зменшується для всіх елементів становить менше 15%.

Різні елементи при тих самих концентраціях мають різні значення відносної похибки (табл. 3.3).

При вимірюванні вмісту ДСЗ похибка у 99 відсотках випадків була односторонньою у бік зменшення значення концентрації. Це може бути спричинено і похибками ДСЗ.

При великих значеннях відносної похибки абсолютна похибка є дуже малого значення – соті і тисячні частки г/т, що у експлуатації при діагностуванні немає практичного значення, у пробах це, переважно, розчинені домішки металів.

3.1.2 Дослідження методики діагностування авіаційних двигунів Д-36 рентгенофлуоресцентним способом по відбору мастила

Розглянемо методику діагностування двигуна Д-36 за результатами вимірювання параметрів частинок зношування в пробах моторних мастил рентгенофлуоресцентним способом і проведемо перевірку відповідності порогових значень з нормативними.

Існує кілька способів діагностичної методики, які застосовуються в експлуатації.

Один з них полягає в тому, що виявляються відмінності «образу» двигуна, що діагностується від еталонного середньостатистичного справного двигуна даного типу. У цьому еталонний двигун формується виходячи з статистичної обробки масиву даних справних двигунів, які знаходяться у експлуатації. Відмінність між еталонним і досліджуваним двигуном порівнюють із можливими змінами його технічного стану.

Другий спосіб, враховує індивідуальні особливості двигуна. Реалізація такого підходу складається з двох стадій: на першій стадії відбувається формування індивідуальних граничних значень параметрів, притаманних даного двигуна, на другій - включається контроль виходу поточних значень параметрів за індивідуальні для кожного двигуна межі. Такий спосіб успішно застосований при оцінці технічного стану двигунів Д-36 за рівнем вібрацій.

Незважаючи на привабливість підходу, що враховує індивідуальні особливості двигуна, використання його для оцінки технічного стану вузлів тертя за результатами спектральних вимірювань ускладнено. Віброконтроль двигуна здійснюється безперервно протягом усього польотного часу, тоді як контроль за результатами аналізу масла проводиться періодично (через 50 годин). Тому за 100 годин напрацювання за результатами віброконтролю є можливість сформувати якийсь індивідуальний «образ» двигуна, а за ті ж 100 годин на спектральний аналіз надходить у найкращому разі всього дві проби мастильної оливи, за результатами вимірювання яких, індивідуальні особливості двигуна не виявляться внаслідок фактичної відсутності статистичних даних.

Похибка вимірювання параметрів частинок рентгенофлуоресцентним способом визначається, в основному, похибкою неоднорідності, яка в пробах справних двигунів може становити більше 100 %. Зменшити таку похибку можна стандартним прийомом - збільшенням числа паралельних вимірів. При цьому похибка вимірювання буде знижуватися. Звідси видно, що з досягнення прийнятної точності розробки «образу» (статистичної моделі) справного двигуна необхідно близько 100 вимірів. За умови відбору проб масел через 50 годин час напрацювання двигуна становитиме 5000 годин. Тобто модель двигуна, що враховує індивідуальні особливості, статистично буде надійна тільки до вироблення призначеного ресурсу двигуна.

Також, відомо, про існування трьох періодів у роботі справного двигуна, що відрізняються динамікою зміни параметрів частинок зношування в мастилосистемі двигуна. Порівняно короткий перший період (0 - 700 годин) характеризується підвищеними параметрами частинок зношування за

рахунок підробітку двигуна, тривалий другий - відносно низькими, в останній третій період параметри частинок починають збільшуватися. Однак реальний аналіз проб мастила зі справних двигунів і двигунів з різним напрацюванням з початку експлуатації (НПЕ) та після останнього ремонту (ПОР) мають невелику відмінність в значеннях.

Наступним важливим моментом при розробці принципів технології діагностування було вирішення задачі зі встановлення допустимих (граничних) значень за параметрами частинок зношування, при яких можлива (неможлива) подальша експлуатація двигуна. Очевидно, що ідеальним варіантом розв'язання даної задачі є набір статистичних даних як по справним, так і передвідмовним двигунам. Однак набрати статистику в реальні тимчасові терміни за передвідмовними двигунами з урахуванням їх напрацювання, типу і виду зношування для авіаційних ГТД не представляється можливим, але можливо обробити статистику по двигунах, що вже відмовили і їх дані знаходяться в доступі. Тому будемо використовувати дані, які можна отримати у вільному доступі.

Справні двигуни для даного діапазону напрацювань характеризувалися розкидом параметрів, що утворюються в результаті відмінності зносу двигунів, який, у свою чергу, залежав від умов їх експлуатації, якості сплавів, якості виготовлення деталей, якості збирання і т.п. Похибка результатів аналізу також робить свій внесок значення σ . Відповідно до формального додавання дисперсій:

$$\sigma = \sigma_{\text{зносу}}^2 + \sigma_{\text{аналізу}}^2,$$

де

σ – дисперсія розподілу параметрів для справних двигунів;

$\sigma_{\text{зносу}}^2$ - дисперсія розподілу параметрів, що утворюються за рахунок зносу двигуна;

$\sigma_{\text{аналізу}}^2$ - дисперсія характеризуюча похибку аналізу.

