

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КАЛМИКОВА НАТАЛІЯ ГРИГОРІВНА**

УДК 662.75:621.593.3

**ДИНАМІКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОЛИВ У ПРОЦЕСІ  
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГЕЛІКОПТЕРІВ «AIRBUS HELICOPTERS H-145»**

161 «Хімічні технології та інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань  
16 «Хімічна інженерія та біоінженерія»

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_Калмикова Н. Г.

Науковий керівник ЄФІМЕНКО Валерій Володимирович,  
кандидат технічних наук, доцент

Київ 2023

## АНОТАЦІЯ

Калмикова Н.Г. Динаміка показників якості олив у процесі експлуатації гелікоптерів «Airbus Helicopters H-145». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 16 «Хімічна інженерія та біоінженерія» за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія». – Національний авіаційний університет, 2023 рік.

Дисертаційна робота присвячена визначенню динаміки зміни основних фізико-хімічних показників якості синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 у процесі реальних умов експлуатації гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» з двигунами MBV-BK117 та мінеральної оливи МК-8п, яка використовується у системах змащування військових гелікоптерів Мі-6 (двигун Д-25В, турбокомпресорна частина) за стендових умов випробування з різним напрацюванням (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 годин нальоту) задля оцінки їх якості та прогнозування працездатності.

У вступі наведено мету та завдання дисертаційного дослідження, а також обґрунтовано актуальність даної теми. Також визначено наукову новизну, сформульовано практичне значення отриманих результатів. Продемонстровано зв'язок дослідження з науковими темами. Крім того, надано інформацію про 31 наукову публікацію автора, 23 з яких за тематикою роботи, серед яких 5 статей у фахових виданнях, апробацію результати роботи пройшли як матеріали статті на 18 міжнародних конференціях, враховуючи конференцію в Італії (Флоренція) та на міжнародному конгресі.

У першому розділі проведено аналіз умов роботи синтетичних та мінеральних олив у двигунах гелікоптерів та повітряних суден, показано вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на зміну показників якості змащувальних матеріалів.

На основі проведеного критичного аналізу умов роботи олив у двигунах виділено основні тренди наукових досліджень, а також ряд невирішених проблем

та напрямків які потребують розробки нових рішень у можливостях використання в двигунах даних змащувальних матеріалів.

На основі проведеного аналізу, було сформовано основне завдання дисертаційної роботи, а також ряд науково-технічних задач, які необхідно виконати для реалізації мети роботи, сформульовані методики проведення досліджень та алгоритм виконання задач, що вирішуються в роботі.

У другому розділі досліджено технологічні процеси виробництва синтетичної Mobil Jet Oil 254 та мінеральної МК-8п олив, досліджено технологічні схеми, вуглеводневий склад та його вплив на фізико-хімічні та експлуатаційні властивості олив. Наведено основні показники якості Mobil Jet Oil 254 відповідно до стандарту MIL-PRF-23699-HTS та МК-8п відповідно до стандарту ГОСТ 6457. Досліджено пакет присадок до олив та показано їх вплив на основні експлуатаційні властивості.

У третьому розділі досліджені методики визначення основних показників якості синтетичної та мінеральної олив, а також наведено схеми приладів та стандартизованого обладнання, що застосовувалось у лабораторних випробуваннях синтетичної Mobil Jet Oil 254 та мінеральної МК-8п олив. Усі методики випробувань показників якості оливи Mobil Jet Oil 254 приведено до міжнародних стандартів ISO, ASTM, вказаних у паспорті якості на цю оливу, а для оливи МК-8п – ГОСТ (ДСТУ) на методи випробувань, які повністю корелюються між собою.

У четвертому розділі викладений матеріал щодо проведення досліджень динаміки зміни основних показників якості синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 у процесі реальних умов експлуатації гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» та стендових випробуваннях за цих же умов експлуатації оливи МК-8п. Основні показники якості олив, що підлягали дослідженню з напрацюванням у двигуні 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 годин: густина; кінематична в'язкість( за температур 40 °C, 100 °C та -40 °C); загальне лужне число; температура спалаху; колір; температура застигання (кристалізації); вміст механічних домішок та води; випаровування; трибологічні характеристики.

Проводячи літературний аналіз зарубіжних публікацій виявлено позитивний вплив фулеренових присадок у процесі трибологічних випробувань. Дослідники показали зменшення коефіцієнта тертя у підшипниках ковзання під час використання фулеренів у змащувальних матеріалах у 10 раз. Тому, нами було проведено трибологічні випробування олив Mobil Jet Oil 254 та МК-8п з фулереновими присадками на чотирьохкульковій машині тертя та встановлено недоцільність використання фулеренів у змащувальних матеріалах для підшипників кочення із-за незначного позитивного приросту трибологічних характеристик.

У п'ятому розділі проведено порівняльний аналіз та дослідження випаровуваності паливно-мастильних матеріалів, оскільки це впливає на втрату їх, в тому числі оливи, від випаровування, що в свою чергу здійснює вплив на безпеку польотів. Розроблена методика та обладнання для проведення таких випробувань, оскільки стандартами на паливно-мастильні матеріали це не передбачено.

У шостому розділі наведені рекомендації щодо застосування та впровадження результатів досліджень проведених у дисертаційній роботі та подальших їх апробацій.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

На підставі теоретичних і практичних досліджень, виконаних у дисертаційній роботі:

- Вперше було досліджено та проведено порівняльний аналіз зміни основних фізико-хімічних та експлуатаційних показників якості синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 у процесі реальних умов експлуатації гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» з двигунами MBV-BK117 та мінеральної оливи МК-8п, яка використовується у системах змащування гелікоптерів Мі-6 (двигун Д-25В, турбокомпресорна частина) за стендових умов випробування з різним напрацюванням (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 годин нальоту), що дозволяє оцінити якість змащувальних матеріалів та спрогнозувати терміни їх заміни.

- Встановлено та експериментально доведено, що працездатність та

екологічність оливи Mobil Jet Oil 254 суттєво краща за МК-8п, яка застосовується для змащування підшипників турбіни та унеможлиблюється її використання для гелікоптерів Airbus Helicopters H-145 та інших, що мають єдину систему змащування для двигуна і редуктора. Застосування Mobil Jet Oil 254 може бути альтернативою в системах змащування замість МК-8п, що сприятиме раціональному використанню моторних олив.

- Проаналізовано умови роботи олив у газотурбінних двигунах гелікоптерів та вперше показано, що після зупинки двигуна за рахунок відсутності відводу тепла від деталей, відбувається різке зростання температури оливи у вузлах тертя до 180-200 °С, що призводить до інтенсифікації окисних процесів, зміни фізико-хімічних та експлуатаційних показників якості та впливає на терміни її заміни.

- Вперше проведено трибологічні випробування оливи Mobil Jet Oil 254 з фулереновмісними присадками та доведено недоцільність їх використання у підшипниках кочення турбіни гелікоптера як протизносних присадок за умов проведених досліджень.

- Набули подальшого розвитку експериментальними підтвердженнями теоретичні положення хімотології, які в сукупності вирішують важливу наукове завдання з теоретичного та науково-практичного обґрунтування динаміки зміни основних показників якості олив у процесі реальних умов експлуатації гелікоптерів «Airbus Helicopters H-145».

#### **Отримав подальший розвиток:**

- теоретичні положення хімотології, які в сукупності вирішують важливе наукове завдання з теоретичного та науково-практичного обґрунтування динаміки зміни основних показників якості олив у процесі реальних умов експлуатації гелікоптерів «Airbus Helicopters H-145».

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

Одержані в дисертаційній роботі результати є підґрунтям для ефективного використання змащувальних матеріалів у процесі експлуатації у двигунах повітряних суден та прогнозування термінів їх заміни по динаміці зміни показників якості олив.

Практично вагомими вважаються такі результати:

- розроблено практичні рекомендації щодо заміни оливи залежно від напруження, аналізу зміни фізико-хімічних показників у процесі експлуатації та факторів, що найбільш впливають на швидкість зміни показників якості оливи під час її роботи у системі змащування та подальшої оцінки працездатності;
- запропоновано проводити заміну мінеральної оливи МК-8п після 150 год, за тих же самих умов експлуатації, оскільки кінематична в'язкість її зростає понад 60 %, що характеризує інтенсифікацію процесів окиснення вуглеводнів та смолоутворення, а загальне лужне число зменшується на 50 % завдяки спрацюванню лужних присадок, що призведе до зростання зносу деталей двигуна;
- подано заявку на корисну модель «Пристрій для дренажування паливних баків повітряних суден», реєстраційний номер u202304109.
- розроблено практичні рекомендації 10 Хімотологічному центру МО України щодо можливої заміни оливи МК-8п, на випадок закінчення її запасу, що застосовується для потреб військової авіації, на альтернативні синтетичні оливи Mobil Jet Oil 254, Mobil Jet Oil II, які за фізико-хімічними та експлуатаційними показниками якості перевищують останню, після проведення випробувань, передбачених Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України.

Результати дисертаційної роботи апробовано і використано у Національному авіаційному університеті, що підтверджується Актом впровадження у навчальний процес.

**Ключові слова:** оливи; зміна показників якості; експлуатація; шарикопідшипники; нанозабруднення; очищення; окиснення; авіаційні оливи; кислотне число; знос; роботоздатність; надійність; тертя; корозія; суміш інгібіторів; мастильні рідини; наноматеріали; рН –метр; зміна якості; стабільність; властивості; мікробіологічне забруднення; «вільна» вода; паливо; зносостійкість, протизносні властивості, коефіцієнт тертя; старіння оливи; термічне розкладання; синтетична моторна олива; вода; реактивне паливо; бензин; очищення; контроль якості; визначення якості; фільтрація; оксид; вуглецеві матеріали; гравіметрія;

сірка; сульфоксид; паливно-мастильні матеріали; випаровування; втрати від випаровування; олива Mobil Jet Oil 254; олива МК-8п; показники якості; кінематична в'язкість; загальне лужне число; гелікоптер Airbus H-145; фулеренові присадки; чотирьохкулькова машина тертя; діаметр плями зносу; критичне навантаження.

## ABSTRACT

Kalmykova N.G. Dynamics of oil quality indicators during the operation of Airbus Helicopters H-145 helicopters. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 16 «Chemical engineering and bioengineering» in the specialty 161 «Chemical technologies and engineering». – National Aviation University, 2023.

The dissertation is devoted to determining the dynamics of changes in the main physico-chemical quality indicators of Mobil Jet Oil 254 synthetic oil in the process of real operating conditions of the Airbus Helicopters H-145 helicopter with MBB-BK117 engines and MK-8p mineral oil, which is used in the lubrication systems of military helicopters Mi-6 (D-25B engine, turbocharger part) under bench test conditions with different working hours (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 flight hours) to evaluate their quality and predict performance.

In the first chapter, an analysis of the operating conditions of synthetic and mineral oils in helicopter and aircraft engines is carried out, the influence of external and internal factors on changes in the quality indicators of lubricating materials is shown.

Based on the critical analysis of the working conditions of oils in engines, the main trends of scientific research, as well as a number of unsolved problems and directions that require the development of new solutions in the possibilities of using these lubricating materials in engines, are highlighted.

On the basis of the conducted analysis, the main task of the dissertation work was formed, as well as a number of scientific and technical tasks that must be completed in order to realize the goal of the work, research methods and an algorithm for the tasks to be solved in the work were formulated.

In the second chapter, the technological processes of the production of synthetic Mobil Jet Oil 254 and mineral MK-8p oils were studied, technological schemes, hydrocarbon composition and its influence on the physico-chemical and operational



properties of oils were studied. The main quality indicators of Mobil Jet Oil 254 according to the MIL-PRF-23699-HTS standard and MK-8p according to the GOST 6457 standard are presented. The package of oil additives is studied and their influence on the main operational properties is shown.

In the third chapter, methods of determining the main quality indicators of synthetic and mineral oil are studied, as well as diagrams of devices and standardized equipment used in laboratory tests of synthetic Mobil Jet Oil 254 and mineral MK-8p oil are given. All methods of testing the quality indicators of Mobil Jet Oil 254 oil are brought to the international standards of ISO, ASTM, specified in the quality passport for this oil, and for MK-8p oil - GOST (DSTU) for test methods that are fully correlated with each other.

In the fourth chapter, the material related to research on the dynamics of changes in the main quality indicators of synthetic oil Mobil Jet Oil 254 in the process of real conditions of operation of the helicopter «Airbus Helicopters H-145» and bench tests under the same conditions of operation of MK-8p oil is presented. The main indicators of the quality of the oils that were to be studied with 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 hours of operation in the engine: density; kinematic viscosity (at temperatures of 40 °C, 100 °C and -40 °C); total alkalinity; flash point; color; solidification (crystallization) temperature; the content of mechanical impurities and water; evaporation; tribological characteristics.

Conducting a literary analysis of foreign publications, the positive influence of fullerene additives in the process of tribological tests was revealed. Researchers have shown a 10-fold reduction in the coefficient of friction in plain bearings when using fullerenes in lubricants. Therefore, we conducted tribological tests of Mobil Jet Oil 254 and MK-8p oils with fullerene additives on a four-ball friction machine and established the impracticality of using fullerenes in lubricating materials for rolling bearings due to a slight positive increase in tribological characteristics.

In the fifth chapter, a comparative analysis and study of the evaporation of fuel and lubricant materials is carried out, as this affects their loss, including oil, from evaporation, which in turn affects flight safety. The methodology and equipment for

conducting such tests have been developed, since the standards for fuel and lubricants do not provide for this.

The sixth chapter contains recommendations on the application and implementation of the results of the research conducted in the dissertation and their subsequent approvals.

Scientific novelty of the obtained results:

On the basis of theoretical and practical research carried out in the dissertation:

- For the first time, a comparative analysis of changes in the main physico-chemical and operational quality indicators of Mobil Jet Oil 254 synthetic oil in the process of real operating conditions of the Airbus Helicopters H-145 helicopter with MBB-BK117 engines and MK-8p mineral oil, which is used in the lubrication systems of Mi-6 helicopters (D-25B engine, turbocharger part) under bench test conditions with different operating hours (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 flight hours), which allows to evaluate the quality of lubricating materials and predict terms their replacements.

- It has been established and experimentally proven that the performance and environmental friendliness of Mobil Jet Oil 254 oil is significantly better than MK-8p, which is used to lubricate turbine bearings and makes it impossible to use it for Airbus Helicopters H-145 helicopters and others that have a single lubrication system for the engine and gearbox. The use of Mobil Jet Oil 254 can be an alternative in lubrication systems instead of MK-8p, which will contribute to the rational use of motor oils.

- For the first time, tribological tests of Mobil Jet Oil 254 oil with fullerene-containing additives were carried out and the impracticability of their use in rolling bearings of a helicopter turbine as anti-wear additives was proven under the conditions of the conducted studies.

- The theoretical propositions of chemtology, which collectively solve an important scientific task of theoretical and scientific-practical substantiation of the dynamics of changes in the main indicators of oil quality in the process of real conditions of operation of helicopters «Airbus Helicopters H-145», have gained further development with experimental confirmation.

Received further development:

- theoretical provisions of chemtology, which collectively solve an important scientific task of theoretical and scientific-practical substantiation of the dynamics of changes in the main indicators of oil quality in the process of real conditions of operation of helicopters «Airbus Helicopters H-145».

Practical significance of the obtained results:

The results obtained in the dissertation are the basis for the effective use of lubricating materials in the process of operation in aircraft engines and forecasting the terms of their replacement based on the dynamics of changes in oil quality indicators.

The following results are considered practically significant:

- practical recommendations were developed for oil replacement depending on working hours, analysis of changes in physico-chemical parameters during operation and factors that most affect the rate of change of oil quality indicators during its operation in the lubrication system and further performance assessment;

- it is proposed to replace MK-8p mineral oil after 150 hours, under the same operating conditions, since its kinematic viscosity increases by more than 60 %, which characterizes the intensification of the processes of hydrocarbon oxidation and tar formation, and the total alkaline number decreases by 50 % due to the activation alkaline additives, which will lead to increased wear of engine parts;

- an application was submitted for the utility model «Device for draining aircraft fuel tanks», registration number u202304109.

- practical recommendations were developed for the 10 Chemical Center of the Ministry of Defense of Ukraine regarding the possible replacement of the MK-8p oil, in case of the end of its supply, which is used for the needs of military aviation, with alternative synthetic oils Mobil Jet Oil 254, Mobil Jet Oil II, which according to physico-chemical and operational quality indicators exceed the last one, after conducting the tests provided for in the Instructions for Quality Control of Fuel and Lubricant Materials and Special Fluids in the State Aviation of Ukraine.

The results of the dissertation work have been tested and used at the National Aviation University, which is confirmed by the Act of introduction into the educational process.

**Keywords:** oils; change in quality indicators; operation; ball bearings; nanopollution; cleaning; oxidation; aviation oils; acid number; wear and tear; working capacity; reliability; friction; corrosion; a mixture of inhibitors; lubricating fluids; nanomaterials; ph meter; change in quality; stability; properties; microbiological contamination; "free" water; fuel; wear resistance, anti-wear properties, coefficient of friction; oil aging; thermal decomposition; synthetic motor oil; water; jet fuel; gasoline; cleaning; quality control; definition of quality; filtration; oxide; carbon materials; gravimetry; sulfur; sulfoxide; Fuel and lubricants; evaporation; losses from evaporation; Mobil Jet Oil 254 oil; oil MK-8p; quality indicators; kinematic viscosity; total alkalinity; helicopter Airbus H-145; fullerene additives; four-ball friction machine; diameter of wear spot; critical load.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

#### *Статті у фахових періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus:*

1. Valerij Yefymenco, Tetiana Kravchuk, Mykola Kravchuk, Roman Zhyla, Nataliia Kalmykova. Change in the main indicators of oil quality in the processes of operation of Airbus H-145 Helicopters. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2023, 31(3), p.p. 642-650. <http://chemistry.dnu.dp.ua/issue/view/16907> (Scopus, Web of Science).

*Особистий внесок здобувача — участь у плануванні та практичне виконання досліджень, оброблення отриманих даних.*

#### *Статті у фахових виданнях України:*

1. Oleksandrenko V.P., Yefymenko V.V., Efimenko O.V., Kalmykova N.G. Resistant Properties of Lubricating Materials with Fullerene Nanoadditives. *Problems of Tribology*. V. 28, № 2/108-2023. P. 28-36.  
DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36>

*Особистий внесок здобувача — участь у плануванні та практичне виконання досліджень, оброблення отриманих даних.*

2. Єфіменко В. В., Олександренко В. П., Руденко В. М., Єфіменко О. В., Калмикова Н. Г. Перспективи використання фулеренових присадок у сучасних авіаційних оливах. *Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях». Вісник «НТУ» XIII*. № 3 (17), 2023. С. 17-25.  
DOI :10.20998/2413-4295.2023.03.04.

*Особистий внесок здобувача — участь у плануванні та практичне виконання досліджень, оброблення отриманих даних.*

3. Калмикова Н. Г. Бойченко С. В. Яковлева А. В. Технології запобігання втратам (емісії) вуглеводнів з паливних баків транспортних засобів. *Вісник НАУ. Технічні науки*. 2021. № 3. С. 22-34.

URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/50/022-034.pdf>

DOI:10.33744/2308-6645-2021-3-50-022-034

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

4. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Причинно-наслідковий взаємозв'язок емісії вуглеводнів і втрат бензинів у горизонтальних резервуарах. Причини, фактори, джерела. *Наукоємні технології*. 2020. № 2. С. 218-235. DOI: 10.18372/2310-5461.46.14810

URL: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/44138/1/14810-38802-1-PB.pdf>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

### ***Опубліковані праці апробаційного характеру:***

1. Єфименко В.В., Єфіменко О.В., Калмикова Н. Г. Контроль та визначення концентрації фулеренових присадок у вуглеводневих рідинах. *Авіа-2021: тези доп. XV міжнародної науково-техн. конф. (м. Київ, 20-21 квітня 2021р.)* К., 2021. С.19.10 -19.13.

URL: <http://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2021/paper/view/8308/6860>

*Особистий внесок здобувача — участь у плануванні та практичне виконання досліджень, оброблення отриманих даних.*

2. Єфименко В.В., Калмикова Н. Г. Оливи та умови їх роботи в системі змащування гелікоптерів. *Хімія та сучасні технології: тези доп. X ювілейної міжн. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 23-24 листопада 2021р.)* Дніпро. 2021. Т. 2. С. 92-94. URL: <https://udhtu.edu.ua/studentskinaukovizahodu>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

3. Yefymenko Valerii, Kalmykova Nataliia, Kravchuk Tetiana. Oils for gas turbine engines of «AIRBUS HELICOPTERS H-145». *The XVIII International Scientific and Practical Conference «Advancing in research, practice and education»*: тези доп. міжнар.конф. (Florence, Italy, May 10 – 13, 2022), Italy. 677 p. P. 585-590. UDC 01.1, ISBN – 979-8-88526-737-3, DOI – 10.46299/ISG.2022.1.18 .

URL: <https://isg-konf.com/uk/advancing-in-research-practice-and-education-two/>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

4. Єфименко В.В., Калмикова Н. Г. Оцінка якості олив для газотурбінних двигунів гелікоптерів. *Поступ у нафтопереробній та нафтогазовій промисловості*: тези доп. XI міжнародної науково-технічної конференції. (м. Львів, 16-20 травня 2022р.) Львів. 2022. С. 68-71.

URL: <http://apqip.lviv.ua/wp-content/uploads/2022/05/apqip-11-abstracts.pdf>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

5. Єфименко В.В., Єфіменко О.В. Калмикова Н. Г. Оцінка якості моторних олив у процесі їх експлуатації. *Поступ у нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості*: тези доп. X міжнародної наук.-техніч. конф. (м. Львів, 18-23 травня 2020 р.) Львів. 2020. С. 71-74.

URL: <http://apqip.lviv.ua/wp-content/uploads/2020/05/apqip-10-abstracts.pdf>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

6. Єфименко В.В., Калмикова Н.Г. Техногенне навантаження на природне середовище ПММ у процесі експлуатації гелікоптерів. *Новітні досягнення біотехнології*: тези доп. V міжнар.-практич. конф. (м. Київ, 22-23 вересня 2021р.) Київ. 2021. С. 49-51.

URL: [https://drive.google.com/file/d/16BoRX42kbgI4sdTT02P7hXgHIw\\_phtOI/view](https://drive.google.com/file/d/16BoRX42kbgI4sdTT02P7hXgHIw_phtOI/view)

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за*

*проблематикою дослідження, участь в обговоренні, написання тез.*

7. Єфименко В.В., Калмикова Н. Г. Технології підвищення екологічної безпеки від випаровування ПММ під час експлуатації гелікоптерів. *Сучасні хімічні технології: екологічність, інновації, ефективність*: тези доп.: всеукраїнська наук.-практич. конф. (м. Херсон, 7 – 8 жовтня 2021 р.) Херсон, 2021. С.42. URL: <http://surl.li/lreyg>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні, написання тез.*

8. Єфименко В.В. Калмикова Н. Г. Аспекти впливу повітряного транспорту на навколишнє середовище та шляхи їх вирішення. *Екологічна безпека, інженерія та технології*: тези доп. симпозіуму X-го Всесвітнього конгресу «Авіація в XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології», (Київ, 28-30 вересня 2022 р.) Київ. 2022. С. 4.1.75-4.1.77. URL:

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8887/7277>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні, написання тез.*

9. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Технологии потерь углеводородов из топливных баков автомобилей. *Автомобиле- и тракторостроение*: тези доп. міжнар. наук.-практич. конф. (м. Мінськ, 25 - 28 травня 2021р.) Мінськ. 2021. С. 115-118. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/108361>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

10. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Новітні технології підвищення екологічної безпеки паливних баків наземної техніки. *Екологічна безпека держави*: тези доп. XV всеукр. наук.-практич. конф. молодих учених і студентів. (м. Київ, 22 квітня 2021р.) Київ. 2021. С. 10. URL: [https://febit.nau.edu.ua/wp-content/uploads/2022/05/zbirnyk\\_ebd-2021-2.pdf](https://febit.nau.edu.ua/wp-content/uploads/2022/05/zbirnyk_ebd-2021-2.pdf)

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*



11. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Дослідження проблеми емісії вуглеводнів методом Ісікави. *Сучасні технології переробки паливних копалин*: тези доп. IV міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 15-16 квітня 2021р.) Харків. 2021. С. 52-55.

URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/4e981b56-9e7a-42dc-9778-269d7ab76ad2/content>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

12. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Вплив емісії вуглеводнів під час технологічних операцій з бензинами на працівників АЗС. *Еколого-гігієнічні аспекти здоров'я та біобезпеки населення*: тези доп. всеукр. наук.-практич. конф. з міжнародною участю. (м. Київ, 07-08 квітня 2021р.) Київ. 2021. С. 251-255. URL: <http://surl.li/lrewr>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

13. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Застосування технологій обліку емісії компонентів бензинів для підвищення ефективності технологічних операцій та механізмів техногенного впливу на довкілля. *ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ*: тези доп. XVII наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених (м. Київ, 25-26 листопада 2020 р.) С. 407-410.

URL: [http://celes.nau.edu.ua/sites/default/files/mat\\_20.pdf](http://celes.nau.edu.ua/sites/default/files/mat_20.pdf)

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

14. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Причинно-наслідковий аналіз втрат нафтопродуктів. Сучасний стан і перспективи вирішення. *Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості*: тези доп. X міжнародної наук.-техніч. конф. (м. Львів, 18-23 травня 2020 р.) Львів. 2020. С. 32-36. URL: <http://apqip.lviv.ua/wp-content/uploads/2020/05/apqip-10-abstracts.pdf>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

15. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Екологічні та токсичні наслідки втрат вуглеводнів внаслідок випаровування. *Екологічна безпека держави*: тези доп. XIV всеукр. наук.-практичн. конф. молодих учених і студентів. (м. Київ, 23 квітня 2020 р.) Київ. 2020. С.12.

URL:<http://apis.chnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/07/2020-Zbirka-tez-EkoBezpeka-derzhavi-pro-monitoring-min.pdf>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

16. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Джерела втрат нафтопродуктів під час різних технологічних операцій з ними. *Сучасні технології переробки паливних копалин*: матеріали III міжнародної наук.-техн. конф. (м. Харків, 16-17 квітня 2020 р.) Харків. 2020. С. 44-47. URL: <http://surl.li/lreqt>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

17. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Альтернативное спиртсодержащее биотопливо – как способ улучшения физической стабильности автомобильного бензина. *Science – Future of Lithuania. Transport Engineering and Management* : матеріали 22 th Conference for Lithuanian Junior Researchers. Vilnius Gediminas Technical University (Lithuania), (Vilnius, 22-23 November 2019). (ID-235; TRACK-TSGT).

URL:<http://jmk.transportas.vgtu.lt/index.php/tran2017/tran2019/paper/viewFile/235/246>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

18. Бойченко С. В. Калмикова Н. Г. Причинно-наслідковий аналіз стану емісії вуглеводнів під час виконання технологічних операцій з бензинами. *Сучасні хімічні технології: екологічність, інновації, ефективність*: матеріали всеукр. наук.-практичн. конф. (м. Херсон, 3-4 жовтня 2019 р.) Херсон, 2019. С. 27-28.

URL: <http://surl.li/lrepq>

*Особистий внесок здобувача – аналіз літературних джерел за проблематикою дослідження, участь в обговоренні.*

ЗМІСТ	
АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	8
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	13
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ОЛИВ У СИСТЕМАХ ЗМАЩУВАННЯ ГЕЛІКОПТЕРІВ	29
1.1. Умови роботи олив у системах змащування двигунів повітряних суден	29
1.2. Система змащування гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» з двигунами MBV-BK117	34
1.3. Вимоги до авіаційних олив газотурбінних двигунів	39
1.4. Контроль показників якості олив	41
1.5. Аналіз зміни основних показників якості олив у процесі експлуатації	43
Висновки до розділу 1	50
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА ОЛИВ	52
2.1. Виробництво та використання олив для гелікоптерів	52
2.2. Технологічні процеси виробництва мінеральної оливи МК-8п	55
2.3. Технологічні процеси виробництва синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254	61
2.4. Присадки для покращення експлуатаційних властивостей олив	69
2.5. Взаємозамінність олив	77
Висновки до розділу 2	80
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОЛИВ ДЛЯ ГЕЛІКОПТЕРІВ	81
3.1. Аналіз методів і методик визначення води та механічних домішок в оливах	81
3.1.1. Візуальний метод визначення вмісту механічних домішок і води в оливах	81
3.1.2. Кількісні методи визначення вмісту механічних домішок і води в оливах	82
3.2. Методика визначення густини олив	86
3.3. Метод та методика визначення в'язкості олив	89
3.4. Визначення загального лужного числа олив	90

3.5. Методика визначення кольору олив	91
3.6. Визначення температури спалаху олив	92
3.7. Визначення температури застигання олив	95
3.8. Методика визначення трибологічних характеристик сучасних авіаційних олив	96
Висновки до розділу 3	103
<b>РОЗДІЛ 4. ДИНАМІКА ЗМІНИ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОЛИВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ</b>	105
4.1. Динаміка зміни вмісту води в авіаційних оливах	107
4.2. Визначення вмісту масової частки механічних домішок в оливах у процесі експлуатації	112
4.3. Динаміка зміни густини авіаційних олив Mobil Jet Oil 254 Та МК-8п. залежно від їх напрацювання	114
4.4. Динаміка зміни кінематичної в'язкості та загального лужного числа авіаційних олив	116
4.5. Визначення кольору олив залежно від їх напрацювання	132
4.6. Визначення динаміки температури спалаху олив залежно від напрацювання	133
4.7. Динаміка зміни температури застигання олив у процесі їх експлуатації	135
4.8. Визначення трибологічних характеристик сучасних авіаційних олив	138
Висновки до розділу 4	146
<b>РОЗДІЛ 5. ВИПАРОВУВАННЯ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ</b>	149
5.1. Оцінка втрат нафтопродуктів від випаровування	149
5.2. Методика визначення втрат вуглеводнів від випаровування	154
5.3. Випаровування олив	158
5.3.1. Визначення випаровування моторних олив методом ASTM D5800 (тест NOACK)	160
5.3.2. Визначення випаровування авіаційних олив методом ASTM D972	161

Висновки до розділу 5	163
РОЗДІЛ 6. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	164
ВИСНОВКИ	172
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ	177
ДОДАТКИ	195

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Україна, здійснюючи інтеграцію у світове та європейське співтовариство, виконуючи свої зобов'язання перед своїми стратегічними партнерами, придбала 10 гелікоптерів фірми «Airbus Helicopters» для потреб Міністерства внутрішніх справ з метою оперативного реагування на нестандартні ситуації та використання їх у цілях екстреної медичної допомоги.

Для системи змащування двигунів «Airbus Helicopters» застосовують оливу Mobil Jet Oil 254, що працює за температури до 115 °С, у процесі експлуатації якої відбуваються значні зміни фізико-хімічних показників якості, хімічного складу, експлуатаційних та екологічних властивостей, які негативно впливають на безпеку польотів.

Одним із важливих напрямків забезпечення надійності роботи газотурбінних двигунів є контроль працездатності змащувальних олив та визначення зміни показників якості в процесі експлуатації, що впливає на періодичність та термін їх заміни.

Сучасні двигуни для гелікоптерів характеризуються великими швидкостями обертання ротора турбіни, високими температурами газів, багатоступеневим підвищенням тиску повітря і температури в компресорі. Результатом цього є значні теплові навантаження на вузли тертя та оливи, які виконують функції не лише змащувальних матеріалів для зменшення тертя та зносу деталей, а й охолодження вузла тертя.

Під час експлуатації змащувальні матеріали взаємодіють з механізмами обладнання авіаційної техніки і, як наслідок такої взаємодії, вони накопичують інформацію щодо нормальної чи аномальної роботи обладнання, а саме, про термодинамічні, хімічні та фрикційні процеси, що протікають у вузлах і системах змащення.

У процесі роботи в підшипниках ротора оливи змінюють свої фізико-хімічні показники під впливом зовнішніх факторів – температури, тиску, кисню повітря, активної дії металів. Це комплексний складний процес, що включає у собі зміну хімічних і фізичних параметрів оливи під час експлуатації.

Вдосконалення техніки, більш теплонавантажена робота двигунів, вузлів і агрегатів системи змащування, призвела до необхідності періодичного контролю зміни показників якості олив та більш детальному аналізу їх роботи в змащувальних системах для забезпечення надійності і довговічності їх роботи та безпечності польотів.

Аналіз фізико-хімічних параметрів під час експлуатації авіаційної техніки допомагає здійснити раннє виявлення можливих поломок або несправностей та уникнути коштовного ремонту або подальшого пошкодження деталей.

Відсутність контролю якості олив під час експлуатації та визначення граничного стану їх показників, не гарантують обґрунтованості термінів їх заміни відповідно до реальних умов роботи.

Тому актуальними є проведення дослідження зміни фізико-хімічних показників якості олив у динаміці під час експлуатації авіаційної техніки. Дотримання цієї норми сприятиме підвищенню ефективності використання олив та зниженню витрат, що підтверджує екологічну та економічну доцільність проведення робіт у цьому напрямку.

Окрім того, олива МК-8п використовується для авіатехніки, яка перейшла в спадок Україні від колишньої держави та виробляється в країні-агресора. Вона використовується у двигунах Д-30КП для військово-транспортної авіації (ІЛ-76), двигунах Ру -19Д-300 (Ан-24, Ан-26, Ан-30) та входить до складу маслосумішей СМ-4,5 для двигуна АІ-24 цих же повітряних суден та двигуна АІ-20М (Ан-12), а також військових гелікоптерах Мі-6 (двигун Д-25В, турбокомпресорна частина). Із-за відсутності поставок цієї оливи актуальним стає питання проведення досліджень щодо можливості її заміни альтернативною оливою.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційне дослідження виконувалося в рамках науково–дослідної роботи (державний реєстраційний номер 0122U000513) «Зміна показників якості олив у процесі експлуатації гелікоптерів «Airbus Helicopters Н - 145» та кафедральній науково-дослідній роботі № 89/30 «Удосконалення методики розрахунку втрат бензинів внаслідок випаровування із горизонтальних

резервуарів». Державний реєстраційний номер: 0119U103152.

Роль автора в зазначених науково-дослідних роботах, у яких дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає в аналізі сучасних публікацій за даною тематикою, плануванні та виконанні експериментальної діяльності, обговоренні результатів та корегуванні методик експериментальних досліджень.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження динаміки зміни основних фізико-хімічних та експлуатаційних показників якості синтетичної Mobil Jet Oil 254 і мінеральної МК-8п олив у процесі їх напрацювання в реальних умовах у газотурбінних двигунах гелікоптерів з наступним порівняльним аналізом та наданням обґрунтованих рекомендацій щодо подальшого їх використання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі *завдання*:

- провести аналіз умов роботи синтетичних та мінеральних олив у двигунах гелікоптерів та повітряних суден;
- дослідити технологічні процеси виробництва синтетичної Mobil Jet Oil 254 та мінеральної МК-8п олив та їх вплив на показники якості;
- проаналізувати методики визначення основних показників якості синтетичної та мінеральної олив;
- провести дослідження динаміки зміни основних показників якості синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 у процесі реальних умов експлуатації гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» та стендових випробуваннях за цих же умов експлуатації оливи МК-8п. Основні показники якості олив, що підлягають дослідженню з напрацюванням у двигуні 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 годин: густина; кінематична в'язкість( за температур 40 °С, 100 °С та -40 °С); загальне лужне число; температура спалаху; колір; температура застигання (кристалізації); вміст механічних домішок та води;
- провести трибологічні випробування олив Mobil Jet Oil 254 та МК-8п з вуглецевими матеріалами на чотирьохкульковій машині тертя та встановити доцільність використання фулеренів у змащувальних матеріалах;
- проаналізувати випаровуваність паливно-мастильних матеріалів;



- навести рекомендації щодо застосування та впровадження результатів досліджень проведених у дисертаційній роботі та подальших їх апробацій.

**Об’єкт дослідження** – процес зміни показників якості синтетичної та мінеральної оливи у турбореактивних двигунах гелікоптерів у процесі їх експлуатації.

**Предмет дослідження** – синтетична Mobil Jet-Oil 254 та мінеральна МК-8п оливи та їх експлуатаційні та фізико-хімічні показники якості.

**Методи дослідження.** Для дослідження динаміки зміни фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 застосовували стандартні методи випробовування відповідно до міжнародного стандарту MIL-PRF-23699-HTS, а для мінеральної оливи МК-8п відповідно до ГОСТ 6457; льотні дослідження для оливи Mobil Jet Oil 254; стендові випробування для оливи МК-8п; стендові трибологічні випробування оливи Mobil Jet Oil 254 та МК-8п з фулереновими присадками на чотирьохкульковій машині тертя.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

На підставі теоретичних і практичних досліджень, виконаних у дисертаційній роботі:

1. Вперше було досліджено та проведено порівняльний аналіз зміни основних фізико-хімічних та експлуатаційних показників якості синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 у процесі реальних умов експлуатації гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» з двигунами MBV-BK117 та мінеральної оливи МК-8п, яка використовується у системах змащування гелікоптерів Мі-6 (двигун Д-25В, турбокомпресорна частина) за стендових умов випробування з різним напрацюванням (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 годин нальоту), що дозволяє оцінити якість змащувальних матеріалів та спрогнозувати терміни їх заміни.

2. Встановлено та експериментально доведено, що працездатність та екологічність оливи Mobil Jet Oil 254 суттєво краща за МК-8п, яка застосовується для змащування підшипників турбіни та унеможлиблюється її використання для гелікоптерів Airbus Helicopters H-145 та інших, що мають єдину систему змащування для двигуна і редуктора. Застосування Mobil Jet Oil 254 може бути

альтернативою в системах змащування замість МК-8п, що сприятиме раціональному використанню моторних олив.

3. Проаналізовано умови роботи олив у газотурбінних двигунах гелікоптерів та вперше показано, що після зупинки двигуна за рахунок відсутності відводу тепла від деталей, відбувається різке зростання температури оливи у вузлах тертя до 180-200 °С, що призводить до інтенсифікації окисних процесів, зміни фізико-хімічних та експлуатаційних показників якості та впливає на терміни її заміни.

4. Вперше проведено трибологічні випробування оливи Mobil Jet Oil 254 з фулереновмісними присадками та доведено недоцільність їх використання у підшипниках кочення турбіни гелікоптера як протизносних присадок за умов проведених досліджень.

5. Набули подальшого розвитку експериментальними підтвердженнями теоретичні положення хімотології, які в сукупності вирішують важливу наукове завдання з теоретичного та науково-практичного обґрунтування динаміки зміни основних показників якості олив у процесі реальних умов експлуатації гелікоптерів «Airbus Helicopters H-145».

**Практичне значення отриманих результатів.** Одержані в дисертаційній роботі результати є підґрунтям для ефективного використання змащувальних матеріалів у процесі експлуатації в двигунах повітряних суден та прогнозування термінів їх заміни за динамікою зміни показників якості олив.

*Практично вагомими вважаються такі результати:*

- розроблено практичні рекомендації щодо заміни оливи залежно від напруження, аналізу зміни фізико-хімічних показників у процесі експлуатації та факторів, що найбільш впливають на швидкість зміни показників якості оливи під час її роботи у системі змащування та подальшої оцінки працездатності;

- запропоновано проводити заміну мінеральної оливи МК-8п після 150 год, за тих же самих умов експлуатації, оскільки кінематична в'язкість її зростає понад 60 %, що характеризує інтенсифікацію процесів окиснення вуглеводнів та смолоутворення, а загальне лужне число зменшується на 50 % завдяки спрацюванню лужних присадок, що призведе до зростання зносу деталей двигуна;

- подано заявку на корисну модель «Пристрій для дренажування паливних баків повітряних суден», реєстраційний номер u202304109.

- розроблено практичні рекомендації 10 Хімотологічному центру МО України щодо можливої заміни оливи МК-8п, на випадок закінчення її запасу, що застосовується для потреб військової авіації, на альтернативні синтетичні оливи Mobil Jet Oil 254, Mobil Jet Oil II, які за фізико-хімічними та експлуатаційними показниками якості перевищують останню, після проведення випробувань, передбачених Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України.

Результати дисертаційної роботи апробовано і використано у Національному авіаційному університеті, що підтверджується Актом впровадження у навчальний процес.

**Особистий внесок здобувача.** Автор дисертаційної роботи самостійно виконала експериментальні дослідження та приймала безпосередню участь в постановці завдань, формулюванні і обґрунтуванні мети та завдань, опрацюванні та узагальненні одержаних результатів, формулюванні основних теоретичних положень і висновків.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати досліджень доповідалися на конференціях: XV Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2021» (Київ, 2021); X Ювілейна міжнародна науково-практична конференція «Хімія та сучасні технології» (Дніпро, 2021); The XVIII International Scientific and Practical Conference «Advancing in research, practice and education» (Florence, Italy, 2022); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ у нафтопереробній та нафтогазовій промисловості» (Львів, 2022); X Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості» (Львів, 2020); V Міжнародно-практична конференція «Новітні досягнення біотехнології» (Київ, 2021); Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні хімічні технології: екологічність, інновації, ефективність» (Херсон, 2021); Симпозіум X-го Всесвітнього конгресу «Авіація в XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології» «Екологічна безпека, інженерія та

технології» (Київ, 2022 р); Міжнародна науково-практична конференція «Автомобиле- и тракторостроение» (Мінськ, 2021р); XV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави» (Київ, 2021); IV Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології переробки паливних копалин» (Харків, 2021р); Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Еколого-гігієнічні аспекти здоров'я та біобезпеки населення» (Київ, 2021р); XVII Науково-технічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених «Інноваційні технології» (Київ, 2020); XIV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави» (Київ, 2020); III Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології переробки паливних копалин» (Харків, 2020); 22 th Conference for Lithuanian Junior Researchers. Science – Future of Lithuania. Transport Engineering and Management (Vilnius, 2019); Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні хімічні технології: екологічність, інновації, ефективність» (Херсон, 2019).

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень та зміст роботи викладено у 23 наукових працях: 5 статей у фахових виданнях України (з них 1 видання, що включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), 18 матеріалів і тез доповідей на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних та всеукраїнських.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел літератури (198 найменувань) та 1 додатку. Загальний обсяг дисертації – 195 сторінок. Додаток викладений на 1 сторінці. Дисертація містить 13 таблиць, 43 рисунки.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ОЛИВ У СИСТЕМАХ ЗМАЩУВАННЯ ГЕЛІКОПТЕРІВ

#### 1.1. Умови роботи олив у системах змащування двигунів повітряних суден

Україна, здійснюючи інтеграцію у світове та європейське співтовариство, виконуючи зобов'язання перед своїми стратегічними партнерами, придбала 10 гелікоптерів фірми «Airbus Helicopters» H-145 для потреб Міністерства внутрішніх справ з метою оперативного реагування на нестандартні ситуації та використання їх для екстреної медичної допомоги. Сучасні авіаційні газотурбінні двигуни (ГТД) характеризуються великими швидкостями обертання ротора, високою температурою газів та ступенем їх стискування в компресорі. Результатом цього є значні теплові навантаження на вузли тертя та оливи, які виконують функції не лише змащувальних матеріалів для зменшення тертя та зносу деталей, а й охолодження вузла тертя [1-3].

У роботах [2-3] показано, що газотурбінні двигуни поділяються на турбореактивні та турбогвинтові. У двигунах першого типу використовують малов'язкі оливи, для вигунів другого типу – більш в'язкі. Ця відмінність пояснюється конструктивними особливостями турбогвинтового двигуна. Повітряний редуктор, яким він оснащений, передає великі зусилля в умовах високих частот обертання, тому необхідно використовувати оливи зі збільшеною несучою здатністю. Таким чином, у турбогвинтових двигунах використовують авіаційні оливи з більш високою в'язкістю, ніж у турбореактивних [4].

Основними вузлами змащування в турбореактивних авіаційних двигунах є підшипники кочення, на відміну від вузлів змащування поршневих двигунів в яких переважає тертя ковзання. Коефіцієнт тертя кочення знаходиться в межах 0.001-0.003 для кулькових і 0.003-0.005 для роликів підшипників, тоді як для підшипників ковзання цей показник становить 0.01 [5-7].

Температура зовнішньої обойми підшипників кочення сягає 125-150 °С, яка створюється за рахунок тепла, що надходить від крильчатки турбіни. Після зупинки двигуна, коли зменшується обдув повітрям, тепловий потік, що надходить від крильчатки, розігріває обойму підшипника і оливу, що його змащує і відводить тепло із зони тертя, до температури понад 200 °С (рис.1.1).

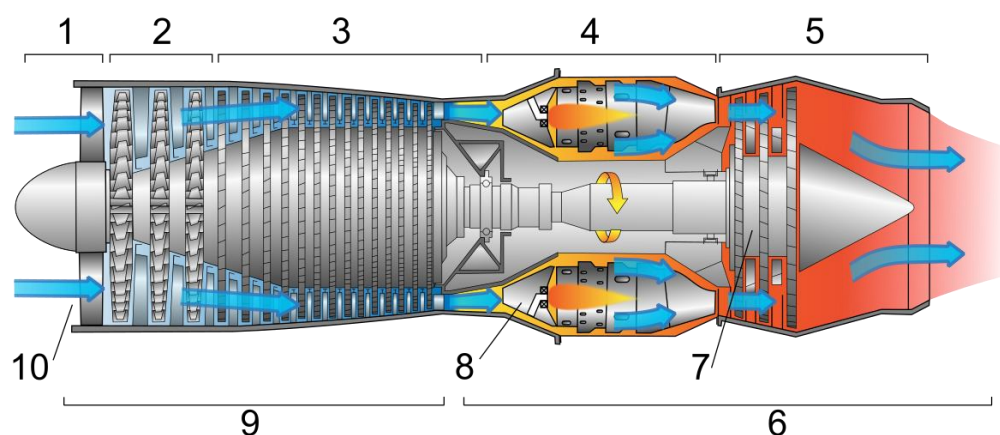


Рис. 1.1. Газотурбінний двигун:

1 – впуск повітря; 2 – знижений тиск компресії; 3 – підвищений тиск компресії;  
4 – горіння; 5 – вихлоп; 6 – гарячий тракт; 7 – турбіна; 8 – камера згорання;  
9 – холодний тракт; 10 – повітрозабірник

Щоб уникнути перегріву вузлів тертя, авіаційна олива постійно повинна змащувати і відводити тепло від підшипників, редуктора, трансмісії, шарнірів втулок гвинтів.