Граничні значення є певною мірою умовними, оскільки межа передвідмовного стану в загальному випадку може не збігатися з граничним

значенням, отриманим по справних двигунах. Тому граничні значення статичної моделі справного двигуна повинні уточнюватися в міру накопичення статистики дефектних двигунів.

Для оцінки технічного стану змащувальної системи справних двигунів Д-36 була використана статистика аналізів масла рентгенофлуоресцентним способом на підприємстві «Мотор січ» з різними напрацюваннями з початку експлуатації (СПЕ) та після останнього ремонту (ПОР), що експлуатуються в кількох авіакомпаніях.

На рис. 3.7, 3.8 наведено статистичні відомості щодо кількості проаналізованих проб окремо для двигунів Д-36.

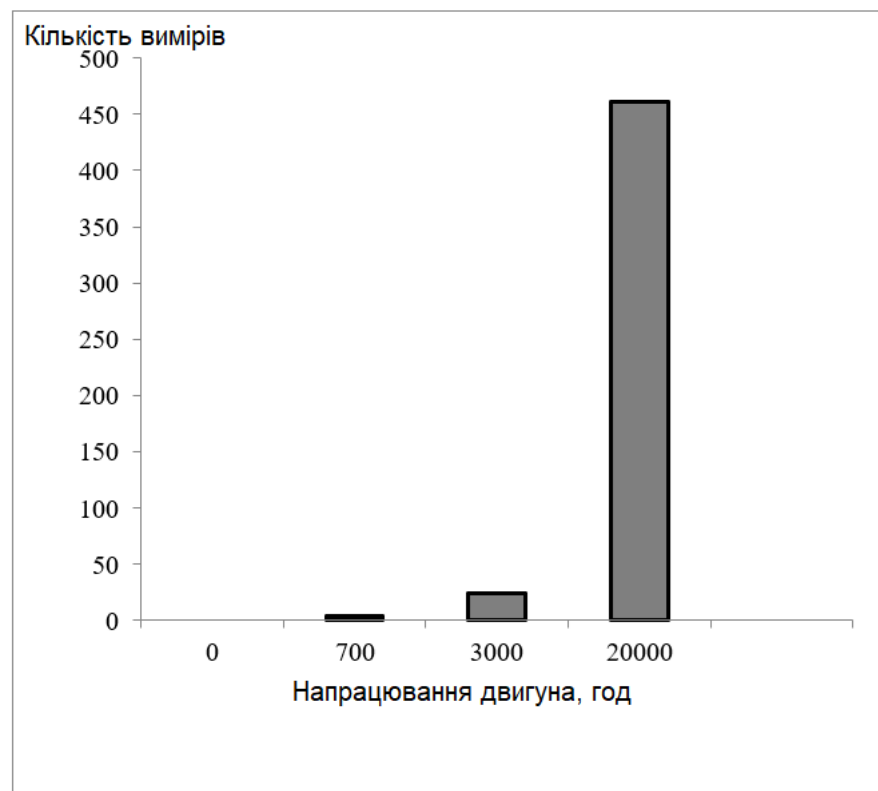


Рисунок 3.7 - Розподіл кількості проб мастил для справних двигунів з напрацювання