Температурні умови роботи оливи в різних зонах змащування ГТД відрізняються. Передній підшипник турбокомпресора нагрівається до температури 150 °С, а задні підшипники турбіни розігріваються за рахунок більш нагрітих деталей двигуна до температур понад 200-250 °С, що призводить до розігріву оливи на виході з підшипників, залежно від напруженості роботи двигуна, до температур понад 100 -140 °С. Підшипники турбіни розігріваються не лише під час роботи двигуна, а й під час його зупинки, коли подача оливи для охолодження підшипників і подача повітря для охолодження турбіни

припиняється, а тепло від гарячих деталей двигуна протягом деякого часу надходить до вузла тертя, що призводить до окиснення оливи.

У роботах [1-4] показано також зміну температури вузла тертя та оливи залежно від її прокачування по системі змащування та теплонапруженості роботи двигуна (рис. 1.2).

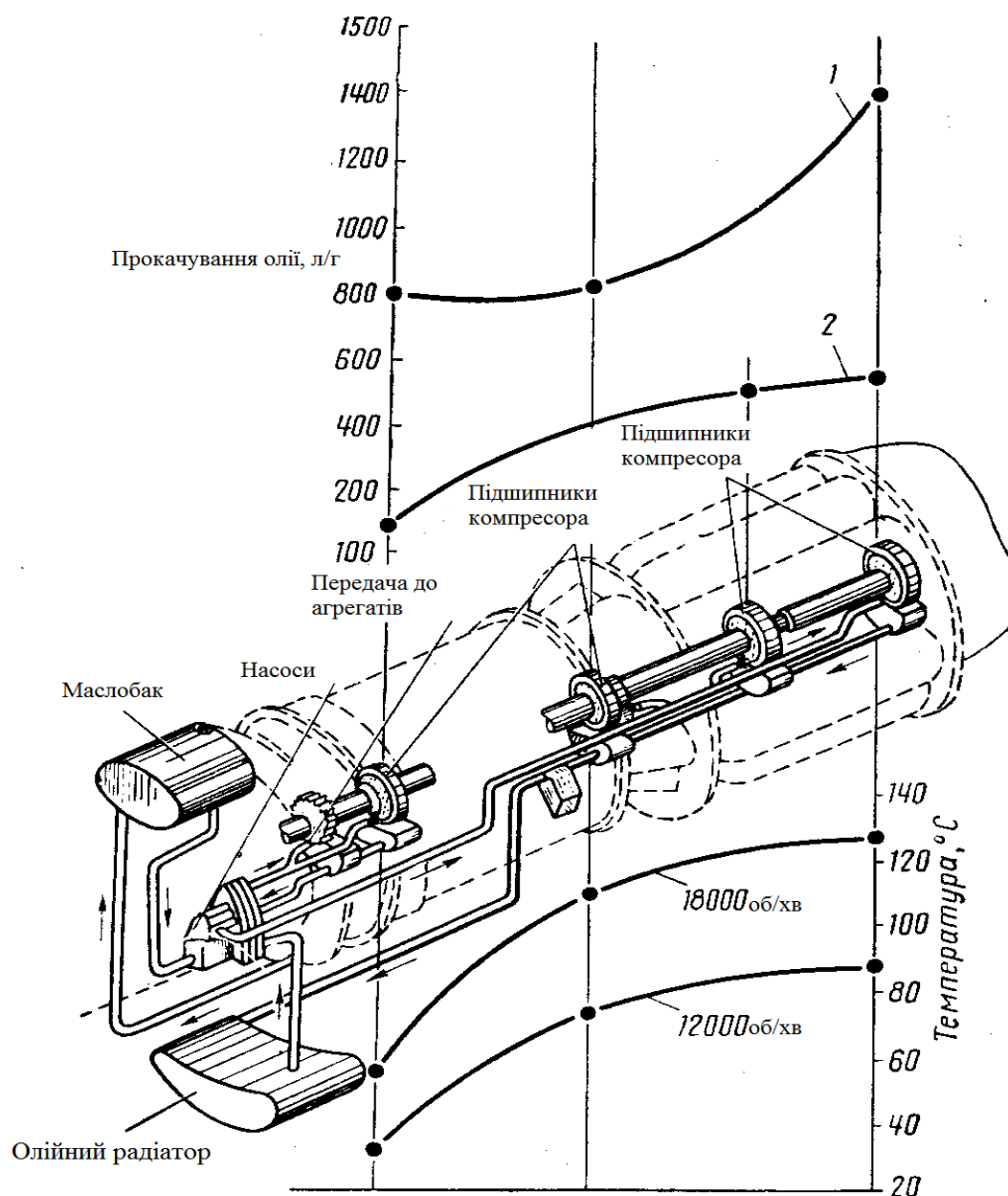


Рис.1.2. Зміна температури та прокачування оливи в підшинниках газотурбінного авіаційного двигуна: 1 – з осьовим компресором; 2 – з відцентровим компресором

Як показано в даній роботі, що при збільшенні обертів турбокомпресора температура підшипників зростає. У той самий час, підвищується температура оливи, яка у сучасних дозвукових газотурбінних двигунах може сягати понад 100 °С, що спонукає інтенсифікації процесів окиснення вуглеводнів, утворення смолистих відкладень на деталях змащування, зменшення від них тепловідводу. Важливу роль відіграє кратності циркуляції оливи у системі змащування, яка сягає 50-90 раз за год, а також її охолодження в радіаторах до температур 40-50 °С.

Нагрів оливи до високих температур призводить до зміни основних фізико-хімічних та експлуатаційних показників якості, що визначають придатність змащувальних матеріалів до використання. Цими основними показниками якості є: густина; кінематична в'язкість; температура спалаху; вміст механічних домішок і води; загальне лужне число; колір; температура застигання; випаровуваність; трибологічні характеристики [8-14]. У цих роботах визначаються показники якості товарних олив та після їх напрацювання в двигуні, але ніхто із науковців не проводив дослідження щодо динаміки зміни цих показників, що дозволяє прогнозувати та цілеспрямовано оцінювати обмеження щодо використання олив, які досягли критичного експлуатаційного рівня.

До вибору оливи для змащування редукторів трансмісії гелікоптерів необхідно підходити дуже уважно. Сьогодні є великий їх асортимент, але необхідно приділяти увагу показникам якості, які залежать від технологічних процесів виробництва та якості сировини. Наприклад, малов'язкі нафтові оливи мають недостатні змащувальні та низькотемпературні властивості, а високов'язкі – прокачуваність по системі за низьких температур. Окрім того, для змащування редукторів трансмісій не бажано застосовувати суміші олив, оскільки це ускладнює експлуатацію гелікоптерів і може негативно вплинути на безпеку польотів.

Авіаційні оливи повинні забезпечувати надійність змащування всіх вузлів двигуна, охолодження деталей тертя та відведення із зони тертя абразивних частинок зносу. Вони повинні мати задовільні в'язкісно-температурні властивості,



високу хімічну і термоокиснювальну стабільність, високі температури спалаху і самозаймання, мінімальні випаровування і вспінювання, а також бути інертними до корозії з конструктивними матеріалами [15-17].

З усіх вимог до якості олив для авіаційних двигунів і трансмісій найбільш важливим є вимоги до їх високої термостабільності, що характеризує здатність оливи зберігати на необхідному рівні фізико-хімічні та експлуатаційні властивості при тривалій роботі в двигуні без утворення неприпустимої кількості відкладень, продуктів окислення вуглеводнів на гарячих поверхнях і вузлах змащування двигуна у процесі експлуатації [18-20].

Зазначимо, що раніше поділ олив за типами двигунів вважався умовним, існувала думка, що у всіх двигунах зручніше використовувати єдину марку оливи, що володіє високими експлуатаційними властивостями. За сучасними уявленнями, вирішальну роль при визначенні можливості застосування тієї чи іншої оливи відіграють умови експлуатації, зокрема, теплонапруженість і навантаження на вузли тертя [21].

У ряді двигунів теплонапруженість зменшується, а навантаження на вузли тертя, навпаки, зростає, у зв'язку з чим до одних олив пред'являються підвищені вимоги щодо термоокиснювальної стабільності, а до інших - щодо несучої здатності.

Старіння олив під час роботи у двигунах являє собою дуже складний процес. Підвищена температура і кисень повітря, з яким контактує олива, викликають окиснення і окиснювальну полімеризацію її молекул. Такі продукти окиснення вуглеводнів, як смоли, органічні кислоти, присутні в оливі в розчиненому стані, сприяють збільшенню в'язкості і кислотного числа, а асфальтенові сполуки, які є основою для утворення лаків, відкладаються на поверхнях деталей та перешкоджають відводу від них тепла. Продукти глибокої окисної полімеризації, що відкладаються в зонах високої температури і надходять назад в картер, погіршують нормативні показники якості оливи [22-24].

Таким чином, в картері працюючого двигуна утворюється складна суміш оливи з найрізноманітнішими продуктами її старіння, від яких повністю очистити

оливу фільтрацією не вдається, внаслідок чого в ній накопичується кількість забруднюючих частинок.

Найсучасніші оливи мають забезпечувати працездатність механізмів у широкому діапазоні температур (від - 50-70 до + 300 °C). Значне збільшення в'язкості оливи під час охолодження і її зниження під час високих температур, може порушити нормальне функціонування машин і механізмів.

## **1.2. Система змащування гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» з двигунами MBV-BK117**

Силові установки гелікоптерів мають, як правило, дві роздільні маслосистеми: для турбокомпресорної частини і для редуктора. Для змащування підшипників кочення турбокомпресорної частини застосовуються малов'язкі оливи, що характеризуються високою прокачуваністю по системі змащування та легкістю розбризгування оливи через форсунки на підшипники кочення. Оливи редуктора, як правило, більш високов'язкі, що дозволяє забезпечувати частково рідинний вид тертя, оскільки редуктора працюють у більш жорстких умовах, ніж підшипники кочення турбіни. Наявність двох роздільних маслосистем зумовило і два різних підходи до забезпечення змащування силових установок гелікоптерів, а саме: або застосування різних марок олив для турбокомпресорної частини і редуктора, або, навпаки, використання єдиної марки оливи з більш високою змащувальною здатністю.

У циркуляційних системах олива із вузла тертя після очистки, відділення від неї повітря, охолодження повертається в бак або на вхід у нагнітаючий насос двигуна.

Особливістю системи змащування гелікоптера H-145 з двигунами MBV-BK117 є наявність єдиної системи змащування для двигуна і редуктора, що потребує застосування універсальної оливи, якою є Mobil Jet Oil 254 [25].

При цьому мають місце ті ж тенденції, що і для будь-яких газотурбінних двигунів: зростання їх теплонапруженості, підвищення температури

контактуючих з оливою деталей двигуна і її робочих температур, необхідність застосування термостабільних змащувальних матеріалів. Для забезпечення надійного змащування шестерень редукторів потрібні оливи з більшою в'язкістю і, як наслідок, більшою несучою здатністю.

На рис. 1.3 зображено основні вузли змащування двигуна MBV-BK117 гелікоптера Н-145 [25].

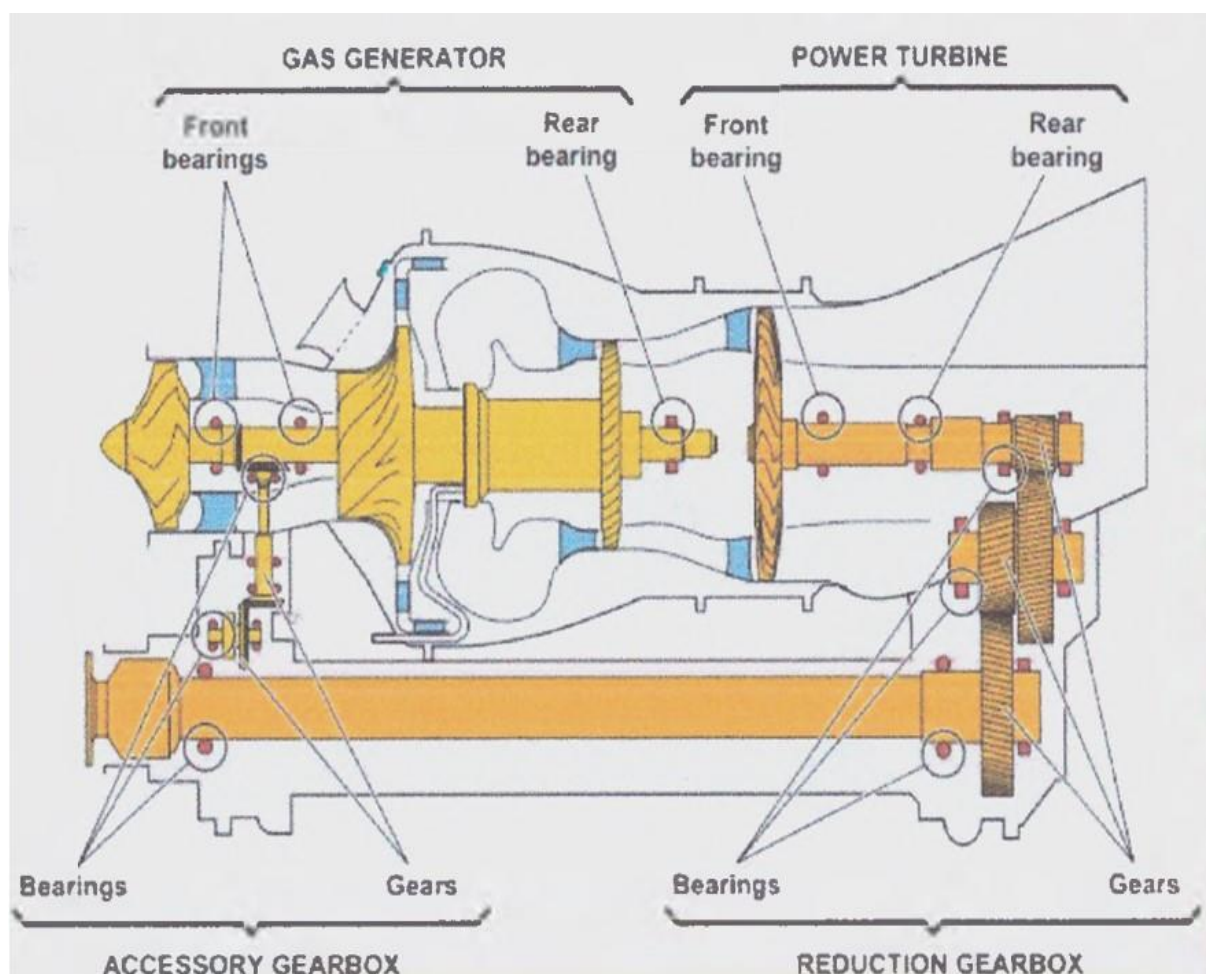


Рис. 1.3. Вузли змащування двигуна MBV-BK117 гелікоптера Н-145

Основними вузлами змащування є:

- газогенератор (осьовий компресор, відцентровий компресор, турбіна), передні шарики підшипники (front bearings), задній роликовий підшипник (rear bearing);

- силова турбіна (Power Turbine), у якій змащується передній шарииковий підшипник (front bearing) і задній шарииковий підшипник (rear bearing);
- додаткова коробка передач (Accessory Gearbox), вузлами змащування якої є шариикові підшипники та шестерні;
- редуктор (Reduction Gearbox), шариикові і роликові підшипники (Bearings) та шестерні (Gears).

Потужність від двигуна гелікоптера передається несучому і хвостовому гвинтам через трансмісію, що складається з муфт, валів, редукторів (головного, проміжного і редуктора хвостового гвинта). Головні редуктори, редуктори несучих гвинтів мають великі передаточні співвідношення, оскільки понижують швидкість обертання ротора двигуна до необхідної швидкості обертання гвинтів. Тому, для забезпечення надійного змащування шестерень редукторів турбогвинтових двигунів потрібні оливи з більшою несучою здатністю і, як наслідок, що мають більшу в'язкість.

Протиріччя у вимогах до якості мінеральних олив, що повинні поєднувати високу змащувальну здатність із задовільними в'язкісно-температурними характеристиками для забезпечення надійного запуску двигуна за низьких температур, призвели до необхідності використання для змащування редукторів гвинта гелікоптерів та турбогвинтових двигунів суміші з малов'язких мінеральних та високов'язких олив. Причому співвідношення вказаних олив у сумішах є різним для різних типів двигунів. Наприклад, для цього використовують подвійну систему змащування для гелікоптерів. Для системи змащування турбокомпресорної частини військових гелікоптерів Мі-6 використовується малов'язка мінеральна олива МК-8п, а для змащування редукторів – суміші малов'язкої оливи МК-8п та високов'язкої МС-20 ( суміші олив 75 % об. МС-20 та 25 % об. МК-8п) [26].

Застосування автономної системи змащування проміжних і хвостових редукторів дозволяє заливати масло безпосередньо в картер редуктора. Пари тертя редукторів змащуються під тиском насосів примусово та барботажем (розбризуванням). Примусова подача оливи здійснюється насосом, який разом з

фільтром та запобіжним клапаном розміщується в корпусі редуктора. Змащування розбризгуванням здійснюється за рахунок того, що шестерня частково занурена в оливу і при її обертанні створюється емульсія, яка забезпечує достатнє змащування усіх шестерень редуктора. Застосування таких систем змащування підвищує безпеку польотів гелікоптерів, але ускладнює їх експлуатацію і контроль працездатності олив.

Вирішенням цього протиріччя є застосування одноконтурної системи змащування, що використовується в гелікоптерах Airbus Helicopters H-145. Для змащування підшипників турбіни і редуктора використовується синтетична олива Mobil Jet Oil 254 [25].

На рис. 1.4 зображено схему системи змащування гелікоптера Airbus Helicopters H-145 [25].

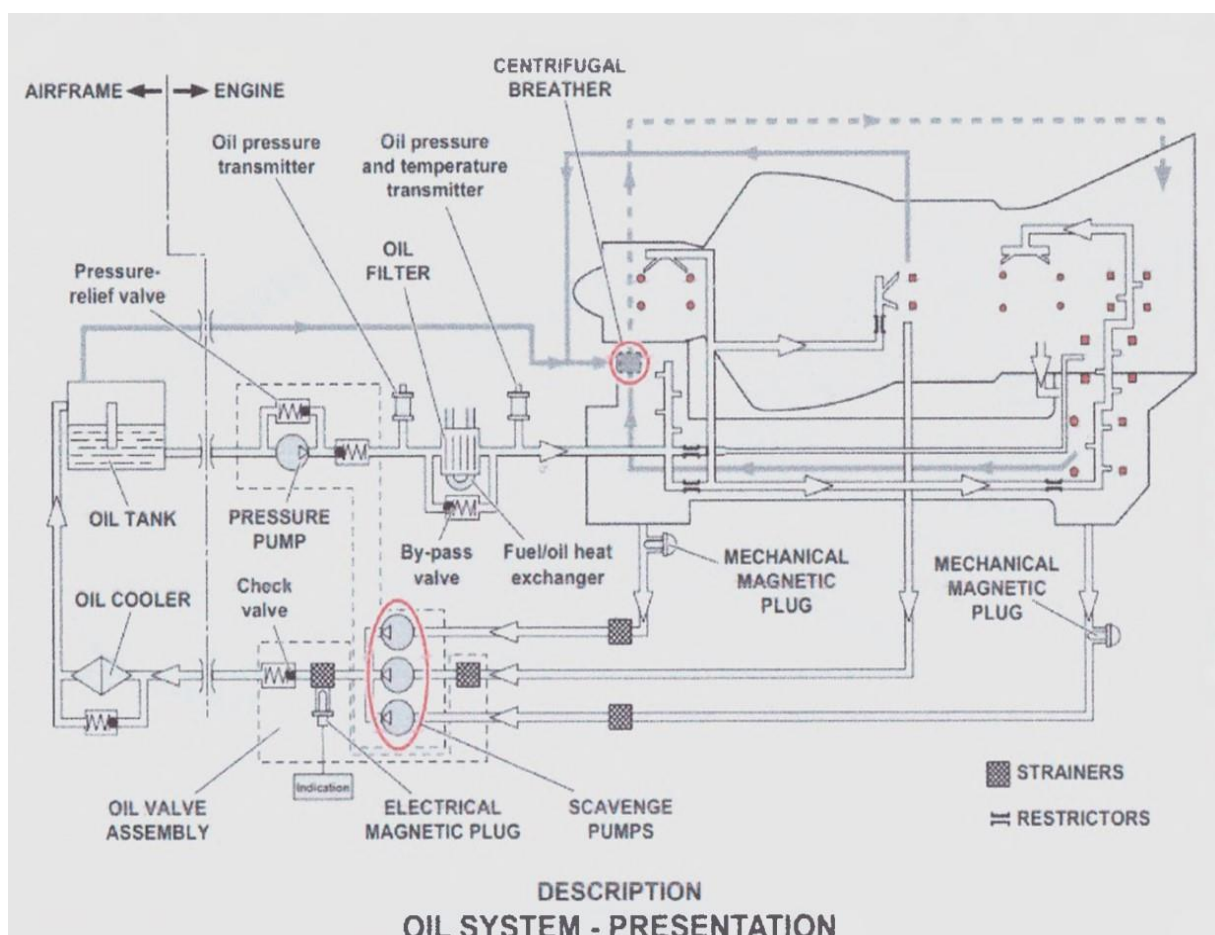


Рис. 1.4. Схема системи змащування гелікоптера Airbus Helicopters H-145

Циркуляційна система оливи має три характерні ділянки. Перша – від бака з оливою (oil tank) до підкачуючого насоса (pressure pump), що називається магістраллю всмоктування оливи. Для зменшення гідравлічного опору ця ділянка є прямою і короткою. Покращення роботи насоса здійснюється установкою бака вище насоса. Для очистки оливи від механічних домішок застосовується фільтр для оливи (oil filter) та датчики контролю тиску (oil pressure) та температури оливи (oil temperature).

Друга ділянка – знаходиться між нагнітаючим і відкачуючими насосами. Це внутрішня магістраль. Олива подається на форсунки, здійснюючи змащування та відвід тепла від підшипників турбіни та редуктора.

Третя ділянка – від відкачуючих насосів до бака з оливою, називається відкачуючою магістраллю. Відкачуючими насосами (scavenge pumps) олива через охолоджуючий радіатор (oil cooler) повертається назад в бак.

Моніторинг та індикація тиску оливи, температури, забруднення виводиться на панель пілота гелікоптера (рис. 1.5.)

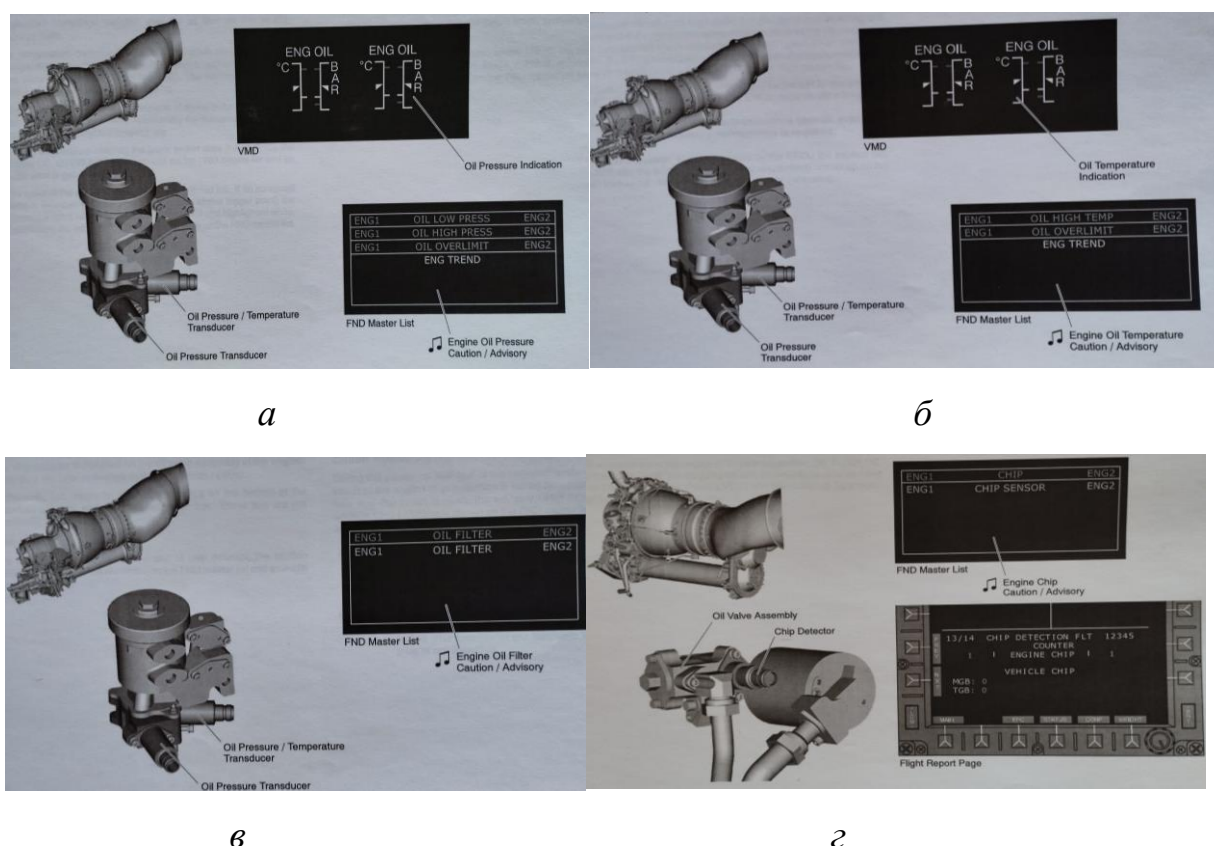


Рис.1.5. Моніторинг та індикація параметрів оливи: *а* – тиск;  
*б* – температура; *в* – забруднення фільтра; *г* – забруднення оливи

Спрацювання на панелі індикації датчика наявності металевої стружки або пилу є першою ознакою аномальної роботи вузлів тертя двигуна.

Залежно від режимів роботи двигуна та системи змащування редуктора температура оливи не повинна перевищувати 115 °С. Нагрів оливи у системі змащування до таких температур при наявності кисню повітря призводить до зміни їх фізико-хімічних показників якості, що впливає на терміни експлуатації [25].

### **1.3. Вимоги до авіаційних олив газотурбінних двигунів**

Умови роботи олив у системах змащування гелікоптерів відрізняються від умов роботи олив у поршневих двигунах насамперед тим, що олива в системі практично не стикається із зоною горіння паливо-повітряної суміші, а змащує лише підшипники та редуктор.

Стінки камери згоряння газотурбінного двигуна не зв'язані з системою змащування, хоча тепловідвід здійснюється. У цих двигунах олива не піддається глибокому розкладанню та вигорянню, хоча окисні процеси протікають за умов підвищених температур, контакту з киснем повітря та каталітичної дії металів.

Невелика порівнюючи з двигунами поршневого типу втрата оливи від випаровування, величина якої зумовлюється лише її втратою через суфлери.

Враховуючи, що в сьогоденних турбореактивних двигунах втрата оливи невелика (0,65-1,60 кг/год), але є потреба відведення значної кількості тепла, в систему змащування заливають оливу в малих кількостях (5-13 л) та здійснюється багатократна її циркуляція через вузли тертя двигуна та редуктора. Наприклад, для системи змащування Н -145 Airbus Helicopters олива зберігається не в двигуні, а у зовнішніх алюмінієвих масляних баках. Об'єм бака становить 5,7 л. Максимальна кількість заповнення бака не повинна перевищуватися 4,33 л. Додатковий обсяг слугує простором для розширення та вентиляції. Таким чином, за такого об'єму олива циркулює по системі змащування 50-70 разів за год. [25].

Щоб регулювати температуру підшипників потрібно прокачувати через них



оливу в різних кількостях, що є одним з охолодних агентів двигуна турбореактивного типу. Так, через підшипники турбіни прокачується приблизно вдвічі більше оливи, ніж через підшипники компресора.

Під час збільшення кількості обертів турбокомпресора температура підшипників зростає. В той самий час, підвищується температура оливи. В новітніх дозвукових турбокомпресорних двигунах температура оливи може сягати 80-100 °С, але після виходу з радіатора охолодження температура оливи знижується до 40-50 °С.

У двигунах які мають потужність 7000-9000 кґс температура зовнішньої обойми підшипника турбіни може досягати 130-160 °С, як правило за рахунок тепловідводу від крильчатки турбіни.

Під час зупинки двигуна, зменшується його обдув повітрям, тепловий потік, що надходить від крильчатки, призводить до розігріву обойми підшипника до 150-200 °С, що призводить до пришвидшення процесів окиснення вуглеводнів оливи, втрат від випаровування та зменшення термінів експлуатації [27-28].

У газотурбінних двигунах відсутні значні циклічні навантаження на опори підшипників на відміну від поршневих двигунів, де вони створюються через передачу зусиль від поршня через кривошипно-шатунний механізм.

Вал компресора та турбіни в газотурбінному двигуні врівноважений та обертається з доволі рівномірною швидкістю. Через те його найбільше навантаження на підшипник в межах 1400 кґс, а у двигунах поршневого типу навантаження на корінні підшипники колінчастого валу доволі часто перевищує за 9000 кґс.

Проаналізувавши умови роботи оливи для газотурбінних двигунів гелікоптерів, узагальнемо основні до них вимоги:

- Ефективне змащування всіх вузлів та механізмів двигуна з мінімальним зношуванням у діапазоні експлуатаційних температур від -50 °С до +150 °С;
- Полога в'язкісно-температурна крива і задовільне прокачування при низьких температурах (пускові властивості авіаційної оливи повинні забезпечувати надійний запуск двигуна без підігріву до температури -50°С);



- Однорідний та стабільний фракційний склад, що дає мінімальну випаровуваність фракцій та зберігає в'язкісні характеристики авіаційної оливи під час усього робочого періоду двигуна (краще застосовувати авіаоливи вузького фракційного складу - синтетичні);
- Високі антиокиснювальні властивості та мінімальне окислення у двигуні при робочих температурах  $+100 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  і вище;
- Мінімальна вспінюваність та випаровуваність;
- Висока температура самозаймання та спалаху;
- Корозійна стійкість та неагресивність до металів, сплавів, гумотехнічних виробів, покриттів, клеїв та інших матеріалів.

#### **1.4. Контроль показників якості олив**

Контроль якості олив полягає у визначенні значень фізико-хімічних показників їхніх властивостей для встановлення відповідності вимогам стандартів, або технічних умов. Контроль якості – це процес встановлення відповідності між фактичними показниками якості та нормативними документами [26, 29].

Якість будь-яких паливно-мастильних матеріалів (ПММ) систематично контролюють, починаючи з моменту їхнього виробництва і завершуючи заправкою в баки повітряних суден. Об'єм аналізів і термін їхнього проведення на різних етапах системи контролю регламентуються відповідними інструкціями та розпорядженнями. Організація нафтопродуктопостачання зобов'язана видавати споживачеві паспорт якості на кожен партію нафтопродуктів, що поставляється. Паспорт якості є основним документом, який характеризує відповідність нафтопродукту вимогам нормативно-технічної документації.

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 8402 якість – це сукупність властивостей та характеристик продукції, що дають їй можливість задовольняти зумовлені чи передбачувані потреби.

Якість паливно-мастильних матеріалів – це сукупність їх властивостей, що

визначають здатність цих матеріалів задовольняти встановлені вимоги їх використання відповідно до їхнього прямого призначення.

У хімотології всі властивості ПММ умовно поділяють на три групи: фізико-хімічні, експлуатаційні та екологічні.

Фізико-хімічні властивості – це фізичні та хімічні властивості ПММ, які визначаються різними методами аналізу в лабораторних умовах. До них належать: густина, в'язкість, температура спалаху, теплота згоряння, показник заломлення, випаровуваність, кислотність, температура початку кристалізації та ін.

Експлуатаційні властивості – це властивості ПММ, які проявляються під час використання їх безпосередньо у двигунах, механізмах та системах повітряних суден (паливної, масляної, гідравлічної). До них належать: чистота, тобто відсутність у авіаційних ПММ вільної води та механічних домішок, мийні, корозійні, протизносні властивості, схильність до нагаро-, лако- і осадоутворення, вміст фактичних смол та ін.

Екологічні властивості – це властивості авіаційних ПММ, які проявляються при їх взаємодії, або взаємодії продуктів їхнього згоряння з навколишнім середовищем. До них належать: токсичність, пожежо- і вибухонебезпечність, стабільність під час зберігання, випаровуваність та ін.

Властивості авіаційних ПММ характеризуються так званими показниками якості, кількісне оцінювання яких дає можливість встановити відповідність якості продуктів вимогам ДСТУ (ТУ), Міжнародним стандартам, тобто їх кондиційність [30].

Проби ПММ із засобів зберігання, транспортування відбираються відповідно до вимог ДСТУ 4488:2005 та вимог щодо технічного обслуговування повітряного судна [31]. Відбір проб оливи Mobil Jet Oil 254 проводиться відповідно до вимог технічного обслуговування гелікоптера Н-145 спеціальними пробовідбірниками, в яких вони зберігаються до проведення аналізу (рис.1.6).



Рис.1.6. Відбір проб оливи із системи змащування гелікоптера Н-145

### 1.5. Аналіз зміни основних показників якості олив у процесі експлуатації

Основними фізико-хімічними та експлуатаційними показниками якості олив, що змінюються в процесі їх експлуатації і впливають на терміни заміни є: густина; кінематична в'язкість; загальне лужне число; температура спалаху; колір; температура застигання (кристалізації); вміст механічних домішок та води; випаровуваність; трибологічні характеристики, корозійні властивості.

**Густина** – це маса речовини в одиниці об'єму. Вимірюється та нормується вона відповідно до ГОСТ 3900, ASTM D1429.

Одиниця вимірювання густини – кілограм на метр кубічний ( $\text{кг/м}^3$ , або  $\text{г/см}^3$ ). Густина оливи змінюється зі зміною температури, тому для отримання порівняльних результатів густину слід вимірювати за однієї і тієї ж температури. Якщо вимірювання проводяться за іншої температури, то результати необхідно звести до стандартної температури 20 °C. У США та більшості країн Європи відносну густину нафтопродуктів зводять до температури 60 °F (за шкалою Фаренгейта, що відповідає 15,5 °C), тому в паспорті якості на імпортований нафтопродукт вказується температура заміру густини 15 °C.

Більшість науковців у своїх роботах [30, 32-33] досліджували зміну густини

оливи до експлуатації в двигуні внутрішнього згоряння та після зливання цієї оливи, що відпрацювала свій встановлений ресурс. Було показано, що у процесі експлуатації відбувається зменшення густини олив за рахунок потрапляння в них незгорівшого палива та його парів. Специфіка роботи системи змащування газотурбінних двигунів зовсім інша. У цих двигунах немає безпосереднього контакту оливи із зоною горіння, тому було поставлено завдання дослідити зміну цього показника у процесі експлуатації у двигуні гелікоптера.

**Кінематична в'язкість** – властивість рідини створювати опір відносному переміщенню шарів, тобто, це сила внутрішнього тертя між шарами рідини. В'язкість нафтопродуктів залежить від хімічного та фракційного складу і її визначають стандартним методом за ГОСТ 33, ASTM D445. За міжнародною системою одиниць динамічна в'язкість має розмірність ( $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ ), а кінематична – ( $\text{м}^2 / \text{с}$ ) або ( $\text{мм}^2 / \text{с}$ ), або сантистокс ( $1 \text{сСт} = 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с} = \text{мм}^2 / \text{с}$ ).

Кінематична в'язкість – основна фізико-механічна характеристика нафтових та синтетичних змащувальних олив. Вона характеризує здатність оливи здійснювати гідродинамічний режим змащування за робочої температури, тобто здатність забезпечувати заміну сухого тертя рідинним і відтак запобігти швидкому зношуванню матеріалу. Тому для змащувальних олив в'язкість є нормованим показником. Нормується в'язкість олив за різних температур залежно від технічних умов їх виготовлення та експлуатації.

Знову таки, багато науковців провели дослідження цього показника для конкретної марки автомобільних олив [30, 34-36], а не авіаційних.

Як показано в цих роботах, що основною причиною зміни кінематичної в'язкості є протікання процесів окиснення вуглеводнів олив під впливом високих температур їх роботи у вузлах тертя та присутності атмосферного кисню з утворення смолистих високомолекулярних речовин, які забивають фільтри, випадають в осад, відкладаються на деталях системи змащування. Тому, завданням ставилось провести порівняльний аналіз зміни цього показника якості у процесі реальних умов експлуатації гелікоптера Н-145.

**Загальне лужне число** – характеризує вміст в оливах пакету присадок, що надають їм необхідних експлуатаційних властивостей. До них належать: антиокисні; мийно-диспергувальні; протизносні та антифрикційні; в'язкісні; антикорозійні; протипінні; депресорні присадки.

Вимірювання загального лужного числа (ЗЛЧ) здійснюється за ASTM D2896, АТМ D 664, ГОСТ 11366, ISO 6619 та воно має розмірність мг КОН / 1 г оливи.

Загальне лужне число для мінеральної оливи МК-8п відповідно до ASTM D2896 повинно бути не менше 0.04 мг КОН/1г , а для Mobil Jet Oil 254 – не менше 0.08 мг КОН/1г.

Міжнародними та й українськими стандартами передбачений контроль цього показника після виробництва олив, що фіксується у паспорті якості на неї, але не передбачено обґрунтування терміну її заміни по зміні цього показника якості залежно від напрацювання оливи.

Роботи в цьому напрямку проводяться, в основному, для автомобільних олив, як найбільш вживаних [30, 32, 37-41]. У цих роботах показано, що зміна загального лужного числа понад 50 % є причиною заміни оливи вцілому, оскільки спрацьовуються присадки. Тому, проведення досліджень в цьому напрямку для конкретних авіаційних олив є актуальними.

**Температурою спалаху** називається температура, за якої олива, що нагрівається, виділяє таку кількість пари, яка утворює з навколишнім повітрям горючу суміш, що спалахує під час піднесення до неї полум'я. Цей показник характеризує випаровуваність, втрату легких фракцій від випаровування, пожежота вибухонебезпечність олив.

Сутність методу полягає у визначенні найнижчої температури, за якої в умовах досліду над поверхнею горючої речовини утворюється суміш пари з повітрям, яка здатна спалахувати від джерела запалювання, але швидкість утворення якої ще недостатня для подальшого горіння. Визначається температура спалаху в закритому тиглі за ГОСТ 6356.

Відповідно до MIL-PRF-23699-HTS температура спалаху олив Mobil Jet Oil 254 та Mobil Jet Oil II визначається за ASTM D92 у відкритому та закритому тиглях.

Для цих же олив визначається температура самозаймання відповідно до CFR 35.20, яка знаходиться в межах 389-404 °C. Цей показник не визначається для оливи МК-8п, але виходячи з того, що температура кінця кипіння її становить 450 °C, можливо передбачити переваги синтетичних олив над мінерально.

Як показано у роботах [30, 42-43], що зміна температур спалаху паливно-мастильних матеріалів, в тому числі і олив, відбувається в результаті їх випаровування, тому дослідження були направлені на вивчення динаміки зміни цього показника якості у процесі реальних умов експлуатації олив для газотурбінних двигунів гелікоптерів.

**Температурою застигання** називається температура, за якої олива втрачає свою рухливість, тобто унеможлиблюється її прокачування по системі та змащування деталей тертя.

Від температури застигання оливи здебільшого залежить можливість пуску холодного двигуна. Для надійної роботи системи живлення найнижча температура навколишнього середовища повинна бути на 10-12 °C вище температури застигання.

За зарубіжними стандартами, температурою застигання називається температура, яка на 3 °C вище дійсної температури затвердіння (кристалізації), за якої протягом 5 с олива перебуває в нерухомому стані. Визначається цей показник за стандартами ASTM D5950, ISO 3016, ASTM D 97, ГОСТ 20287.

У роботах [30, 44-45] показано зміну цього показника якості олив під час експлуатації у двигунах внутрішнього згорання, а дослідження щодо динаміки зміни показників якості синтетичних та мінеральних олив, що використовуються у системах змащування гелікоптерів у реальних умовах їх експлуатації не проводилися.

**Колір оливи** залежить від присутності в ній темних смолистих речовин і від властивостей нафти, якщо олива мінерального походження. За кольором оливи

можна лише умовно оцінити якість її очищення.

У більшості випадків цей показник є показником товарного вигляду оливи, оскільки покупець схильний оцінювати якість за її привабливим кольором. Готову товарну продукцію здебільшого не забарвлюють, і олива буває від світло-жовтого до темно-коричневого кольору. Такий натуральний колір оливи визначається і виражається чисельно за стандартами ISO 2049, ASTM D 1500, ГОСТ 20284 тощо, порівнюються із набором кольорових еталонів, які нумеруються від 0,0 (білий) до 8,0 (дуже темно-коричневий) через 0,5 од. (усього 16 номерів).

Визначення цього показника якості нас цікавив з точки зору опосередкованої оцінки утворення смолистих речовин у процесі експлуатації гелікоптерів за рахунок процесів окиснення вуглеводнів [30].

**Визначення води та механічних домішок** у оливах передбачено лише візуальним методом за критерієм *відсутність*, хоча ці показники суттєво змінюються у процесі зберігання, транспортування, експлуатації оливи у системах змащування.

Наявність води в нафтопродуктах недопустима, тому що вона прискорює розкладання, спрацювання і вимивання присадок, підсилює корозію металів. Як показано у роботах Ледовських В. М. [15], Матвєєвої О. Л. [16] вода призводить до підсилення корозійних процесів у паливних та системах змащування.

Відстійна вода зумовлює прямі пошкодження покриттів і швів баків, корозію металевих поверхонь, що у свою чергу призводить до забруднення оливи. У зимовий період вода, що знаходиться в нафтопродуктах, утворюючи кристалики льоду, може припинити їх подачу. Тому стандартами не допускається наявність води у вільному та емульсійному станах у паливах та оливах.

У роботі Єфименко В. В. [32] показано динаміку зміни води в автомобільній оливі у процесі експлуатації та негативний вплив води на роботу систем змащування, оскільки робоча поверхня цих систем нагрівається до робочих температур, як правило, що близькі або перевищують 100 °С. За такої температури вода закипає, що призводить до спінення оливи та викиду її через дренажну систему. Тому, одним із завдань дисертаційної роботи було кількісне

визначення вмісту води та механічних домішок у оливах, та оцінка їх впливу на експлуатаційні властивості.

Як відмічалось вище, в гелікоптерах «Airbus Helicopters H-145» встановлені датчики наявності або відсутності вмісту механічних домішок (пилу, стружки металу) у системі змащування. Вони не дозволяють дати оцінку кількісному вмісту механічних домішок у оливах, а лише якісно визначити їх присутність. Тому в роботі ставилася задача кількісно визначити вміст механічних домішок у змащувальних матеріалах у процесі їх експлуатації.

Кількісний метод визначення вмісту води в паливах, оливах і робочих рідинах проводиться за ГОСТ 2477, а визначення вмісту механічних домішок ваговим методом – за ГОСТ 6370, а також Міжнародними стандартами [30].

**Випаровуваність олив** характеризує їх втрату через системи суфлювання за рахунок нагрівання у вузлі змащування до високих температур. Як відмічалось вище, що в процесі роботи олив температура у вузлі тертя гелікоптерів не перевищує 100-115 °С, але під час зупинки двигуна, завдяки відсутності обдуву, температура у вузлах тертя зростає, що призводить до інтенсифікації втрат легких фракцій вуглеводнів від випаровування. Із зростанням висоти польоту зменшується тиск та зростає внаслідок цього випаровуваність оливи, що призводить до її втрати та необхідності контролю рівня.

Більшість науковців проводили дослідження випаровуваності та втрат від випаровування летких вуглеводнів – бензинів, реактивних та дизельних палив [30, 46-50].

Для мінеральної авіаційної оливи МК-8п не передбачено нормативними документами визначення втрат від випаровування, так же, як і для автомобільних олив. Для синтетичних олив Mobil Jet Oil 254 та Mobil Jet Oil II передбачено визначення цього показника відповідно до ASTM D972 протягом 6.5 год випробування. Тому, одним із завдань роботи було визначення цього показника якості олив у процесі експлуатації та проведення порівняльного аналізу з вуглеводневими паливами, наприклад, бензином, для визначення масштабів цих втрат та впливу їх на працездатність паливних та систем змащування, а також



антропогенного навантаження на екологічну систему.

**Трибологічні характеристики олив** займають важливе місце у надійності роботи техніки та впливають на терміни її експлуатації під час якої відбувається інтенсивний знос вузлів тертя в результаті значних навантажень, швидкостей та температур, впливу агресивних середовищ та вібрацій.

Проведення досліджень щодо вивчення протизносних властивостей олив та теорії тертя та зносу висвітлено у роботах Мнацаканова Р. Г., Мікосянчик О. О., Стельмаха О. У. та ін. [5-6, 51-60] у яких набули подальшого розвитку експериментальними підтвердженнями теоретичні положення трибології.

Велика потужність авіаційних редукторів, що передається, у поєднанні з їх невеликими масою й габаритами призводить до посилення умов роботи пар тертя, зростання теплової та динамічної напруженості деталей та вузлів двигуна. Шестерні редукторів, як зазначалося вище, працюють за умов високих контактних навантажень. Міцність плівок малов'язких авіаційних олив, придатних для змащування опор турбореактивних двигунів за даних умов виявляється недостатньою. Для забезпечення надійного змащування шестерень редуктора потрібні оливи з більшою в'язкістю і вищою змащувальною здатністю.

Протиріччя у вимогах до якості мінеральних олив, що повинні поєднувати високу змащувальну здатність із задовільними в'язкісно-температурними характеристиками для забезпечення надійного запуску двигуна за низьких температур, призвели до необхідності використання для змащування редукторів гвинта гелікоптерів та турбогвинтових двигунів суміші з малов'язких мінеральних та високов'язких олив. Альтернативою вирішення цього протиріччя є використання в двигуні та редукторній системі гелікоптерів H-145 Airbus Helicopters синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254. Тому, у роботі поставлена задача провести трибологічні дослідження цієї синтетичної оливи у процесі експлуатації гелікоптерів.

Одним із шляхів підвищення довговічності вузлів тертя в машинах і механізмах є підвищення якості змащувальних матеріалів, що досягається шляхом введення в них перспективних протизносних, протизадирних і антифрикційних

присадок [61-66] у тому числі вуглецевих матеріалів, продуктів піролізу вугілля, коксохімічного виробництва, вуглеграфітових матеріалів. Тому, одним із завдань роботи було проведення трибологічних досліджень олив для гелікоптерів із застосуванням фулереновмісних присадок. оскільки такі випробування були проведені вперше для даних олив.

Основними критеріями заміни будь-якої оливи, окрім спрацювання пакету присадок, є утворення продуктів окиснення. Нагрів олив, навіть до їх експлуатаційних температур, за наявності кисню зменшує термоокиснювальну стабільність вуглеводнів і призводить до виникнення твердої фази у вигляді осаду і смол, які, відкладаючись на деталях масляної системи, змінюють її змащувальні характеристики і викликають забруднення фільтрів, знижують ефективності теплообмінних пристроїв [67].