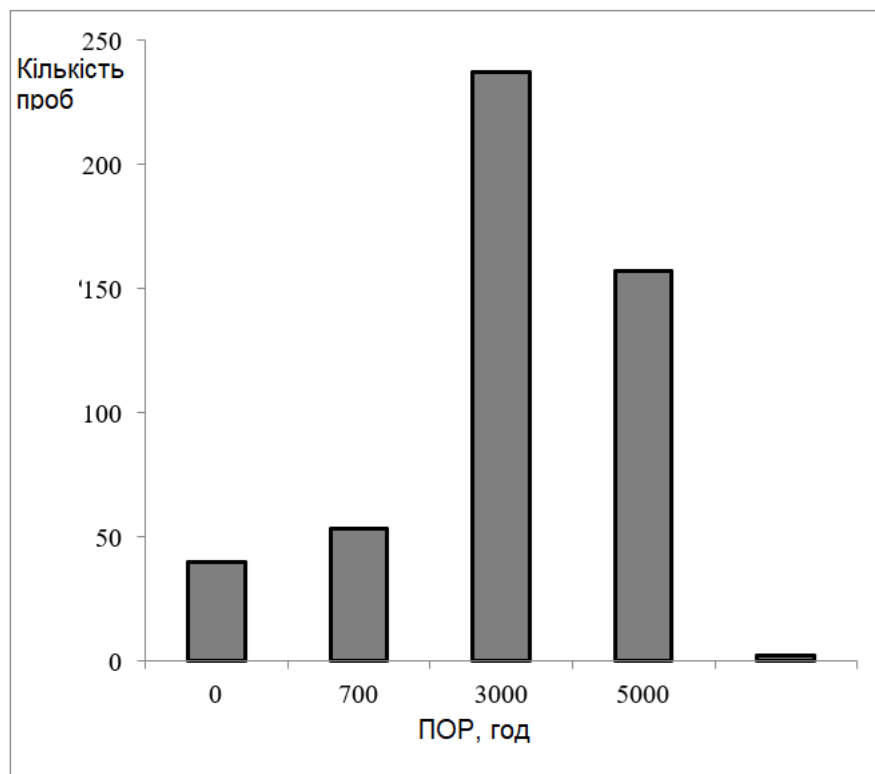


Рисунок 3.8 - Розподіл кількості проб після останнього ремонту (ПОР)

Найбільша кількість проб припадає на інтервал напрацювання з початку експлуатації від 3000 до 20000 годин. Аналіз проб мастильної оливи зі справних двигунів з різним напрацюванням СПЕ та ПОР показали дуже подібні значення.

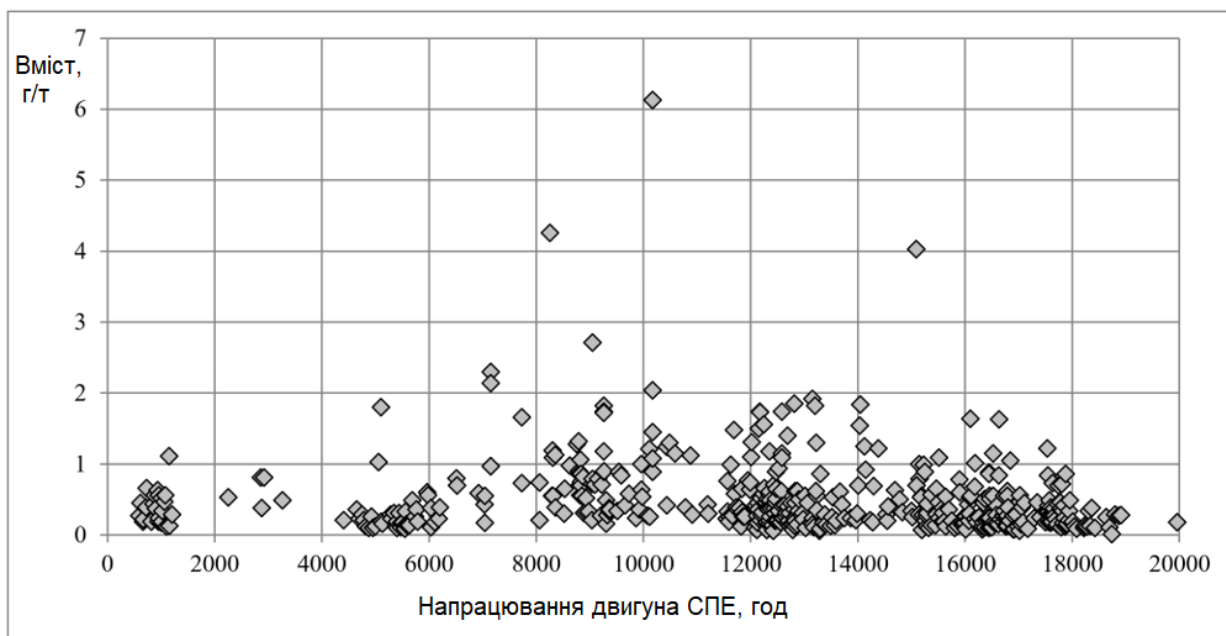


Рисунок 3.9 – Вміст заліза в пробах мастильної мастильної оливи в залежності від напрацювання СПЕ