У науковій літературі в основному приводяться результати досліджень щодо зміни фізико-хімічних властивостей автомобільних олив, а інформація щодо авіаційних олив, із-за специфіки їх використання, практично відсутня.

Передчасна заміна оливи не вигідна як з економічної точки зору, так і створює проблеми подальшого її використання та екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є оптимізація терміну роботи оливи. Тому метою цієї роботи є обґрунтування можливості збільшення ресурсу моторних олив шляхом здійснення контролю за їх станом в процесі експлуатації двигуна.

## **Висновки до розділу 1**

1. На основі розгляду наукових праць проаналізовано умови роботи синтетичних та мінеральних олив у двигунах гелікоптерів та повітряних суден, показано вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на зміну показників якості змащувальних матеріалів.

2. Узагальнення наукового доробку сучасних дослідників та проведення їх критичного аналізу дозволило сформулювати основні тренди наукових

досліджень, а також ряд невирішених проблем та напрямків які потребують розробки нових рішень щодо можливостей використання в двигунах даних змащувальних матеріалів.

3. Встановлено, що основними фізико-хімічними та експлуатаційними показниками якості олив, що змінюються в процесі їх експлуатації і впливають на терміни заміни є:

густина; кінематична в'язкість; загальне лужне число; температура спалаху; колір; температура застигання (кристалізації); вміст механічних домішок та води; випаровуваність; трибологічні характеристики, корозійні властивості.

4. На основі проведеного аналізу, було сформульовано основні завдання дисертаційної роботи, а також ряд науково-технічних задач, які необхідно виконати для реалізації мети роботи, сформульовані методики проведення досліджень та алгоритм виконання завдань, що вирішуються в роботі.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА ОЛИВ

#### 2.1. Виробництво та використання олив для гелікоптерів

У гелікоптерах олівами змащуються двигуни, редуктори та шарніри гвинтів. Залежно від типу двигуна використовують нафтову (мінеральну) або синтетичну оливу.

Оливи призначені для зменшення тертя і зносу деталей, відведення від них тепла, запобігання корозії, видалення твердих частинок зносу із зони тертя. Оливи працюють за різних режимів тертя, високих температур, навантажень, швидкостях, у контакті з різними конструкційними матеріалами, в умовах високої аерації, внаслідок чого до них висувуються жорсткі вимоги. Тому вони повинні володіти високою термічною і термоокислювальною стабільністю, хорошою змащувальною здатністю і в'язкісно-температурними властивостями, низькими випаровуванням і температурою застигання, високою теплоємністю, високою температурою спалаху та самозаймання, низькою агресивністю до авіаційних конструкційних матеріалів та малою вспінюваністю [68 - 70].

Оливи поділяються на мінеральні (нафтові) та синтетичні, для поршневих та газотурбінних двигунів. Для виготовлення мінеральних олив використовують дистилятні фракції високоякісних нафт (дистилятні оливи) і продукти, що одержують очищенням залишків, що утворюються під час перегонки мазуту (залишкові оливи). Для забезпечення необхідних властивостей олива піддається очищенню. У нафтохімічній промисловості застосовують переважно два способи очищення – хімічний і фізичний. До хімічних способів відноситься очищення сірчаною кислотою, а до фізичних способів – очищення селективними розчинниками [71].

Як основа синтетичних олив широко застосовуються складні ефіри моноспиртових і двоосновних кислот, ефіри багатоатомних спиртів і синтетичних жирних кислот, синтетичні вуглеводні, силіконові рідини та ін.

Використовуються також змішані основи олив [72].

Але все таки синтетичні оливи, незважаючи на їх значно більшу вартість порівняно з мінеральними оливами, все більш широко використовуються у силових установках літальних апаратів, що пояснюється головним чином прогресуючим зростанням теплонапруженості авіадвигунів і, як наслідок, необхідністю застосування в них олив, що є більш термостабільними, ніж мінеральні. Синтетичні оливи можуть без заміни працювати протягом усього міжремонтного терміну служби двигуна та спростити експлуатацію літального апарату. Для поліпшення властивостей олив в них вводять різні присадки, що покращують їх фізико-хімічні та експлуатаційні властивості: антиокислювальні, загущуючі, протизадирні, протизносні, антикорозійні, антипінні, миючі [73, 74].

Нафтові дистилятні оливи одержують вакуумною перегонкою мазуту. Нафтові залишкові оливи – деасфальтизацією гудрону (залишок після вакуумної перегонки мазуту). Нафтові компаундовані – змішуванням базових дистилятних і залишкових олив. Синтетичні оливи одержують синтезом з хімічної та нафтогазохімічної сировини. Рослинні оливи одержують на базі сировини рослинного походження. Змішані оливи містять компоненти нафтового, синтетичного та рослинного походження. В основу виробництва компонентів олив з вихідних оливних фракцій покладені методи видалення таких небажаних компонентів, як сполуки кислого характеру, ненасичені вуглеводні, сірчисті та смолоподібні сполуки, поліциклічні ацени з короткими боковими ланцюгами, тверді парафіни. З цією метою застосовують лужне, селективне або кислотне очищення, а також процеси депарафінізації та деасфальтизації [75].

Моторні оливи складаються з основного, базового матеріалу – базових олив (75–95 %) і активних домішок – присадок і додатків (5–25 %), що поліпшують їх експлуатаційні властивості. Якість товарної оливи залежить від нафти, способу одержання базової оливи, глибини хімічного перетворення та очищення. Хімічний склад оливної сировини є основним чинником, що визначає вибір найбільш раціональних методів виробництва та використання олив. У виробництві олив використовують дистилятні фракції нафти (межі википання

320–500 °C) і залишок вакуумної перегонки мазуту – гудрон (вище 500 °C [76,77].

Дослідження групового хімічного складу оливних фракцій виконують з використанням фізичних, хімічних і фізико-хімічних методів поділу оливних фракцій та ідентифікації хімічної будови молекул. Поділ оливної сировини на вузькі фракції здійснюється вакуумною перегонкою, холодним фракціонуванням, хроматографією, комплексоутворенням, термічною дифузією та іншими методами. Виявлено, що вуглеводнева частина оливних фракцій містить високомолекулярні алкани нормальної та ізобудови, поліциклічні циклоалкани з алкільними радикалами, моно- і поліциклічні арени з алкільними радикалами та значну кількість вуглеводнів змішаної будови [78].

Невуглеводнева частина оливних фракцій містить сірчисті, азотисті, кисневі, металовмісні та полігетероатомні сполуки. До складу оливних фракцій входять:

- алкани – 5–20 % мас., у тому числі ізобудови – до 0,5– 1,5 % мас., нормальної будови – до 4 % мас.;
- циклоалкани – 50–80 % мас.;
- арени – 15–50 % мас.;
- тверді вуглеводні – 50–70 % мас..

Класична технологія отримання мінеральних олив полягає в поступовому очищенні попередньо виділених з нафти оливних фракцій. За такою технологією виробляється до 85 % всіх мінеральних олив. Порівняно невеликий вибір мінеральних олив, вироблених з нафти без будь-яких добавок, сьогодні називаються базовими оливами. Основні фракції вакуумної перегонки атмосферного залишку (мазуту):

- легка вакуумна олива (температура кипіння 300–350 °C);
- середня вакуумна олива (температура кипіння 350–420 °C);
- важка олива (температура кипіння 420–500 °C) [79].

Сутність сучасного виробництва олив полягає у доборі необхідних присадок та їх ретельному змішуванні з базовою оливою. Причому присадки можуть бути одиничними, що підсилюють певну властивість, або входити в базову оливу

великим пакетом присадок. Таким чином товарна олива набуває необхідних експлуатаційних властивостей [80, 81].

Базові оливи селективного очищення зазвичай називаються базовими оливами групи I та характеризуються як такі, що містять менше 90 % насичених вуглеводнів ( $> 10$  % ароматичних вуглеводнів) і більше 0,03 % сірки. Базові оливи групи II відрізняються від базових олив групи I, оскільки вони містять значно менше домішок (менше 10 % ароматичних вуглеводнів, менше 0,03 % сірки). Вони також мають інший зовнішній вигляд. Оливи групи II, виготовлені з використанням новітньої технології гідроочищення, настільки чисті, що вони на вигляд майже не мають кольору [82, 83, 84, 85].

## **2.2. Технологічні процеси виробництва мінеральної оливи МК-8п**

Мінеральна авіаційна олива МК-8п, що використовується для газотурбінних двигунів дозвукових і надзвукових літаків, виготовляється із нафтопродуктів (мінеральна основа). Основною сировиною для виробництва мінеральних олив є мазути - залишки від прямої перегонки нафти [86].

Базові оливи звичайних технологій отримують з однієї або суміші декількох мінеральних компонентів (дистилятних, залишкових), що пройшли обробку за класичною схемою:

- селективне (кислотне) очищення або екстракція розчинниками;
- очищення адсорбентами;
- депарафінізація розчинниками [87].

Використання звичайних технологій дозволяє отримати базові олії з властивостями, достатніми для виробництва на їх основі моторних олив початкового рівня якості. Залежно від хімічного складу нафти, що використовується як сировина, розрізняють два типи базових олив звичайних технологій: парафінові та нафтові. Вихідною сировиною для отримання базових олив слугують мазути (залишки від прямої перегонки нафти). Основним способом переробки мазуту за оливною схемою є фракційна перегонка. При цьому з

легкокиплячих фракцій мазуту отримують дистилятні базові оливи (БО) [88].

За хімічним складом нафтові оливи являють собою суміш вуглеводнів молекулярної масою 300-750, що містять у складі молекул 20-60 атомів вуглецю. Базові оливи складаються із груп ізо-парафінових, нафтенно-парафінових, нафтенно-ароматичних і ароматичних вуглеводнів різного ступеня циклічності, а також гетероорганічних сполук, що містять кисень, сірку і азот. Гетероорганічні сполуки (особливо кисневі сполуки) є основою смол, що містяться в базовій оливі. Хімічний склад базових олив і структура вуглеводнів, що входять до їх складу визначаються як природою сировини, що переробляється, так і технологією її переробки [89].

Якість товарної оливи залежить від типу вихідної нафти, способу отримання базової оливи, глибини хімічного перетворення і очищення. В описах продукту часто вказуються особливості виробництва і складу для переконання споживача про високу якість вихідного базової оливи [90].

Сировиною для виробництва мінеральних олив є дистиляти вакуумної перегонки мазуту і гудрону. Оливи отримують в результаті послідовного очищення сировини від небажаних сполук: ненасичених, асфальтено-смолистих, сірчистих, парафінових, кислих [91, 92].

Основний об'єм олив виробляють із застосуванням екстракційних процесів розподілення сировини (дистилятів і гудрону):

- селективного очищення розчинником (фенолом, фурфуролом, N-метилпірроліденом),
- деасфальтизацією гудронів пропаном і сольвентною депарафінізацією рафінатселективного очищення в кетонвмісному розчиннику (останній процес являє собою один із різновидів процесу екстракції — екстрактивну кристалізацію) [93].

Загальна схема виробництва базових нафтових олив:

- атмосферна перегонка, при якій відокремлюються легкокиплячі фракції (світлі нафтопродукти) і атмосферний залишок або мазут, який слугує подальшою сировиною для вакуумної перегонки під час виробництва олив;



- вакуумна перегонка атмосферного залишку (мазуту) здійснюється при більш низькій температурі в вакуумі, що дозволяє переганяти в'язкі продукти; фракції олив, які отримують – вакуумні дистиляти з різною в'язкістю і вакуумний залишок, з яких отримують високов'язкі базові оливи;
- очищення фракцій вакуумної перегонки методом екстракції, за допомогою якої розчинниками відокремлюються небажані сполуки;
- депарафінізації фракцій, при якій відокремлюються парафіни;
- інші технологічні процеси покращення якості базових олив: гідрування; каталітичний гідрокрекінг, очищення вибілюючої глиною або кристалічним алюмосилікатом (наприклад, цеолітом) (рис.2.1) [68, 94].

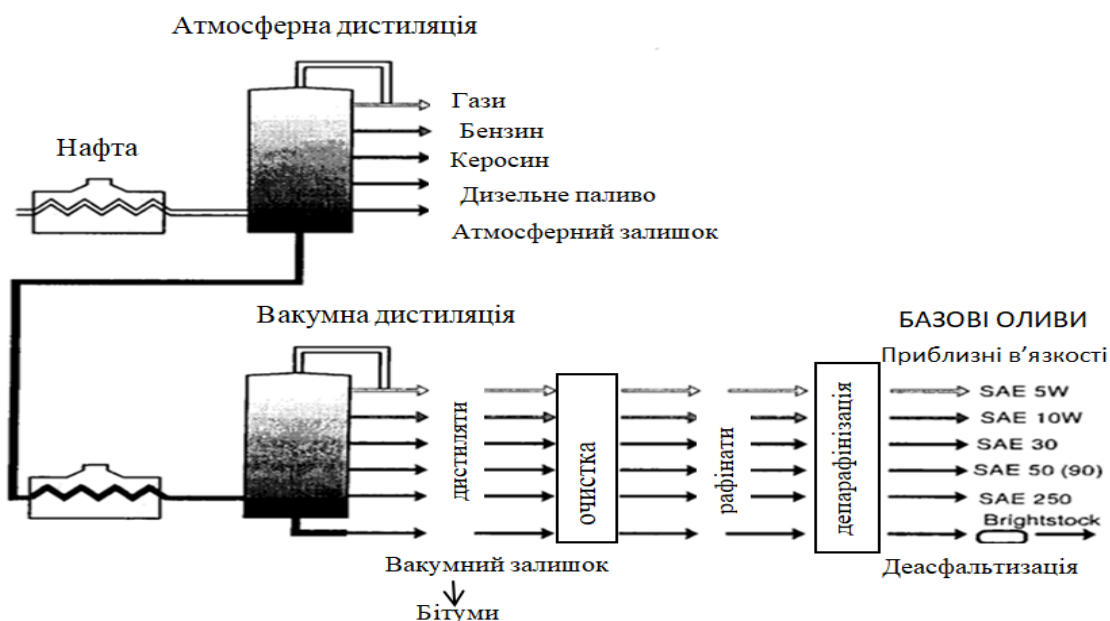


Рис.2.1. Схема виробництва мінеральних базових олив

Залежно від рівня переробки та очищення базові мінеральні оливи поділяються на групи:

I – мінеральні оливи, що отримані методом селективного очищення і депарафінізації розчинниками;

II – покращені мінеральні оливи з низьким вмістом ароматичних сполук і

парафінів, що пройшли гідрообробку;

III – гідрокрекінгові базові оливи з високим індексом в'язкості, отримані методом каталітичного гідрокрекінгу [95].

За допомогою крекінгу отримують найякісніший продукт. Але вартість переробки оливи з використанням цього процесу дорожчий.

Після відгону з мазуту оливних дистилятів у залишку отримують гудрон або при менш глибокому відборі – напівгудрон. Гудрони та напівгудрони використовують для отримання високов'язких, так званих залишкових базових олив. Мазути викіпають у широкому інтервалі температур, причому температура кипіння при атмосферному тиску більшості оливних фракцій лежить вище за температуру їх розкладання (крекінгу). Тому фракційну перегонку мазуту проводять при зниженому тиску у присутності водяної пари. Тут мазут поділяється на окремі фракції, масляні дистиляти з різною в'язкістю [96].

З низу колони відбирають напівгудрон та гудрон. У вакуумних трубчастих установках нагрівається мазут без розкладання до 425°C. Це досягається за рахунок нетривалого перебування мазуту в трубчастих печах та вакууму 250-350 мм рт.ст. З підвищенням температури нагрівання та випаровування мазуту (в умовах, що виключають можливість його розкладання), збільшується глибина відбору з нього масляних дистилятів, особливо за рахунок в'язких вуглеводнів. Отримані шляхом перегонки мазуту оливні дистиляти та залишки складаються із суміші вуглеводнів різних класів та містять сірчисті сполуки. До них належать асфальто-смолисті речовини, нафтенові кислоти, ароматичні вуглеводні та ін. Масляні дистиляти та залишки є напівпродуктами для отримання товарних базових олив [97].

Щоб отримати готові оливи, необхідно звільнити їх від шкідливих домішок. Найпростішим способом очищення оливних дистилятів є вилуговування, тобто обробка розчинами лугів, видалення кислих сполук. Найкращі результати дає кислотно-лужне очищення, яке полягає в обробці оливного напівпродукту концентрованою сірчаною кислотою (96-98 %), а потім лугом. При цьому відбувається відділення асфальто-смолистих речовин, частини нафте-нових кислот

та важких поліароматичних вуглеводнів, схильних до сульфування, які при високій температурі вступають у реакцію із сірчаною кислотою та видаляються з оливи [98]

Потім ці напівпродукти обробляються натрієвим лугом, що нейтралізує органічні кислоти та залишки сірчаної кислоти. Для видалення залишку лугу та солей часто використовують сушіння оливи гарячим повітрям. Кислотно-лужним способом багато років проводилося очищення дистилятних олив [99].

В оливних дистилятах містяться парафінові вуглеводні нормальної будови та ізобудови ( $C_n H_{2n+2}$ ), нафтові вуглеводні, що містять п'яти- і шестичленні цикли з парафіновими бічними ланцюгами різної довжини, ароматичні вуглеводні (полі- і моно-циклічні), а також нафтеноланцюгами), смолистоасфальтенові речовини, сірко-, азот-і кисневмісні органічні сполуки. У порівнянні з іншими вуглеводнями парафінові вуглеводні мають найменшу в'язкість, найбільш пологоу в'язкісно-температурну характеристику і найбільший індекс в'язкості [100].

Нафтові та ізопарафінові вуглеводні є основою нафтових олій та їх вміст, залежно від характеру нафти та температурних меж википання нафтових олійних фракцій, становить від 50 % до 75 % маси оливи. Від структурних особливостей нафтових вуглеводнів залежать їх фізико-хімічні властивості та ряд експлуатаційних властивостей: так, чим більше кілець у молекулі, тим вища їхня температура кипіння; що більше атомів вуглецю в бічних ланцюгах, то вище в'язкість і індекс в'язкості. При одному й тому числі атомів вуглецю у бічному ланцюгу, зі збільшенням ступеня розгалуженості ланцюга, температура застигання оливи знижується. Від вмісту СН-груп у бічних ланцюгах та їх становища залежить стабільність нафтових вуглеводнів проти окиснення молекулярним киснем [101,102].

Ароматичні та нафтоароматичні вуглеводні присутні у легких оливних фракціях (350-400 °С) у вигляді гомологів бензолу і нафталіну, у більш важких фракціях (400-450 °С) містяться моно-, бі- і навіть трициклічні ароматичні сполуки.

Сіркоорганічні сполуки. У висококиплячих фракціях нафти, що йдуть на

виробництво олив, накопичується 60-70 % сіркоорганічних сполук від вихідної нафти. Сіркоорганічні сполуки важких фракцій нафти належать в основному до сульфідів, у тому числі до похідних тіофенів, сконденсованих з ароматичним або нафтовим циклами [103].

У таблиці 2.1 наведені фізико-хімічні властивості мінеральної оливи МК-8п.

Таблиця 2.1

### Фізико-хімічні властивості мінеральної оливи МК-8п

Показники	Метод визначення	МК-8п
В'язкість кінематична за температури 100 °С ( 50 °С для МК-8п), сСт, не менше	ASTM D445	2.6 (8.0)
В'язкість кінематична за температури 40 °С, сСт, не більше	ASTM D445	16.0
В'язкість кінематична за температури - 40 °С, сСт, не більше	ASTM D445	6500
Лужне число, мг КОН/г, не менше	ASTM D2896	0.04
Температура спалаху, °С	ASTM D92	140
Температура застигання, °С	ASTM D5950	-55
Густина, кг/м <sup>3</sup>	ASTM D1429	885

У процесі виробництва значна частина сіркоорганічних сполук витягується, проте деяка кількість їх присутня в оливах, виготовлених із малосірчистих нафт (0,16 %). В оливах із сірчистих нафт цих сполук міститься в 10-15 разів більше і становить 0,5-1,5 %, що з урахуванням молекулярної маси олив відповідає 10-15% сіркоорганічним сполукам. Таким чином, в оліях, одержуваних із сірчистих нафт, похідні сірки, поряд з парафінонафтовими та нафтоароматичними сполуками, є основними компонентами. Залежно від складу сірковмісні сполуки більше або менше впливають на протизносні, протизадирні властивості та на стабільність при окисленні, у зв'язку з чим присутність цих сполук є позитивною. Основна

кількість сірковмісних сполук міститься в присадках, які входять в пакети, що промислово виробляються, широко використовуються при виробництві товарних олив [103].

Оливи в залежності від вихідної сировини, умов виробництва та способу очищення можуть мати різні властивості. Сукупність різних властивостей оливи визначає її якість та можливість застосування для тих чи інших цілей. Величини основних фізико-хімічних параметрів олив регламентуються стандартами (сертифікатами якості), які дають уявлення про можливість поведінки оливи в процесі експлуатації та слугують для контрольних перевірок якості оливи шляхом зіставлення дослідних даних із технічними умовами [104, 105].

### **2.3. Технологічні процеси виробництва синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254**

Синтетична олива Mobil Jet Oil 254 виготовлена на основі складних ефірів (естерів жирних кислот) – функціональних похідних карбонових або мінеральних кислот, в яких гідроксильна група заміщена залишком спирту або фенолу (OR), тобто взаємодія високомолекулярних жирних кислот із спиртами.

Синтетичні оливи являють собою індивідуальні сполуки або суміші декількох сполук близької хімічної структури, полімери або олігомери, отримані методом синтезу з різних мономерів. Синтетичні оливи мають високий індекс в'язкості (150-170), температуру застигання нижче (до -65 °C), ніж у мінеральних. Відповідно, пуск двигунів при від'ємних температурах при застосуванні синтетичних олив легше, ніж при мінеральних і можливий при більш низьких температурах повітря. При пуску двигуна синтетичні оливи швидше покривають металічні поверхні двигуна і проникають у всі важкодоступні місця [106].

Властивості синтетичних олив залежать від хімічної будови, яка є основним критерієм їхньої класифікації [107]:

- вуглеводневі оливи на основі поліальфаолефінів, ізопарафінів та алкілбензолу;

- поліефірні оливи на основі: ефірів двоосновних кислот і первинних спиртів (напр., ізооктиловий ефір себацинової кислоти);
- ефірів поліолів;
- поліфенілових ефірів;
- полігліколевих ефірів (наприклад, поліалкіленгліколевий ефір);
- ефірів фосфорної кислоти;
- фторвуглеводневі оливи;
- силіконові оливи.

Окремі властивості виключають можливість застосування деяких синтетичних рідин як основні компоненти авіаційних олив [108].

- поліефірні оливи на основі ефірів фосфорної кислоти мають недостатні індекси в'язкості (в межах від 0 до -30);
- фторвуглеводневі оливи мають низьку температуру кипіння та погані в'язкісно-температурні характеристики;
- силіконові оливи не змішуються з мінеральними і мають недостатні змащувальні та протизносні властивості [109].

В'язкість синтетичних олив при температурах 250-300 °С, вище ніж у рівнов'язких їм при 100 °С мінеральних, вони мають кращу термічну стабільність, низьку випаровуваність та малу схильність до високотемпературних відкладень. Тому синтетичні оливи можуть застосовуватися у високофорсованих теплонапружених двигунах [110].

Основний недолік синтетичних олив – вони значно дорожче мінеральних (в 2-3 і більше разів). Гумові та інші прокладки, втулки тощо вітчизняних автомобілів не завжди витримують синтетичні оливи (тобто течуть), так як останні володіють високою хімічною активністю базових компонентів. Є ще один недолік – вірогідність несумісності при змішанні з мінеральними оливами. Але високі експлуатаційні властивості, збільшений строк придатності у двигунах до заміни, низька витрата на чад і внаслідок цього менша загальна витрата оливи, роблять доцільним застосування синтетичних олив [70].

Синтетичні оливи перевершують мінеральні за антиокислювальними

властивостями, мають рівні або кращі протизносні і протизадирні властивості. У зв'язку з цим термін їх придатності у кілька разів перевищує термін придатності мінеральних олив і становить від 20 до 80 тис. км [107].

В якості вихідних компонентів виробництва синтетичних олив використовують зазвичай наступні компоненти:

- синтетичні вуглеводні (полі-альфа-олефіни, наприклад Mobil 1),
- органічні ефіри (які отримують шляхом взаємодії спирту з кислотою, наприклад Castrol Syntec),
- полігліколі, наприклад поліалкалінгліколева олива PAG [70].

*Поліальфаолефінові оливи* (ПАОО) – синтетичні базові рідини, які отримують каталітичною олігомеризацією вищих альфаолефінових вуглеводнів, головним чином фракції  $C_{10}$ , з подальшим гідруванням оливогенних продуктів синтезу. За хімічним складом ПАОО являють собою переважно аліфатичні вуглеводні з довголанцюговою розгалуженістю. Поліальфаолефінові оливи повністю сумісні з нафтовими оливами, добре приймають більшість присадок, які застосовують в нафтових оливах, гідролітично і хімічно стабільні, екологічно стабільні. Їх застосовують як основи чи базові компоненти моторних авіаційних, трансмісійних, холодильних вакуумних, білих олив, пластичних мастил [111].

В основу технології ПАОО покладені каталітичні реакції олігомеризації альфаолефінів і гідрування поліальфаолефінів (ПАО). Переважаючим процесом у виробництві ПАОО є каталітична олігомеризація альфаолефінів, яка забезпечує отримання олігомерів з заданим молекулярно- масовим розподіленням (ММР) і максимально однорідним хімічним складом продуктів реакції. Змінюючи умови процесу, можна управляти ММР продуктів олігомеризації [112].

Відомі способи отримання поліолефінових основ синтетичних олив шляхом катіонної олігомеризації вищих олефінів, що містять стадію підготовки олефінової сировини і розчинів компонентів каталітичної системи, стадію олігомеризації олефінової сировини, стадію виділення з олігомеризата відпрацьованого каталізатора методом водно-лужної і подальшої водної промивки, стадію поділу очищеного олігомеризата на фракції і стадію гідрування

виділених цільових фракцій [70].

На рис. 2.2. наведена блок-схема установки для одержання синтетичних базових олив.

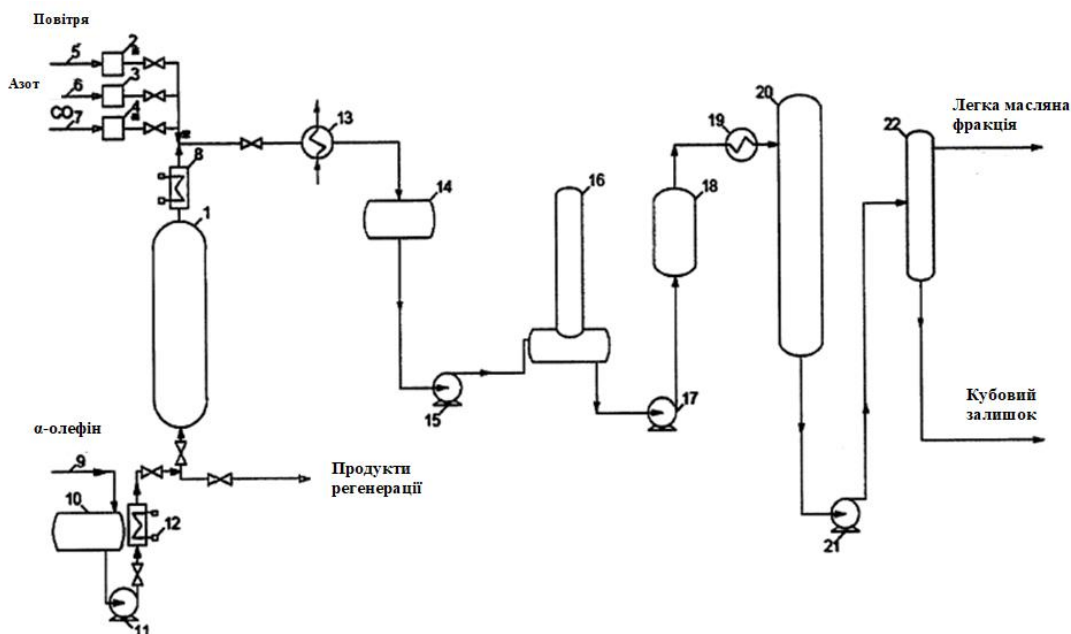


Рис.2.2. Блок-схема установки для одержання синтетичних базових олив

Технологічна лінія процесу одержання синтетичних базових олив включає реактор олігомеризації 1 з підключеними до нього паралельно через адсорбційні системи очищення 2, 3 і 4 повітря 5, азоту 6, монооксиду вуглецю 7 і електричний обігрівач 8. Джерело альфа-олефіна 9 подають в реактор 1 через проміжну ємність 10, насос 11 і електричний обігрівач 12. Олігомеризат з верху реактора 1 через холодильник 13, ємність 14 і насос 15 надходить в колону відділення непрореагованого мономера і легкої побічної димерної фракції 16. Масляна фракція з куба колони насосом 17 подається в реактор гідрування 18 і через холодильник 19, сепаратор 20 насосом 21 в колону ректифікації 22. Кубовий залишок колони ректифікації є синтетична базова олива [113].

Олігомеризацію  $\alpha$ -олефінів  $C_6$ - $C_{10}$  з отриманням синтетичних базових олив проводять наступним чином: альфа-олефін 9 (гексен-1, октен-1, децен-1) подають в проміжну ємність 10, з якої насосом 11 через електричний обігрівач мономера



12 він надходить в реактор 1. Тиск в реакторі складає 0,1-1,5 МПа [111].

До недоліків поліальфаолефінових олив слід віднести:

- гіршу, порівняно з мінеральними оливами, здатність, що розчиняє, по відношенню до деяких типів присадок;
- гіршу сумісність з еластомерами (викликають усадку гумових ущільнень із втратою їхньої еластичності).

Обидва ці недоліки усувають шляхом додавання невеликих кількостей складних ефірів.

На рис. 2.3 наведена блок-схема установки для одержання синтетичних базових олив.

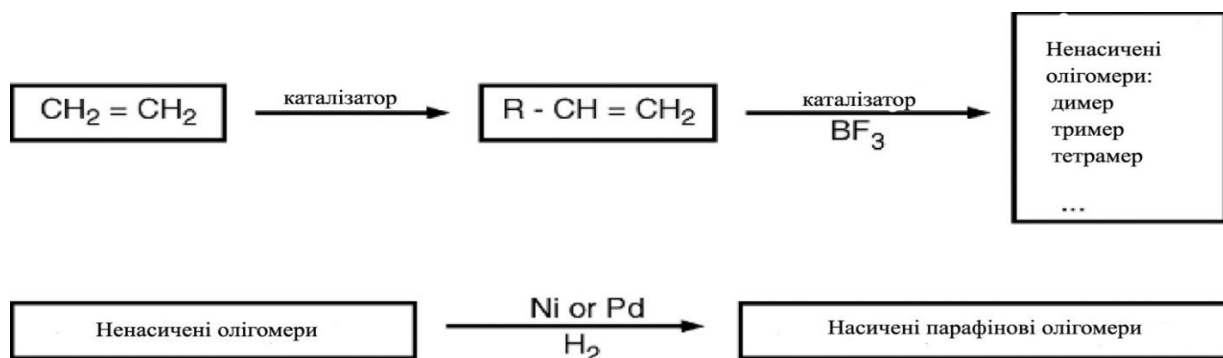


Рис. 2.3. Схема виробництва поліальфаолефінів

Наступний етап виробничого процесу включає каталітичне гідрування ненасичених олефінів. Це досягається за допомогою класичних каталізаторів, наприклад нікелю на кізельгурі або паладію на оксиді алюмінію. На третьому й останньому етапі насичені олігомери переганяють. Олігомеризація сумішей  $\alpha$ -децену або  $\alpha$ -олефінів завжди призводить до складних сумішей ізомерів з більшою розгалуженістю, ніж очікувалося.

Оскільки перегрупування є внутрішньомолекулярними, молекулярні маси продуктів можна підтримувати у вузькому діапазоні. Наприклад, типовий насичений тример  $\alpha$ -децену виглядає як трикутна зірка [113].

*Естери карбонових кислот* – углеводневі оливи не могли задовольнити

потреби авіаційних олив, а алкілові естери аліфатичних карбонових кислот мали сприятливі властивості. Карбоксильні групи завдяки своїм сильним дипольним моментам знижують летючість і підвищують температуру спалаху мастил, і в той же час позитивно впливають на термічну стабільність (зв'язки групи COO термічно більш стійкі, ніж зв'язок C-C), розчинність, змащувальна здатність і здатність до біологічного розкладання; з іншого боку, однак, вони негативно впливають на гідролітичну стабільність мастила та реакційну здатність з металами або сплавами, що містять мідь або свинець [114-116].

В принципі, усі складні естери карбонових кислот можна отримати таким же способом:

- карбонова кислота реагує з надлишком спирту в присутності каталізатора (мінеральні кислоти, ідеально адсорбовані на твердому тілі, іоніти, кислоти Льюїса, напр. трифторид бору, ідеально як етерат, і амфотерні гідроксиди, такі як гідроксид алюмінію, можна використовувати як каталізатори).

- для зміщення рівноваги в сторону продукту реакційну воду видаляють під час процесу.

- кислоту, що не прореагувала, нейтралізують карбонатом натрію або гідроксидом кальцію, потім видаляють фільтруванням, а складний естер переганяють [117,118].

Естерові оливи отримують нейтралізацією карбонових кислот спиртами, вони проявляють себе під час експлуатації набагато ефективніше, ніж ПАО і гідрокрекінгово складу. Основа мастильних матеріалів – складні ефіри рослинного походження. Це унікальна група олив, які виробляють методом етерифікації спиртів і карбонових кислот. Виходять полярні молекули з надлишковом електронної густини навколо атомів кисню. Негативно заряджені кінці частинок притягуються до металевих поверхонь деталей двигуна і створюють стабільну плівку. Естерові оливи у високому ступені екологічні, мають гарні низькотемпературні, диспергуючі властивості, але мають високу ціну. Не викликає проблем утилізація, тому що вони екологічно чисті. Але, незважаючи на незаперечні переваги, займають лише 5% ринку через високу

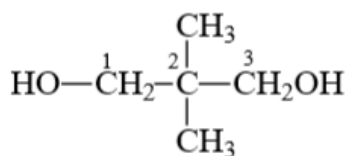
вартість [119-121].

*Складні естери дикарбонових кислот* –естери адипінової, азелаїнової і себацінової кислот. Естери цих кислот володіють досить пологою кривою залежності в'язкості від температури в інтервалі  $+100 - -60$  °C, відповідно низькою температурою застигання, досить малою випаровуваністю, високими термічною і термоокиснювальною стабільністю, не викликають корозію різних металів і по цим показникам значно перевершують мінеральні оливи. Тому складні ефіри знайшли широке застосування в якості основ і компонентів авіаційних синтетичних олив і гідравлічних рідин. Складні естери дикарбонових кислот застосовують також в якості гідро тормозних рідин, білих олив для текстильної промисловості, компонентів для різних консистентних мастил та приборних олив. Які працюють у широкому діапазоні температур – від  $+100 - +200$  до  $-20 - -60$  °C [122].

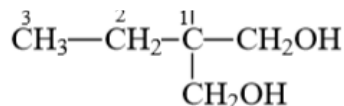
Найхарактернішим представником цього класу сполук є ди-2-етилгексиловий естер себацінової кислоти (ДОС) [123,124].

*Складні естери неопентілових спиртів* – цей клас сполук має високу термічну і термоокиснювальну стабільність, хороші в'язкісні властивості при низьких температурах, високий індекс в'язкості, дуже низьку летючість і хороші змащувальні властивості. До цього класу сполук відносять складні ефіри одноосновних кислот і неопентілових поліспиртів: неопентілгліколя, тріметілолетана, триметилпропан і пентаеритрит (рис.2.4).

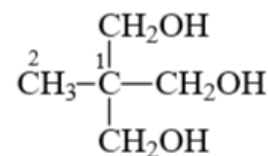
Висока термічна стабільність цих естерів обумовлена своєрідною структурою вуглеводневого скелета. Найбільш характерним представником цього класу сполук є естер пентаеритриту і суміші одноатомних жирних кислот  $C_5-C_9$ , які одержують реакцією естерифікації в присутності каталізатора [125].



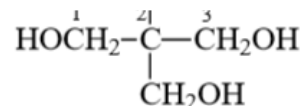
2,2-диметил-1,3-пропандіол  
(неопентилгліколь)



1,1,1-триметилолпропан  
(етриол)



1,1,1-триметилолетан (метриол,  
метилтриметилолетан)



2,2-диметило-1,3-пропандіол  
(пентаеритрит)

Рис.2.4. Естери одноосновних кислот

*Інші поліестери* – алкіловані арилові прості естери, такі як алкілові прості естери, мають нижчу в'язкість, нижчі температури застигання та кипіння, ніж відповідні алкани [126,127].

Показники якості оливи Mobil Jet Oil 254 наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

**Показники якості оливи Mobil Jet Oil 254**

Показники	Метод визначення	Jet Oil 254
В'язкість кінематична за температури 100 °C ( 50 °C для МК-8п), сСт, не менше	ASTM D445	5.3
В'язкість кінематична за температури 40 °C, сСт, не більше	ASTM D445	26.4
В'язкість кінематична за температури - 40 °C, сСт, не більше	ASTM D445	11500
Лужне число, мг КОН/г, не менше	ASTM D2896	0.08
Температура спалаху, °C	ASTM D92	254
Температура застигання, °C	ASTM D5950	-62
Густина, кг/м <sup>3</sup>	ASTM D1429	1004,4

*Естери фосфорної кислоти* – синтетичні продукти, отримані естерифікацією хлорокисі фосфору аліфатичними спиртами або фенолами. Серед них найбільше застосування знаходять трибутилфосфат (ТБФ), трикрезилфосфат (ТКФ), дибутилфенілфосфат (ДБФФ), дифеніл-п-трет-бутилфенілфосфат (ДФІБФФ), триксиленілфосфат (турбінне масло ОМТІ) та інші арілфосфати і алкіл-арілфосфати. Відмінною особливістю фосфатів є їх висока вогнестійкість. Температура займання багатьох фосфатів вище 600 °С, вони повільно горять у полум'ї, не підтримуючи горіння і не поширюючи полум'я. Фосфати мають достатню термічну і окиснювальну стабільність, високу мастильну здатність, хороші в'язкісно-температурні властивості [128,129].

#### **2.4. Присадки для покращення експлуатаційних властивостей олив**

Необхідний рівень експлуатаційних властивостей сучасними моторними оливами надається використанням для їх виготовлення високоякісних базових олив та ефективних присадок різної функціональної дії, які вводяться у склад оливи на стадії її виробництва. Велике значення мають раціональне поєднання присадок і правильне їх дозування [130].

Деякі присадки впливають на фізичні властивості базових олив, інші виявляють хімічний ефект. На ринок найчастіше виставляються композиції присадок – пакети. Ці пакети суворо визначеного складу, призначенні для оливи конкретного значення і класу якості [131].

За своєю експлуатаційною дією присадки умовно ділять на наступні типи:

- антиокиснювальні – покращують антиокиснювальну стійкість олив, зменшують витрату і збільшують ресурс роботи оливи;
- антикорозійні – захищають металічні поверхні від корозійної дії кисне- і сірковмісних продуктів і вологи;
- миюче-диспергуючі (детергенти) – сприяють зниженню відкладень продуктів окислення на металічних поверхнях;

- присадки, які покращують змащувальні властивості олив – протизносні, протизадирні та антифрикційні;
- в'язкосні (загущуючі) – покращують в'язкісно-температурні властивості олив;
- депресорні – знижують температуру застигання олив;
- антипінні – попереджають вспінювання олив [132].

Присадки надають оливі нових властивостей, покращують уже існуючі, уповільнюють або зупиняють небажанні процеси, які відбуваються під час експлуатації оливи [133].

Деякі присадки одночасно покращують декілька властивостей олив – їх називають багатофункціональними. Пакети присадок сприяють найбільшому задоволенню потреб в присадках заводів-виробників олив і зниженню затрат, зменшенню втрат і покращенню техно-економічних показників як і виробників так і споживачів присадок [130].

Пакети присадок постачаються у вигляді концентрованого розчину присадок в оливі (до 50% активних речовин). Така композиція вводиться в базову оливу після перемішання отримують товарну оливу, яка готова до застосування. На практиці таке виробництво виконується на заводах змішання. Готова олива надходить на розфасовку. Схема компаундування олив показана на рис 2.5 [132].

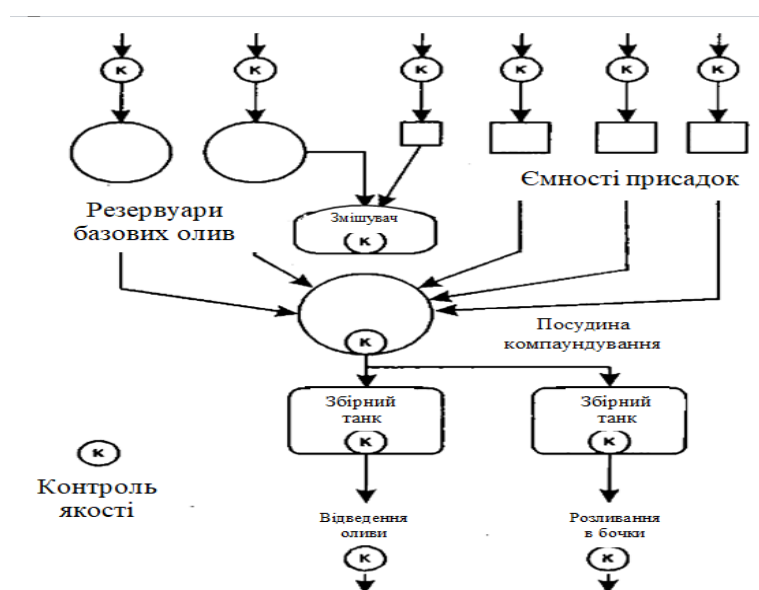


Рис.2.5. Схема виробництва товарних олив

Присадки повинні:

- добре розчинятися в оливі;
- мати малу летючість і не випаровуватися з оливи при зберіганні та експлуатації у широкому діапазонні температур;
- не вимиватися водою і не піддаватися гідролізу;
- не взаємодіяти з контактуючими поверхнями матеріалів;
- зберігати свої функції у присутності інших добавок і не чинити на них депресивної дії.

*Антиокиснювальні присадки.* При роботі двигунів і механізмів оливи знаходяться в контакті з повітрям, часто при підвищених температурах. В таких умовах і при каталітичному впливі металів оливи окислюються. Утворюються продукти кислотного характеру, які викликають корозію металевих деталей, і вуглецеві відкладення, які порушують нормальну роботу механізмів. Процес окислення, оливи запобігають введенням в їх склад антиокиснювальних присадок. Ці інгібітори діють в двох напрямках – одні руйнують вільні радикали (розривають ланцюг), а інші взаємодіють з пероксидами, що утворюються в процесі окислення [134].

Антиокиснювальні присадки, так звані інгібітори окислення, пригнічують окиснення оливи в початковій її стадії шляхом взаємодії з первинними продуктами реакції окиснення – перекису, з утворенням неактивних сполук, які не здатні до продовження ланцюгової реакції окислення. Багато антиокиснювальних присадок, що знижують утворення кислот, зменшують корозію, тобто антиокиснювальні присадки є одночасно і антикорозійними присадками [131].

Як антиокиснювачі – деактиватори пероксидів застосовуються феноли і аміни, наприклад іонол, а в якості деактиваторів металів – органічні сполуки сірки, фосфору тощо. Найпоширенішим антиокиснювачем в даний час є діалкілдітіофосфату цинку. Він використовується і як протизадирна присадка. У нових високоякісних моторних оливах діалкілдітіофосфату цинку міститься до 1,4 % [135].

Механізм дії антиокиснювачів заснований на перетворенні вільних радикалів, які утворюються в стабільні сполуки і розкладанні гідропероксидів.

Окисленню оливи сприяє контакт з металевими поверхнями і частинками зносу, які діють як каталізатори. В процесі роботи двигуна присадки витрачаються, при цьому деякі лужні детергенти гальмують спрацьовування антиокиснювачів. Оптимально поєднувані присадки продовжують термін служби оливи [132].

Антиоксидантні добавки. Антиокиснювальна стійкість – найважливіша робоча характеристика моторного масла, яка визначає тривалість його експлуатації. Під час експлуатації нафтопродуктів під дією кисню повітря, високої температури, навантаження та металевого каталізу вуглеводні в нафтопродуктах піддаються окисненню, руйнуванню, полімеризації та багатьом іншим хімічним перетворенням [133].

При цьому змінюється склад нафти внаслідок утворення та накопичення оксигенатів і ущільнених вуглецевих продуктів, погіршуються транспортні характеристики нафтопродукту [133].

Продукти окислення важко розчиняються в маслі і сприяють утворенню відкладень і нагару, викликаючи корозію і посилюючи знос деталей. Антиоксидантні добавки широко використовуються для запобігання або зменшення окиснення олив під час зберігання та транспортування [130].

За температурним діапазоном нафтопродуктів антиоксиданти поділяються на низькотемпературні і високотемпературні антиоксиданти. У моторні оливи вводять високотемпературні окиснювачі (ДФ-11, ВНП НП-354 та ін.), а в індустріальні та трансформаторні - низькотемпературні окиснювачі (іонол, дифеніламін та ін.) [133].

Антиоксидантні добавки захищають вуглеводні від окиснення, взаємодіючи з утвореними вільними радикалами ( $R\cdot$  і  $ROO\cdot$ ) або переводячи гідропероксиди ( $ROOH$ ) в стабільний стан, перериваючи і запобігаючи розвитку ланцюгових реакцій [133].

Крім інгібіторів окиснення, існують і інші присадки, здатні підвищити антиоксидантну стійкість олив – це дезактиватори і пасиватори металів. Дезактиватор запобігає або зменшує каталітичну дію розчинної в оливі солі металу внаслідок комплексоутворення. Пасивуючий агент утворює хімічну



адсорбційну плівку на поверхні металу для захисту масла від каталітичної дії металу. Багато антиоксидантів одночасно функціонують як антикорозійні добавки, запобігаючи утворенню низькомолекулярних корозійних та корозійних продуктів окислення [135].

*Мийно-диспергуючі присадки.* Для зменшення утворення вуглецевих відкладень і осадів в двигунах і механізмах широке застосування знайшли миючі (детергентні) і диспергуючі присадки [136].

*Миючі.* Детергенти є поверхнево-активними речовинами, які володіють миючими властивостями, що захищають поверхню деталей від прилипання і скупчення на них продуктів окислення. Аніонними детергентами зазвичай бувають оливорозчинні алкілбензолсульфонати, фосфонати та інші аналогічні сполуки. Деякі сульфонати мають лужні властивості і є ефективними нейтралізаторами кислих продуктів окислення. За лужністю, яка характеризує ефективність присадок, сульфонати діляться на нейтральні (10 -30 мг КОН/г), лужні (30 - 100 мг КОН/г), і дуже лужні (100-300 мг КОН/г). До складу дуже лужних присадок можуть входити дисперговані оксиди, гідрооксиди і карбонати металів [135,136].