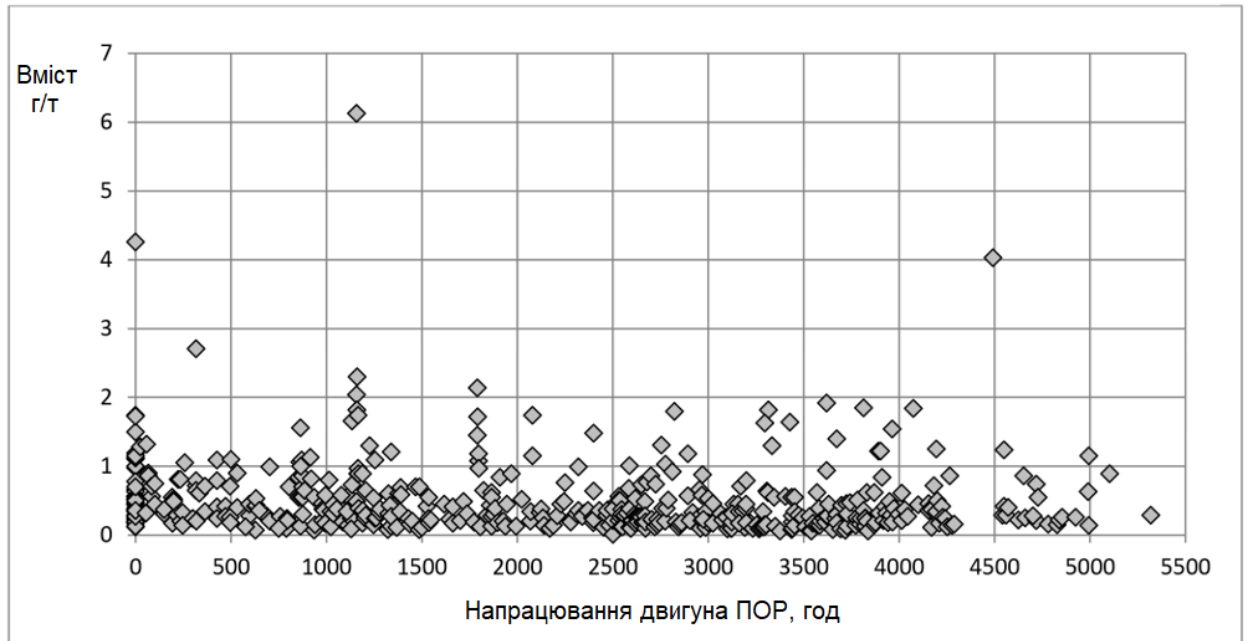


Рисунок 3.10 – Вміст заліза в пробах мастильної мастильної оливи в залежності від напрацювання ПОР

Оцінка закону розподілу необхідна для встановлення граничних значень параметрів частинок зношування, по перевищенню яких двигун ставиться особливий контроль чи визнається несправним. В якості таких границь використовується 2σ (мінімальна) і 3σ (максимальна) границі відповідно.

Елементи можна розділити на дві групи:

- елементи з малою кількістю вмісту частинок у пробі: Cr, Ni, Ca;
- елементи з великим вмістом: Fe, Cu, Zn, Pb.

В наукових джерелах є дані для побудови статистичних моделей еталонних справних двигунів Д-36 побудована за пробами мастильних олив, де логнормальні розподіли результатів вимірювань перетворювалися на нормальні за допомогою переходу до нової змінної $y = \ln(x)$. Після логарифмування значення логарифму від значень менше одиниці мають негативні значення, у зв'язку з чим середні значення параметра також були негативні. За отриманими розподілами для кожного з параметрів знаходили середнє квадратичне відхилення і допустимі межі. Розрахункові значення цих величин зведено у табл.3.3.

Таблиця 3.3 Статистична модель справного двигуна Д-36

Справні двигуни Д36

Параметр	Елемент	\bar{x}	P	σ	$\bar{x}+2\sigma$	$\bar{x}+3\sigma$
ln (Вміст)	Fe	-1,03	1,00	0,82	0,61	1,43
ln (Вміст)	Cu	-1,79	0,87	1,45	-0,15	0,67
ln (Вміст)	Zn	-2,57	0,20	0,55	-0,93	-0,11
ln (Вміст)	Pb	-1,29	0,22	0,55	0,35	1,17
ln (Вміст)	Cr	-2,44	0,03	0,30	-1,84	-1,54
ln (Вміст)	Ca	-0,46	0,03	0,43	0,39	0,82

У табл. 3.3 прийняті наступні позначення: \bar{x} - середнє значення параметра за вибіркою, σ - стандартне відхилення, P - ймовірність виявлення елемента (складу частинок), 2σ і 3σ верхні (односторонні) границі.

Таблиця 3.4 Статистична модель справного двигуна Д-36

Справні двигуни Д36					
Параметр	Елемент	x	P	x+2 σ	x+3 σ
Вміст, г/т	Fe	0,36	1,00	1,83	4,16
Вміст, г/т	Cu	0,17	0,87	0,86	1,96
Вміст, г/т	Zn	0,08	0,20	0,39	0,90
Вміст, г/т	Pb	0,28	0,22	1,42	3,22
Вміст, г/т	Cr	0,09	0,03	0,16	0,21
Вміст, г/т	Ca	0,63	0,03	1,48	2,27

На основі цих даних побудуємо теоретичну криву (рис. 3.11), що відповідає нормальному збільшенню домішок Fe в мастилі з напрацюванням, та зазначимо критерії оцінки стану еталонного двигуна.

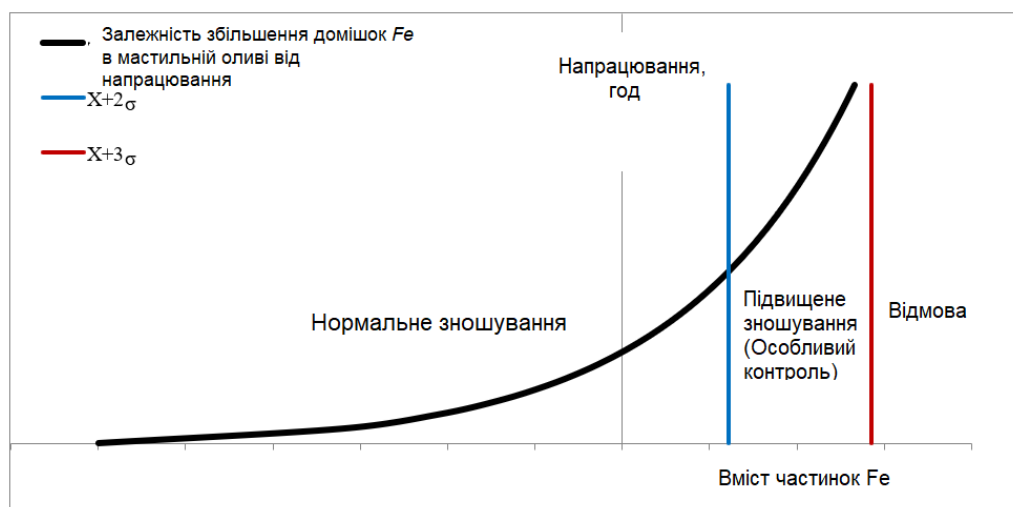


Рисунок 3.11 - Теоретична залежність нормального збільшення домішок Fe в мастильній оливі від напрацювання із зазначенням порогових меж діагностування

Проведемо порівняння порогових значень із пороговими значеннями діючих бюлетенів, які приведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Порівняльні дані для двигунів Д-36

Розрахункові дані					Значення, встановлені бюлетнями	
Параметр	Елемент	х	ОК	ЗД	ОК	ЗД
Вміст, г/т	Fe	0,36	1,83	4,16	1,5	4
Вміст, г/т	Cu	0,17	0,86	1,96	1,5	4

Позначення, прийняті у таблицях: х – середнє значення параметра, ОК – особливий контроль, ЗД – знімання двигуна.

Дані таблиці показують значні відмінності у встановлених граничних значеннях. Значення Cu для двигунів Д-36 у бюлетенях суттєво завищені, а значення Fe занижені порівняно досліджуємими.

Також у бюлетенях для цих двигунів нормуються два метали, у пробах з великою ймовірністю реєстрації визначаються понад 5 елементів для двигуна, кожен з яких може бути індикатором зношування.

Дані моменти викликають сумніви або у пропрацьованості методик або реальної працездатності методів раннього діагностування двигунів за вмістом металів в маслах.

В результаті проведених досліджень виявлено, що більшого значення має не досить висока ефективність методик раннього діагностування в реальних умовах, пов'язана з якістю відібраної проби, а не самі методи.

3.2 Рекомендації щодо вдосконалення існуючих методик відбору

проб з змащувальної системи авіаційних двигунів та способів відбору проб мастильної оливи для підвищення ефективності їх діагностування

При приведенні дослідженні були встановлені наступні недоліки щодо точності діагностування мастильної оливи виявлено:

- інформації в відібраній пробі мастильної оливи, що надходить для аналізу вміст металів з метою визначення стану двигуна недостатньо;
- без отримання максимально повної інформації про частинки металів достовірно охарактеризувати вузол тертя за параметром «вміст металів в маслі» неможливо, особливо на докритичних навантаженнях.

На підставі проведених досліджень можливо сформулювати деякі рекомендації щодо підвищення інформативності проб мастил, що відбираються при експлуатації для покращення застосування методів раннього діагностування:

1. Можливість діагностування вузлів і агрегатів авіаційних двигунів та прогнозування їх технічного стану за результатами аналізів відбираються проб мастил на утримання в них металів необхідно закладати на стадії конструювання авіадвигунів. Основним завданням при реалізації цієї рекомендації є збирання діагностичної інформації (часток зношування), що достовірно відображає стан деталей та вузлів на всіх стадіях розвитку несправності.

2. Точки відбору проб мастильної оливи повинні бути науково та експериментально обґрунтовані та задані для кожного двигуна.

3. Необхідно введення у конструкцію двигуна систем відбору частинок зношування, що забезпечують високу інформативність та адресність за наявності несправності.

4. Об'єм проб відбираємої мастильної оливи науково обґрунтувати.

5. Відбирати проби мастильної оливи не пізніше 15 хв після зупинки двигуна.

6. Найчастіше контролювати фізико-хімічні показники самої мастильної оливи, проводити заміну мастильної оливи, не чекаючи повного вироблення її ресурсу.

7. Використовувати методи раннього діагностування для оцінки стану пар тертя за вмістом металів у мастильних оливах комплексно.

9. Експлуатуючим організаціям приладів раннього діагностування більш точно встановлювати порогові значення елементів кожного типу двигунів і кожного приладу.

Проведені дослідження дозволяють запропонувати варіант відбору проб мастильної оливи за допомогою ФКЕ, встановлених в мастилосистемі ГТД, що дозволяє найбільш повно відбирати частинки зношування з змащувальної системи для дослідження приладами раннього діагностування з метою визначення стану деталей і вузлів ГТД.