Сполуки, які володіють детергентною дією, містять у своїй молекулі полярні групи, які перешкоджають осіданню смолистих і вуглецевих речовин на металевих поверхнях і попереджають таким чином утворенню лаків і відкладень. Крім того, детергенти можуть вступати в хімічну взаємодію з проміжними продуктами окислення кислого характеру, виявляючи при цьому нейтралізуючу дію [135,136,137].

*Диспергуючі присадки.* Дисперсанти пригнічують агломерацію і злипання продуктів окислення, утворення шламу або осадження смолистих відкладень на поверхні деталей. Як дисперсанти зазвичай застосовуються полімери з полярними групами і сукцініміди. Дисперсанти підтримують колоїдні частинки продуктів окислення і забруднень в підвішеному стані. В основному вони забезпечують чистоту непрогрітого двигуна. При ефективній роботі дисперсантів моторна олива темніє, а дисперговані дрібні продукти окиснення не забивають фільтр і не

осідають на гарячих деталях двигуна [138].

Присадки цього типу відрізняються від металовмісних здатністю диспергувати і підтримувати в підвішеному стані тверді частинки. При їх застосуванні в оливах зменшується нагароутворення і утворення низькотемпературних відкладень (тому їх називають беззольні диспергуючі присадки). Особливістю будови присадок є наявність в їх молекулах олеофільної частини – довгого вуглеводневого радикала, що забезпечує розчинність присадки в оливі, і полярної частини – залишку поліалкіленполіаміну або складно-естерного угруповання [136,137].

*Присадки, які покращують змащувальні властивості олив.* Дія цих присадок обумовлена утворенням на третюх металевих поверхнях різних за хімічним складом захисних плівок.

*Протизносні та антифрикційні присадки.* За принципом дії протизносні присадки ділять на три групи:

- протизносні присадки, що збільшують клейкість і змащуваність (в цю групу входять і модифікатори тертя);
- прозадирні присадки;
- тверді протизносні і протизадирні присадки [138,139].

Протизносні присадки за нормальних умов змащенні, через взаємодію полярних груп молекул оливи з поверхнею металів, на поверхнях тертя утворюється адсорбована плівка оливи. При граничному змащенні, сила тертя і знос в значній мірі залежать від стійкості цієї плівки і сили взаємодії молекул оливи з поверхнею металу, тобто від змащуючої здатності і липкості оливи [140].

Протизносні присадки запобігають інтенсивному зносу поверхонь тертя при помірних навантаженнях, протизадирні – запобігають заїданню при надвисоких навантаженнях, підвищуючи критичне навантаження заїдання, а антифрикційні знижують або стабілізують коефіцієнт тертя [140].

Протизносні присадки – жирні спирти, аміді, складні ефіри, сполуки фосфору тощо, що утворюють хімічний зв'язок з поверхнею металу. За допомогою таких присадок покращується липкість навіть при низькій в'язкості

оливи. Чим більша стійкість утвореної плівки і чим сильніше вона пов'язана з поверхнею металу, тим менше може бути в'язкість оливи для досягнення такого ж змащуючого ефекту і зменшення зносу деталей, а з застосуванням менш в'язкої оливи знижуються втрати енергії на прокачуваність [141].

*Антифрикційні присадки.* Модифікатори тертя, або антифрикційні присадки, вводять до складу енергозберігаючих моторних олив, що забезпечують економію палива шляхом зниження тертя і підвищення ККД двигунів. Зазвичай використовують тверді тонко дисперговані дисульфід молибдену, колоїдальний графіт, політетрафторетилен, ацетати і борати металів, а також розчинні в оліві ефірі жирних кислот і органічні сполуки молибдену [142].

*В'язкісні присадки.* В'язкісні присадки застосовуються для поліпшення в'язкісно-температурних характеристик. В іноземній літературі вони називаються поліпшувачами індекс в'язкості або модифікаторами індексу в'язкості.

До в'язкісних присадок належать і депресанти температури застигання. Їх дія заснована на придушенні гелеутворення при низькій температурі, яке виникає в результаті кристалізації парафіну. При їх додаванні до малов'язкої основи отримують оливи, що володіють пологою в'язкісно-температурною кривою, з хорошою прокачуваністю при низьких температурах [143].

В'язкісні (загущуючі) присадки – високомолекулярні полімери, які мають змінну розчинність в оліві при різній температурі, завдяки чому вони підвищують в'язкість оливи і зменшують зміну в'язкості при зміні температури. В'язкісні присадки менше загущають базову оливу при низькій температурі, ніж при високій. . В якості в'язкісних присадок використовують різні полімерні і сополімерні продукти: поліізобутен, поліметакрилати, полівінілалкілові естери, сополімери олефінів, стиролдієнові сополімери [144].

З використанням в'язкісних присадок отримують всесезонні, північні і арктичні оливи. Присадки цього типу, поряд з присадками, що поліпшують змащувальні властивості олив, дозволяють створювати оливи, які забезпечують меншу витрату палива в двигунах [145].

*В'язкісні добавки.* Найсучасніші оливи повинні забезпечувати

працездатність механізму в широкому діапазоні температур (від - 50-70 до + 300-360 °C). Значне збільшення в'язкості оливи при охолодженні і її зниження при високих температурах може порушити нормальне функціонування машин і механізмів [146].

*Антикорозійні присадки.* Антикорозійні присадки додають для захисту від корозійного ураження і руйнування деталей, виготовлених зі сплавів кольорових металів – вкладишів підшипників колінчастого вала, що мають антифрикційний шар з свинцюватої бронзи тощо. Використовують дитіофосфати і дитіокарбонати металів, алкілфенольні присадки, що містять зв'язану сульфідну сірку, похідні бензотриазолу, сірко- і фосфоровмісні сполуки [147,148].

Механізм дії полягає в утворенні міцних плівок сульфідів і фосфідів, що не руйнуються в процесі тертя і під дією детергентів і не розчиняються в слабких органічних кислотах – продуктах окислення оливи. Антикорозійні присадки можуть проявляти корозійну агресивність по відношенню до сплавів на основі срібла або бронзи з високим вмістом фосфору [149,150].

*Інгібітор корозії та антикорозійна добавка.* Металеві вироби піддаються корозії та руйнуванню під час зберігання та експлуатації під впливом зовнішнього середовища (кисню, вологи, хімічно активних продуктів). Нафтові оливи за відсутності присадок не можуть задати тривалий і надійний захист від ураження корозією цих виробів [151].

Для підвищення антикорозійного захисту металів в масло вводять маслорозчинні органічні речовини, що запобігають корозії металів в атмосферних умовах (електрохімічна корозія) - інгібітори корозії, а також під дією продуктів, що містяться в маслі. - антикорозійні добавки. У зв'язку з різними причинами корозійного ураження металів необхідно використовувати в маслах присадки з різним складом і механізмом дії [152].

Нафтові солі і синтетичні сульфонати (БСК, КСК), продукти взаємодії сульфоокислоти і сечовини (БМП), продукти окислення вазеліну і церезину, нітрифікація, окислювальна нітрифікація, нітрит натрію (НОП), нітрифікована нафтова кальцієві солі (АКОР-1) ) тощо використовуються як інгібітори корозії.

Комбіновані інгібітори корозії на основі алкілфенолів і присадок сульфонатного типу також застосовуються для додавання СЖК (інгібіторів корозії КП) - в якості антикорозійних присадок використовуються переважно сірко- і фосфорорганічні сполуки - сульфіди, дисульфіди, фосфати [153,154].

*Протипінні присадки.* Протипінні присадки зменшують схильність оливи до піноутворення. Додавання до оливи дисперсантів, детергентів та інших поверхнево-активних речовин знижує поверхневий натяг; висока кратність циркуляції оливи в двигунах і перепади тиску при його закінченні також сприяють піноутворенню. Зазвичай використовують тонко диспергуючу в об'ємі оливи силіконову рідину ПМС-200А (0,002-0,005 %). Присутність в тонких плівках оливи, що утворює бульбашки, крапельок сторонньої нерозчинної речовини сприяє розриву бульбашок і зменшенню піноутворення [155,156].

*Депресорні присадки.* Депресорні присадки знижують температуру застигання оливи. Видалення з оливи високоплавких парафінів погіршує його в'язкісно-температурні властивості, тому видаляють парафіни з температурою застигання вище мінус 10-15 °С, а необхідна температура застигання (мінус 25-30 °С і нижче) досягається введенням депресорів. Як присадки застосовують продукти полімеризації ефірів метакрилової кислоти і алкілування фенолу, нафталіну хлорованим парафіном.

Механізм дії пов'язаний зі зміною форми і розмірів кристалів парафінів, що утворюються при охолодженні оливи. В результаті зменшення площі взаємодії твердої та рідкої фаз охолоджена олива залишається текучою до більш низької температури [157,158].

## **2.5. Взаємозамінність олив**

Розвиток економічних зв'язків із зарубіжними країнами, зокрема, істотне зростання мережі міжнародних авіаліній ставить перед хімотологами нові проблеми із забезпечення високої експлуатаційної надійності вітчизняної авіаційної техніки, пов'язані з необхідністю використання на ній ПММ, що виробляються різними зарубіжними фірмами. Для ухвалення рішення про допуск

до застосування на вітчизняному виробі авіатехніки тієї чи іншої марки зарубіжної оливи необхідно встановити її еквівалентність відповідній марці вітчизняної оливи, тобто визначити взаємозамінюваність традиційних і зарубіжних олив [159].

Внаслідок високої теплонапруженості, великого ресурсу сучасних авіаційних ГТД, а також низки особливостей зарубіжних ПММ, що виробляються з іншої сировини, за іншою технологією та із застосуванням інших присадок, порівняно з вітчизняними, використання зарубіжних олив на вітчизняних авіадвигунах недопустиме без всебічного дослідження їх фізико-хімічних і експлуатаційних характеристик у лабораторних умовах, а в деяких випадках, без проведення спеціальних стендових або експлуатаційних випробувань. Складність вирішення вказаної проблеми очевидна. Вона обумовлена великою номенклатурою ММ, що продукуються та використовуються за кордоном і в нашій країні. Зарубіжні оливи допускаються до використання лише за умови включення їх розробником і виробником авіатехніки в технічну документацію з експлуатації та обслуговування виробу [160].

Підставою для внесення до такої документації тих чи інших марок зарубіжних олив є «Перелік зарубіжних паливно-мастильних матеріалів, рекомендованих до застосування на авіатехніці вітчизняного виробництва», що включає марки традиційних ПММ та відповідні їм марки товарних зарубіжних продуктів. При цьому еквівалентність вітчизняних і зарубіжних марок олив встановлюється на підставі таких документів: – специфікацій, сертифікатів і іншої технічної документації на зарубіжні оливи; – результатів лабораторних випробувань зразків товарних зарубіжних олив в обсязі показників НД на відповідну вітчизняну оливу та в обсязі комплексу методів кваліфікаційної оцінки (КМКО) (за умов, що відповідають виконанню випробувань вітчизняної оливи); – результатів стендових випробувань виробів вітчизняної авіатехніки на зарубіжній оливі; – узагальнення та аналізу досвіду використання зарубіжної оливи на конкретних виробках вітчизняної авіаційної техніки [161].

Під час переходу з оливи традиційного виробництва на зарубіжну й назад

потрібне промивання оливосистеми двигуна оливою, що планується для використання; – робочі оливи зарубіжного виробництва допускається використовувати для консервації лише оливосистем двигунів, дотримуючись особливостей консервації оливосистем традиційними аналогами відповідно до чинних інструкцій; – під час запису в технічній документації двох сортів вітчизняної оливи, допущеної до використання (наприклад, «ІПМ10» і «36/1Ку-А» або «ІПМ-10» і «ВНИИНП 50-1-4Ф»), вирішується використання зарубіжних аналогів обох марок вітчизняних олив [159].

Основний об'єм синтетичних складноефірних олив також виробляється на сьогодні міжнародними корпораціями Exxon, Mobil, British Petroleum і Shell (Rouco). Складні ефіри, що є основним класом масових олив, виробляються фірмами Hercules, Geigy, NYCO, Unichema та ін. На відміну від олив і базових основ, присадки різного функціонального призначення виробляються багатьма фірмами. Протягом багатьох років генеральною лінією в поліпшенні якості олив для ГТД є підвищення їх термоокиснювальної стабільності (ТОС) [159-162].

Для забезпечення беззмінної роботи оливи в авіаційних ГТД протягом міжремонтного ресурсу двигунів і підвищення надійності їх експлуатації зарубіжними фірмами розроблені оливи так званого «третього покоління» на основі складних ефірів поліолів, що відповідають вимогам специфікацій Mil-PRF-23699F і DEF STAN 91-101 і що мають вищі експлуатаційні властивості (ТОС і несучу здатність) порівняно з товарними оливами II-го покоління, що традиційно застосовуються протягом багатьох років. Це оливи класу HTS (High Thermal Stability). Використання таких олив дозволяє знизити об'єм робіт і витрати з технічного обслуговування авіаційної техніки, продовжує термін служби підшипників, скорочує витрату оливи. Фірмами Exxon, Mobil, British Petroleum, Shell та ін. виробляються зазвичай декілька марок синтетичних олив на основі складних ефірів, що відповідають вимогам різних специфікацій [159].

## Висновки до розділу 2

1. Проаналізовано технологічні процеси виробництва синтетичної Mobil Jet Oil 254 та мінеральної МК-8п олив та показано відмінність у технологіях виробництва.

2. Проаналізовано груповий, фракційний, хімічний склад олив та показано їх вплив на фізико-хімічні та експлуатаційні властивості.

3. Наведено основні показники якості оливи Mobil Jet Oil 254 відповідно до стандарту MIL-PRF-23699-HTS і оливи МК-8п відповідно до стандарту ГОСТ 6457 та показана необхідність їх дотримання в процесі експлуатації.

4. Проаналізовано пакет присадок до олив та показано їх вплив на основні експлуатаційні властивості.



## **РОЗДІЛ 3**

### **МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОЛИВ ДЛЯ ГЕЛІКОПТЕРІВ**

Для визначення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей олив для гелікоптерів запропоновано застосовувати відомі методики проведення випробувань основних показників якості синтетичної та мінеральної олив, приведених до міжнародних стандартів ISO, ASTM, вказаних у паспорті якості на дані оливи та показано їх кореляцію з діючими стандартами – ГОСТ (ДСТУ). Наведено схеми приладів та стандартизованого обладнання, що застосовувалось у лабораторних випробуваннях синтетичної Mobil Jet Oil 254 та мінеральної МК-8п олив [163].

#### **3.1. Аналіз методів і методик визначення води та механічних домішок в оливах**

##### **3.1.1. Візуальний метод визначення вмісту механічних домішок і води в оливах**

Візуальний метод дозволяє визначити наявність або відсутність вільної або емульсійної води, а також механічних домішок при розмірах забруднюючих частинок або крапель води понад 15–20 мкм (ДСТУ ГОСТ 2477:2021. Нафта і нафтопродукти. Метод визначення вмісту води).

Суть методики візуального визначення вмісту води та механічних домішок в оливах полягає в розгляді проби, наливої в сухий, чистий циліндр з прозорого скла та розгляді її через 1–2 хв, коли піднімуться бульбашки повітря, в потоці світла. Бажано перед випробуванням надати оливі в циліндрі обертального руху, при цьому механічні домішки та вода, при їх наявності, будуть захоплюватися з дна циліндра. Вільну воду в ПММ легко побачити візуально, оскільки вона не змішується з нафтопродуктами, осідає на дні ємності у зв'язку з більшою густиною

і розміщується окремим шаром або у вигляді крапель. Під час збовтування проби вода, яка осіла у вигляді крапель на дні циліндра, легко виявляється [164].

Під час розглядання проби палива в прохідному світлі вона повинна бути прозорою і не містити домішок, окремого шару води чи її крапель.

Для підвищення об'єктивності візуального методу визначення вмісту механічних домішок і води в ПММ та виключення неправильних результатів необхідно дуже уважно стежити за чистотою посудин для відбору проб, зберігати їх герметично закритими [164].

Метод визначення наявності води в оливах по потріскуванню заключається нагріванні оливи до температури 130 °С та спостереженням за її станом (ГОСТ 1547. Метод визначення води в нафтових оливах).

Суть методики визначення наявності води в оливах полягає в тому, що її наливають у суху пробірку, яку закривають пробкою з термометром у вертикальному положенні, та нагрівають у термостаті, що заповнений індустріальною оливою, попередньо нагрітою до температури 175 °С, до появи потріскування із вспінюванням [165].

Наявна в оливі вода переходить в пароподібний стан, бульбашки пари піднімаються до поверхні нафтопродукту, розриваються та потріскують.

За цими методами та методиками проведення випробувань вміст води та механічних домішок в оливах відповідно до їх паспортів якості нормується як «відсутні» [165].

### **3.1.2. Кількісні методи визначення вмісту механічних домішок і води в оливах**

Слід відмітити, що візуальними методами та методиками проведення випробувань визначення вмісту води та механічних домішок у нафтопродуктах проводиться їх якісний аналіз. Для проведення випробувань динаміки зміни цих показників якості олив у процесі їх експлуатації у системах змащування гелікоптерів цих методів недостатньо, тому в роботі проводили визначення цих

показників якості кількісними методами.

Вміст вільної та емульсійної води в ПММ недопустимий. У нафтопродуктах дозволяється вміст лише розчинної води, тобто води на молекулярному рівні [166].

Досить точне кількісне визначення вмісту води в оливах здійснюється методом Діна-Старка за ASTM D4006.

Метод кількісного визначення вмісту води в оливах ґрунтується на відгоні води з паливно-мастильних матеріалів при їх перегонці з розчинником. Розчинник застосовують для зменшення в'язкості нафтопродукту. За об'ємом води, яка зібралася в приймачі-уловлювачі, віднесеному до відомої кількості оливи, роблять висновок про її кількісний вміст [164].

У просушену колбу поміщають наважку випробовуваної оливи  $100 \pm 1$  г, зважену з точністю  $\pm 0,10$  г. Потім циліндром відміряють у колбу  $100 \text{ см}^3$  розчинника, перемішують місткість колби до повного розчинення проби і поміщають у колбу кипілки.

Колбу 3 приладу для кількісного визначення вмісту води (рис. 3.1) з'єднують із відповідною трубкою чистого сухого приймача-уловлювача 2. До приймача-уловлювача приєднують за допомогою скляних з'єднувальних елементів холодильник 1.

За їх відсутності з'єднання проводять за допомогою коркових пробок, при цьому нижній кінець відвідної трубки приймача-уловлювача вставляють в отвір колби з таким розрахунком, щоб він входив у колбу не більше ніж на 15–20 мм [165].

У верхньому кінці приймача-уловлювача закріплюють кінець трубки холодильника так, щоб нижній, навкіс зрізаний край її містився напроти середини відвідної трубки приймача-уловлювача. Пробкове з'єднання для уникнення втрат рекомендується змазати мастилом (гліцерином) [166].

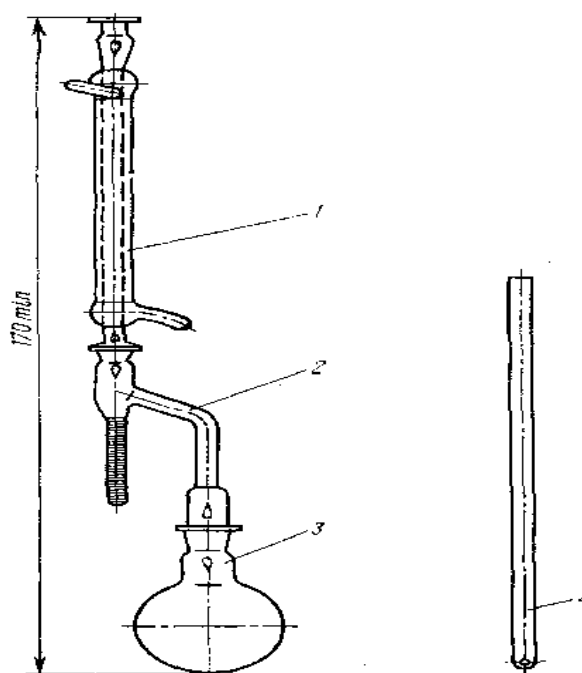


Рис. 3.1. Схема приладу для кількісного визначення вмісту води в оливах:  
1 – холодильник; 2 – приймач-уловлювач; 3 – колба; 4 – скляна паличка

Колбу приладу для кількісного визначення вмісту води встановлюють у колбонагрівачі або на електричній плитці, пускають у холодильник воду і нагрівають вміст колби до кипіння. Перегонку проводять так, щоб із навкіс зрізаного кінця трубки холодильника в приймач-уловлювач потрапляли 2–4 краплини за 1 с. Пари, які конденсуються в холодильнику, стікають у приймач-уловлювач, при цьому вода збирається в його нижній градуйованій частині [163].

Перегонку завершують тоді, коли об'єм води в приймачі-уловлювачі перестане збільшуватися і верхній шар розчинника стане повністю прозорим. Час перегонки повинен тривати не менше 30 і не більше 60 хв [163].

Після того, як колба охолоне, а розчинник і вода в приймачі-уловлювачі набудуть температури навколишнього середовища, прилад для кількісного визначення вмісту води розбирають і зіштовхують скляною паличкою краплини води зі стінок приймача-уловлювача [164].

Масову частку води в оливах ( $X$ ) у відсотках обчислюють за формулою:

$$X = \frac{V \cdot \rho_{\text{в}}}{m},$$

де  $V$  – об'єм води, яка зібралася в приймачі-уловлювачі,  $\text{см}^3$ ;  $\rho_{\text{в}}$  – густина води за температури навколишнього середовища,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $m$  – наважка масла, яку взяли для випробування.

Вода в приймачі-уловлювачі кількістю, що не перевищує  $0,03 \text{ см}^3$ , розцінюється як сліди [167].

Відсутність води в оливах визначається станом, за якого в нижній частині приймача-уловлювача немає крапель води.

Суть методики визначення вмісту механічних домішок в оливах полягає у її фільтруванні з розчинником через фільтр та визначення вмісту механічних домішок за різницею маси фільтра до та після пропускання через нього оливи за ГОСТ 6370.

У стакан поміщаємо підготовлену пробу аналізованого продукту і розбавляємо підігрітим до  $80^\circ\text{C}$  розчинником – толуолом [167].

Вмикаємо вакуумний насос. Лійку для фільтрування за допомогою гумової пробки приєднуємо до колби для фільтрування під вакуумом. Паперовий фільтр змочуємо розчинником і поміщаємо у воронку так, щоб фільтр щільно прилягав до стінок воронки.

Після фільтрації фільтр з осадом за допомогою промивалки промиваємо підігрітим толуолом доти, доки на фільтрі не буде слідів нафтопродукту і розчинник стікатиме прозорим і безбарвним (рис. 3.2, а) [167].

Після завершення промивання фільтр з осадом переносимо в стаканчик для зважування з відкритою кришкою, у якому сушився чистий фільтр, і сушимо в сушильній шафі за температури  $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$  не менше ніж 45 хв. Потім стаканчик закриваємо кришкою, охолоджуємо в ексікаторі протягом 30 хв і зважуємо на вагах з похибкою не більше  $0,0002 \text{ г}$  (рис. 3.2, б).