Пропонується внести більшу точність в процедуру відбору проб мастила з двигунів, передбачену діючими бюлетенями, оглядом спеціально встановлених контрольних елементів у магістралях змащувальної системи двигуна (фільтруючі контрольні елементи) у наступних місцях: після кожної з опор двигуна, на виході з коробки приводів після нагнітального насоса та насосів відкачування на виході бака з мастилом (рис. 3.12).

Конструктивно дані контрольні елементи можуть бути виконані по-різному і ці рішення вимагають окремих досліджень.

Для діагностування двигуна по частинкам зношування по мастильній оливі, проводити періодичний огляд даних контрольних елементів, і за наявності в них частинок їх кількісно і якісно досліджуються на відповідних приладах. При цьому щоразу необхідно проводити огляд і штатних контрольних елементів двигуна (магнітних пробок, фільтрів, стружкосигналізаторів).

Даний підхід забезпечить ефективний збір діагностичної інформації прои ТОiP.

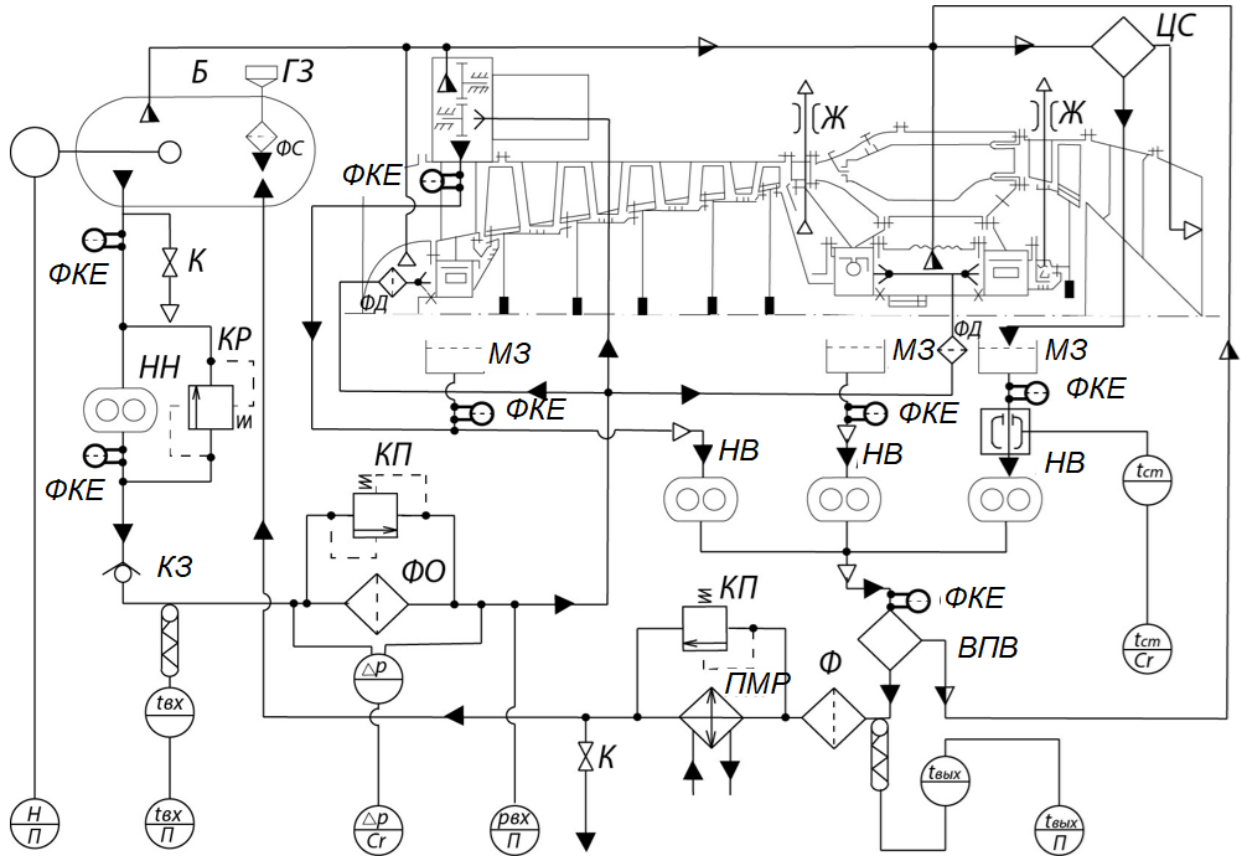


Рисунок 3.12 - Схема змащувальної системи замкнутого типу із зазначенням встановлення фільтруючих контрольних елементів (ФКЕ):

Б - бак; ГЗ - заливна горловина; ФС - фільтруюча сітка; К - кран; НН - нагнітаючий насос; КР - редукційний клапан; КЗ - зворотний клапан; ФО - основний фільтр; КП - перепускний клапан; ФД - допоміжний фільтр; МЗ - мастилозбірники; НВ - відкачуючі насоси; ВПВ - відцентровий віддільник повітря; Ф - фільтр; ПМР - паливо-мастильний радіатор; ЦС - відцентровий суфлер; Ж - жиклер; ФКЕ - фільтруючий контрольний елемент.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі проведено дослідження застосування методів раннього діагностування газотурбінних двигунів для прогнозування їх технічного стану та підвищення надійності, за результатами аналізів проб мастил на вміст в них металевих домішок.

Проведено детальний огляд сучасних методів діагностування авіаційних ГТД за результатами проб мастильних оливо.

Проаналізовано ефективність застосування та достовірності методів раннього діагностування ГТД Rolls-Royce, Pratt&Whitney, General Electric, ЗМКБ «Прогрес» (турбовентиляторний двигун Д-36) по аналізам проб мастильних оливо. Встановлено:

- інформації в відібраній пробі мастильної оливи, що надходить для аналізу вміст металів з метою визначення стану двигуна, мало при будь-яких видах відбору проби;

- сучасні прилади розпізнавання якісного та кількісного складу домішок у пробах мастильних оливо показують високу точність результатів, і не можуть бути причиною низької ефективності їх застосування в експлуатації;

- дані таблиць бюлетнів (Д-36) показують значні відмінності у встановлених граничних значеннях;

- у бюлетенях для двигунів Д-36 нормуються два метали, а у пробах з великою ймовірністю реєстрації визначаються понад 5 елементів для двигуна, кожен з яких може бути індикатором зношування.

Дані моменти викликають сумніви або у пропрацьованості методик або реальної працездатності методів раннього діагностування двигунів за вмістом металів в маслах.

Визначено, що основною причиною недостовірності результатів аналізу проб робочих мастильних оливо авіаційних ГТД, що відбираються в експлуатації з метою оцінки та прогнозування їх технічного стану, є низька інформативність щодо частинок зношування відбираємої проби мастильної

оливи. Тобто невисока ефективність методик раннього діагностування в реальних умовах, пов'язана з якістю відібраної проби, а не самі методи.

Досліджено та теоретично обґрунтовано параметри методик відбору проб для підвищення ефективності діагностування авіаційних двигунів за вмістом металевих домішок у мастилах.

На підставі проведених досліджень запропоновано рекомендації щодо вдосконалення існуючих методик відбору проб з змащувальної системи авіаційних двигунів та способів відбору проб мастильної оливи для підвищення ефективності їх діагностування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chornohlazova N., Ienina I., Mazhura V. Modern methods for diagnosis of aviation oils in aircraft engine systems. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Helsinki, Finland. 2023. Pp. 380-383.
2. Кулик Н. С., Аксьонов А. Ф., Яновський Л. С. Авіаційна хімотологія К: НАУ, 2015. 560 с.
3. Іщук Ю. Мастильні матеріали: класифікація та термінологія. Каталіз і нафтохімія, № 13, 2005. С. 9-19.
4. Сивашенко Т. І., Максютинський П. Ф. Проектування паливних систем літальних апаратів. К: НАУ, 2015. 192 с.
5. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
6. Терещенко Ю.М. Теорія авіаційних газотурбінних двигунів. К: НАУ, 2013. 596 с.
7. Про затвердження Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0060-17#Text>
8. Rolls-Royce. Industrial & Marine gas turbines Ltd. URL: <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/naval/gas-turbines/mt30-marine-gas-turbine.aspx>
9. Pratt & Whitney PW4000. URL: <https://www.mtu.de /de/engines/zivile-triebwerke/widebody-jets/pw4000-growth/>
10. ДСТУ 9118:2021 Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій.
11. ДСТУ 2823-94 Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення.
12. Іщук Ю. Л. Біорозщеплюваність нафтопродуктів і проблеми біосфери. Нафтова і газова промисловість, № 1, 2004. С. 57-60.
13. Конструкція і технічна експлуатація двигуна Д-36 URL: <https://studfile.net/preview/2115441/page:12/>

14. Dale Crane. Aviation Mechanic Series: General Hardcover. Publisher: Aviation Supplies & Academics, Inc., 2022. 800 p.
15. UNDERSTANDING AEROSPACE CHEMICAL PROPULSION. IK: International Publishing House Pvt. Ltd, 2017. 458 p.
16. Engr. Editha E. Domingo. Aviation Chemistry and Physics. 2018. 101 p.
17. Авіаційні мастильні оливи. URL:
<https://masprom.com.ua/en/products/aviacionnoe-maslo-f3706691-en/>
18. Офіційний сайт Державного підприємства «Антонов». URL:
<https://www.antonov.com>
19. Офіційний сайт Державного підприємства «Івченко-Прогрес». URL:
<https://ivchenko-progress.com/?lang=ua>
20. Офіційний сайт Державного концерну Укроборонпром. URL:
<https://ukroboronprom.com.ua>
21. Додаток 3 до Авіаційних правил України «Підтримання льотної придатності повітряних суден та авіаційних виробів, компонентів і обладнання та схвалення організацій і персоналу, залучених до виконання цих завдань». URL: <https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2019/06/Dodatok-3.pdf>
22. Державна авіаційна служба України. Про затвердження Авіаційних правил України: Підтримання льотної придатності повітряних суден та авіаційних виробів, компонентів і обладнання та схвалення організацій і персоналу, залучених до виконання цих завдань. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0316-19#Text>
23. Antonov-132. URL:
<file:///E:/2023/%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%8C/AN-132.pdf>
24. Повітряний кодекс України. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text>
25. Закон України «Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми розвитку авіаційної промисловості на 2021-2030

роки» від 01.09.2021 р. № 951. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/951-2021-%D0%BF#Text>

26. Закон України Про розвиток літакобудівної промисловості URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2660-14#Text>
27. Бурлаков В. І., Дмитрієв С.О., Салімов Р.М. Людський фактор при технічному обслуговуванні авіаційної техніки. К., 2011. 184 с.
28. Філяшкін М.К. Програмне забезпечення моделювання систем цивільної авіації. К: НАУ, 2017. 244 с.
29. Скрипець А.В. Регіональний/магістральний літак та його авіоніка. К: НАУ, 2016. 352 с.
30. Зайончковський, Г.Й. Технічна діагностика систем авіаційного гідроприводу : навчальний посібник. К.: НАУ, 2001. 184 с.
31. Орлов О. В. Керування процесами технічного обслуговування авіаційної техніки : навчальний посібник. К.: НАУ, 2001. 108 с.
32. Кудрін А.П., Зайвенко Г.М. Ремонт повітряних суден і авіаційних двигунів : Підручник. К. : НАУ, 2002. 491 с.
33. Чоха Ю. М. Прикладні автоматизовані системи діагностування та підтримки прийняття експлуатаційних рішень: методи, моделі, інформаційні технології. К.: Університет "Україна", 2010. 488 с.
34. Щепотьєв О. І. Надійність авіаційної наземної техніки : підручник. К. : НАУ-друк, 2009. 328 с.
35. Н. Sadraey. Aircraft Performance: An Engineering Approach
Видавництво: Routledge, 2017. 570 p.
36. Mike Tooley. Aircraft Digital Electronic and Computer Systems. 2nd Edition Engineering & Technology. London : Routledge, 2022. 412 p.
37. Mike Tooley. Aircraft Digital Electronic and Computer Systems. 3rd Edition Engineering & Technology. London : Routledge, 2013. 264 p.
38. Mike Tooley. Aircraft Communications and Navigation Systems, 2nd ed 2nd Edition. Publisher : Routledge, 2017. 362 p.
39. Харченко В.П. Остроумов І.В. Авіоніка: навч. посіб. К. : НАУ, 2013. 272 с.

40. R.P.G. Collinson. Introduction to Avionics Systems. Third Edition. Springer Science United Kingdom, 2011. 530 p.
41. Dale Crane Practical Electricity for Aviation Maintenance Technicians. Publisher: Aviation Supplies & Academics, 2017. 408 p.
42. Thomas Eismin. Aircraft Electricity and Electronics, Seventh Edition 7th Edition. Publisher: McGraw Hill, 2019. 640 p.
43. Ian Moir, Allan Seabridge. Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration, 3rd Edition. Publisher: Wiley, New York, 2011. 560 p.
44. Ian Moir, Allan Seabridge, Malcolm Jukes. Civil Avionics Systems, 2nd Edition. Publisher: Wiley, New York, 2013. 608 p.
45. David Wyatt. Aircraft Flight. Instruments and Guidance Systems: Principles, Operations and Maintenance Taschenbuch. Publisher: Routledge, 2014. 272 p.
46. M. Tooley. Aircraft Digital Electronic and Computer Systems. Publisher: Routledge, 2013. 264 с.
47. Lloyd Dingle, Mike Tooley. Aircraft Engineering Principles. Publisher: Routledge, 2013. 624 p.
48. Ватан М.І., Водчиць О.Г., Добровольський Ю.Б. Український авіаційний військовий словник: Т.1 . К. : НАУ, 2016. 656 с.
49. Акмалдінова О.М., Авер'янова Ю.А., Будко Л.В. Тематичний словник авіаційної термінології. К.: НАУ, 2013. 716 с.
50. Grant Thornton. Aerospace & Defense Update: Mergers, Acquisitions and the Operating Environment. Publisher: Wiley, Alexandria, 2016. 52 p. URL: https://www.grantthornton.in/globalassets/1.-member-firms/india/assets/pdfs/us_aerospace_whitepaper_spring_2013.pdf
51. McGuire St. Global value chains and state support in the aircraft industry. Business and Politics. Vol. 16. Issue 4., 2014. P. 615–639.