Масову частку механічних домішок  $X$  у відсотках обчислюємо за формулою:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \cdot 100,$$

де  $m_1$  – маса бюкса з паперовим фільтром і механічними домішками (після випробування), г;  $m_2$  – маса бюкса з чистим підготовленим паперовим фільтром (до випробування), г;  $m_3$  – маса проби, г.[167].



а

б

Рис.3.2. Прилад для фільтрування: а – колба для фільтрування; б – ексикатор

### 3.2. Методика визначення густини олив

Густина є контрольним показником якості будь-якої оливи. Для оливи визначається ареометром за ГОСТ 3900, ASTM D1429, ДСТУ ГОСТ 31072. Вимірювання цього показника якості здійснюється ареометром (рис.3.3).

Необхідно врахувати, що у США та більшості країн Європи густину нафтопродуктів зводять до температури 60 °F (за шкалою Фаренгейта, що відповідає 15,5 °C), тому в паспорті якості на імпортований нафтопродукт вказується температура заміру густини 15 °C, що не є коректним. Якщо вимірювання проводяться за іншої температури, то результати необхідно звести до стандартної температури 20 °C (1-2) [168].

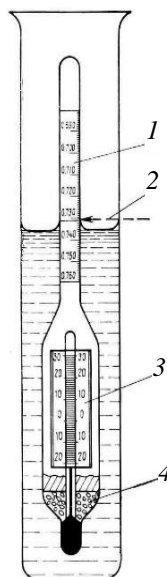


Рис. 3.3. Ареометр для нафтопродуктів:

1 – шкала густини; 2 – лінія відліку; 3 – шкала термометра; 4 – вантаж

Циліндр, у якому вимірюватимуть густину, обирають такої місткості, щоб при зануренні в пробу оливи об'ємом 250 см<sup>3</sup> ареометра, останній занурювався на всю висоту і водночас не торкався стінок [168].

Суть методики вимірювання густини полягає в зануренні ареометра, тримаючи його за верхній кінець, у пробу оливи до поділки на шкалі густини, що відповідає очікуваній густині, чи доки не стане очевидним, що він плаває. Після того, як ареометр встановиться і припиняться його коливання, проводять відлік по верхньому краю меніска. Під час підрахунку око оператора повинно перебувати на рівні меніска. Ареометр не повинен торкатись стінок чи дна циліндра. На поверхні ареометра не має бути бульбашок повітря [166-168].

Температуру палива в циліндрі визначають за термометром ареометра. Якщо в ареометрі немає термометра, то температуру оливи визначають іншим термометром до і після вимірювання густини.

Густина оливи за температури випробування визначається шляхом відліку за шкалою ареометра [168].

Для зведення виміряної густини до густини за температури 20 °С ( $\rho^{20}$ )

користуються формулою:

$$\rho^{20} = \rho^t + \nu (t - 20),$$

де  $\rho^t$  – густина палива за температури випробування, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – середня температурна поправка густини, яку визначають за таблицями, приведеними в ГОСТ 3900;

$t$  – температура, за якої проводяться випробування, °C.

Результат розрахунку округлюють до тисячних значень [168].

### 3.3. Метод та методика визначення в'язкості олив

В'язкість – основна характеристика оливи, по величині якої робиться вибір оливи для застосування в конкретному випадку. Кінематична в'язкість олив визначають стандартним методом за ГОСТ 33, ASTM D445 [169].

Особливостями методик проведення визначення кінематичної в'язкості олив є визначення цього показника за різних температур, передбачених у паспорті якості на конкретну оливу. Наприклад, для мінеральної оливи МК-8п відповідно до ГОСТ 6457 передбачено визначення цього показника якості за температур: 20 °C, не більше 30 сСт; 50 °C, не менше 8.3 сСт, а для оливи Mobil Jet Oil 254 відповідно до MIL-PRF-23699-HTS вимірювання в'язкості проводиться за температур: 40 °C, не більше 26.4 сСт; 100 °C, не менше 5.3 сСт; - 40 °C, не більше 11500 сСт. Тому, для проведення випробувань олив за показником кінематична в'язкість необхідно використовувати термостати як за високих, так і за низьких температур [164-165].

Методика вимірювання кінематичної в'язкості полягає у визначенні часу витікання певного об'єму оливи через калібрований капіляр візкозиметра (рис.3.4) [169].



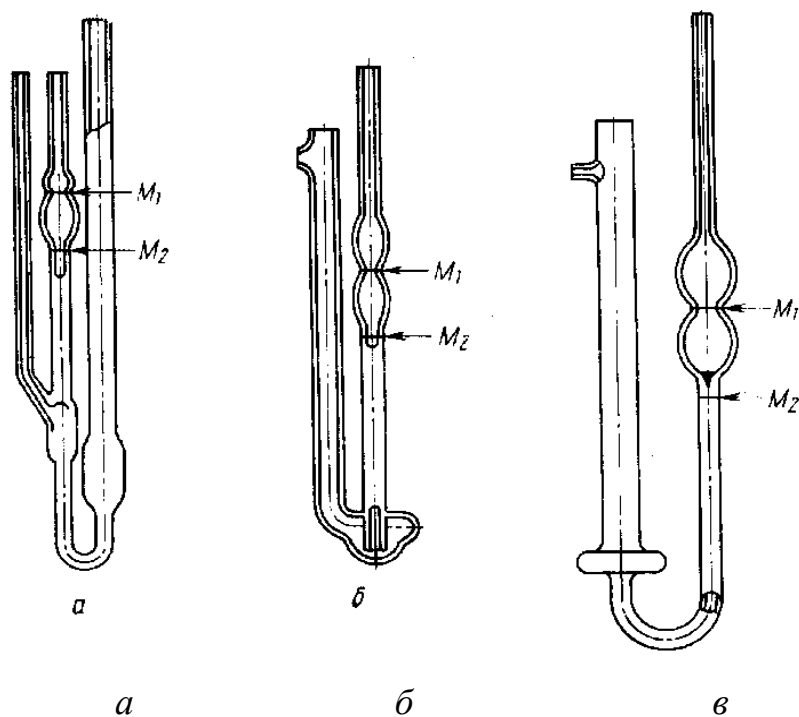


Рис. 3.4. Віскозиметри: *а* – ВПЖТ-1; *б* – ВПЖТ-2; *в* – ВПЖТ- 4

Встановлюємо в термостаті ( рис.3.5) задану температуру, опускаємо в нього заповнений оливою віскозиметр і витримуємо до тих пір, поки він не прогріється або не охолоне до температури випробування (достатньо 15 хв) [169].

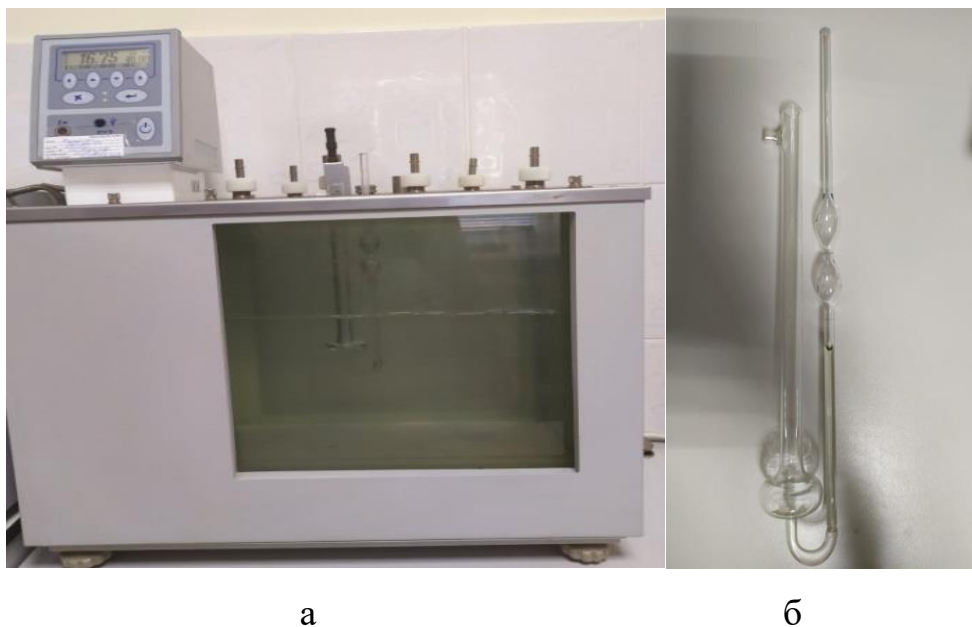


Рис. 3.4. Термостат для визначення в'язкості –*а*, віскозиметр – *б*

Далі за допомогою груші, приєднаної до кінця коліна 1, оливу перекачують

у розширення 4 дещо вище від мітки  $M_1$ . Знявши грушу, спостерігають за протіканням рідини через капіляр. Засікають час опускання меніска рідини від мітки  $M_1$  до  $M_2$ . Дослідження повторюють тричі. Час витікання у кожному досліді не повинен відрізнятися від середньоарифметичного більше ніж на 0,5 % [167].

Кінематичну в'язкість досліджуваної оливи  $\nu$  у квадратних міліметрах за секунду або сантистоксах ( $\text{мм}^2/\text{с}$  чи  $\text{сСт}$ ) розраховують за формулою:

$$\nu = \bar{\tau} C,$$

де  $C$  – стала віскозиметра,  $\text{мм}^2/\text{с}^2$  ( $\text{сСт}/\text{с}$ );  $\bar{\tau}$  – середнє арифметичне значення результатів вимірювання часу витікання оливи у віскозиметрі  $\bar{\tau} = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)/3$ . Результати розрахунку округляють до десятих значень (3-7) [167].

### 3.4. Визначення загального лужного числа олив

Загальне лужне число (ЗЛЧ) характеризує вміст і оливах пакету присадок. Лужність олив виражаються через кількість (в мг) гідроксиду калію (KOH), еквівалентну вмісту всіх видів лугів в 1 г оливи або необхідну для нейтралізації всіх кислот в 1 г оливи, розмірність мг KOH / 1 г оливи [168].

ЗЛЧ оливи визначається потенціометричним титруванням проби відповідно до стандартів ASTM D 664, ГОСТ 11362, ISO 6619 або більш новими методами – потенціометричним титруванням перхлоровою кислотою за стандартами DIN ISO 3771, ASTM D 2896-98.

Сутність методу визначення ЗЛЧ згідно з ДСТУ 5094:2008 полягає у початковому розрахунку маси проби за формолою :

$$\text{маса проби} = 8/H, \text{ г},$$

де 8 – оптимально потрібна для титрування кількість основ (умовно KOH), мг;  $H$  – нормативне чи очікуване значення ЗЛЧ, мг KOH/г. [166].

Зважують досліджуваний зразок з точністю 0,0002 г. До наважки додають мірним циліндром розчинник І (толуолі) розмішують мішалкою до повного

розчинення проби.

Продовжуючи перемішування додають розчинник у співвідношенні 1:1 у разі використання ізопропілового спирту, або 7:3 у разі використання етилового спирту. Загальний об'єм розчину обирають у межах від 30 до 70 см<sup>3</sup>.

Проводять титрування додаючи титрант порціями 0,1 см<sup>3</sup>. Титрування завершують, коли після стрибка ЕРС додавання останніх 0,3 см<sup>3</sup> титранту призводить до зміни показів приладу не більше ніж на 10 Мв [166].

Точку еквівалентності та об'єм титранту, який їй відповідає, визначають електронною системою установки. Загальне лужне число обчислюється автоматично за формулою:

$$\text{ЗЛЧ} = \frac{(V_k - V_0) \cdot C \cdot 56.1}{m},$$

де  $V_k$  – об'єм титранту (соляної кислоти), що відповідає кінцевій точці титрування;  $V_0$  – об'єм титранту, витраченого під час контрольного титрування;  $C$  – молярна концентрація розчину соляної кислоти, моль/дм<sup>3</sup>;

$m$  – маса досліджуваної проби; 56, 1 – молярна маса еквівалента КОН, г/моль [166].

### 3.5. Методика визначення кольору олив

Колір олив визначається і виражається чисельно за стандартами ISO 2049, ASTM D 1500, ГОСТ 20284 [163].

Методика визначення кольору олив полягає у порівні з набором кольорових еталонів, які нумеруються від 0,0 (білий) до 8,0 (дуже темно-коричневий) через 0,5 од. (усього 16 номерів). Виміряють цей показник приладом ЦНТ (рис. 3.5).

У два стакани наливають до мітки: в один – дистильовану воду, а в інший – нафтопродукт, який випробовується [163].

Відкривають кришку приладу ЦНТ і ставлять у правий відсік камери (коло барабана) кювету з дистильованою водою, у лівий – стакан з нафтопродуктом, який випробовується. Закривають кришку приладу [163].

Вмикають джерело світла і порівнюють колір нафтопродукту з кольором кольорових скляних світлофільтрів. Добирають світлофільтр, колір якого максимально відповідає кольору проби нафтопродукту [163].



Рис.3.5. Прилад ЦНТ для визначення кольору олив

### **3.6. Визначення температури спалаху олив**

Сутність методу полягає у визначенні найнижчої температури, за якої в умовах досліду над поверхнею горючої речовини утворюється суміш пари з повітрям, яка здатна спалахувати від джерела запалювання. Визначається температура спалаху олив у відкритому або закритому тиглі за ГОСТ 6356, ASTM D92 [165].

Прилад для визначення температури спалаху в закритому тиглі (рис. 3.6) складається з металевого закритого тигля 5, у який вміщено стакан з чавуну 7 з електронагрівальним елементом. Останній вмонтовано в заповнений азбестом металевий кожух 8. [165].

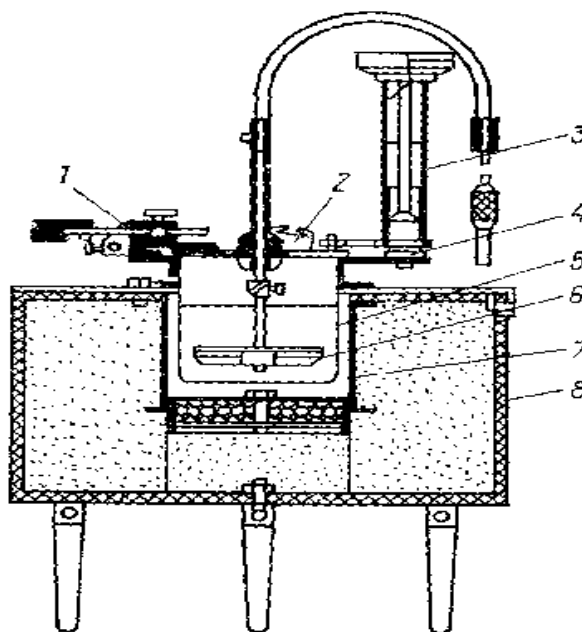


Рис. 3.6. Прилад для визначення температури спалаху олив:

- 1 – пристрій для запалювання; 2 – гніздо для термометра;  
 3 – пружинний важіль; 4 – кришка тигля; 5 – металевий тигель;  
 6 – мішалка; 7 – стакан з чавуну; 8 – металевий кожух

Тигель із внутрішнього боку має мітку для зазначення рівня дослідного зразка палива. Кришка тигля 4 обладнана засувкою з двома отворами, гніздом для термометра 2, запалювальним пристроєм 1, пружинним важелем 3 і мішалкою 6. Поворотом пружинного важеля відчиняються засувки, і запалювальний пристрій нахиляється в паровий простір над тиглем [163-165].

Електронагрівач вмикають у мережу і нагрівають зразок оливи в тиглі. Перемішування ведуть постійно з частотою обертання мішалки від 90 до 120 об/хв, а нагрівання продукту так, щоб за 1 хв температура зразка підвищувалась на 1 °С. Випробування на спалах зразка оливи починають проводити за температури не більше ніж на 10 °С нижчої за очікувану температуру спалаху. Випробування проводять під час нагрівання зразка оливи на 1 °С, тобто приблизно один раз за 1 хв. У момент проведення випробування на спалах перемішування оливи припиняють, приводять у дію механізм, розміщений на кришці, який відчиняє засувку і опускає запалювальний пристрій у паровий простір. Час перебування запалювального пристрою в найнижчому положенні має становити 1 с. Під час кожного визначення за температуру спалаху беруть показники термометра в

момент чіткої появи полум'я над поверхнею продукту всередині приладу [164].

Під час застосування як запалювального пристрою газового пальника останній в процесі випробування повинен бути в запаленому стані для виключення можливості проникнення газу в тигель. Якщо у процесі випробування полум'я в запалювальному пристрої згасне в момент відкриття кришки, то результат цього визначення враховувати не слід [164].

За результат випробування беруть середнє арифметичне двох послідовних визначень. Отриману температуру спалаху округлюють до цілих одиниць, яку обчислюють введенням температурної поправки на стандартний барометричний тиск 101,3 кПа (760 мм рт. ст.) алгебричним додаванням отриманої температури і температурної поправки:

$$\Delta t = \frac{101,3 - P}{3,3} \cdot 0,9,$$

де  $P$  – фактичний барометричний тиск, кПа (мм рт. ст.).

Допускається вводити температурні поправки на вплив барометричного тиску (табл. 3.1), обчислені з похибкою не більше ніж 1 °С [165].

Таблиця 3.1

**Поправки під час визначення температури спалаху оливи**

Барометричний тиск		Поправка, °С
кПа	мм рт. ст.	
84,8–88,4	636–663	+4
88,5–92,1	664–691	+3
92,2–95,7	692–718	+2
95,8–99,4	719–746	+1
103,2–106,8	774–801	–1

Результати випробувань визнаються достовірними (за довірчої ймовірності 0,95), якщо розходження між ними не перевищують значень, наведених у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

**Допустимі похибки результатів двох послідовних визначень  
температури спалаху олив**

Температура спалаху, °C	Допустимі відхилення, °C	
	Повторюваність	Відтворюваність
До 104	±2	±4
Понад 104	±5	±8

### 3.7. Визначення температури застигання олив

Сутність методу полягає у визначенні температури за якої олива протягом 5 с перебуває в нерухомому стані (стандарти ISO 3016, ASTM D 97, ГОСТ 20287). Схему приладу для визначення цього показника показано на рис. 3.7 [169].

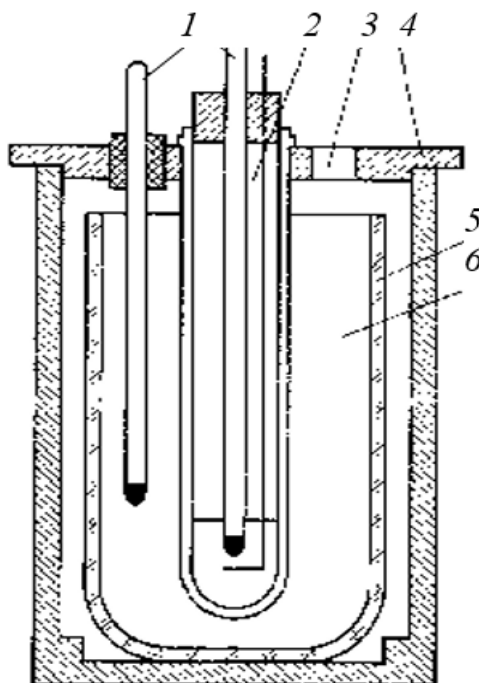


Рис. 3.7. Схема приладу для визначення температури початку кристалізації:  
 1 – термометри; 2 – пробірка з подвійними стінками; 3 – отвір для подачі холодоагенту; 4 – кришка; 5 – посудина для охолоджувальної суміші;  
 6 – охолоджувальна суміш

Прилад для визначення температури початку кристалізації є циліндричною посудиною-термосом для охолоджувальної суміші, яка вставлена у фарфорову склянку з теплоізоляцією. Посудина обладнана кришкою 4 з отворами для пробірки з подвійними стінами 2, термометрів 1, а також для подавання холодоагенту 3. Доцільно застосовувати модифікований прилад, у якому пробірку з подвійними стінками вміщують у скляну посудину з подвійними стінками або прилад із дзеркальним відображенням світла за ГОСТ 5066 [169].

Пробірку зі зразком оливи вставляють у посудину для охолоджувальної суміші і через отвір в її кришці наливають спирт. Рівень налитого в посудину спирту повинен бути на 30–40 мм вище за рівень оливи в пробірці.

У посудину для охолоджувальної суміші занурюють термометр. Його ртутний резервуар повинен розміщуватися на тому ж рівні, що і ртутний резервуар термометра, що міститься в пробірці.

Температуру спирту знижують поступовим додаванням у нього холодоагенту, підтримуючи тим самим температуру охолоджувальної суміші на  $15 \pm 2$  °C нижче температури досліджуваної оливи.

За температури, на 5 °C вищої від очікуваної температури початку застигання (кристалізації), пробірку у приладі нахиляють під кутом 45° і слідкують за зміною меніска оливи. Порівняльні спостереження проводять доти, доки меніск оливи не буде змінюватися під час нахилу приладу протягом 5 с [168-169].

### **3.8. Методика визначення трибологічних характеристик сучасних авіаційних олив**

Для оцінки впливу фулерену на протизносні властивості олив проводили трибологічні випробування на стандартизованій чотирьохкульковій машині тертя відповідно до ГОСТ 9490 (ASTM D2783) (рис. 3.8). [163-164].

За результатами досліджень визначали знос, який оцінювали за діаметром плями зносу  $d$  та критичному навантаженню  $P_k$  переходу до схоплення.



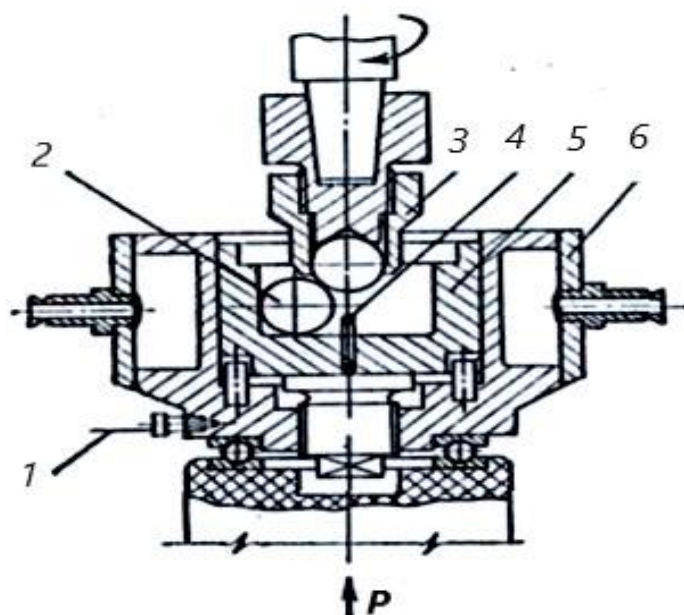


Рис. 3.8. Чотирьохкулькова машина тертя ЧКМ-1: 1 – гвинт; 2 – кулі; 3 – вузол тертя; 4 – акустичний зонд; 5 – стакан; 6 – корпус

Три нижні кульки закріплюються нерухомо у чашці машини із змащувальним матеріалом, що випробовують. Верхня кулька, яка закріплена у шпинделі машини, обертається відносно трьох нижніх при заданому навантаженні з частотою обертання  $1460 \pm 70$  об/хв. Провертання кульок у процесі випробування не допускається [163].

Кульки повинні бути виготовлені із підшипникової сталі ШХ-15 не нижче II ступеня точності, клас В, діаметром 16 або 20 мм. Можливо використовувати для випробування кульки з нових реальних підшипників [163].

Протизносні властивості на чотирьохкульковій машині тертя визначаються для олив та пластичних змащувальних матеріалів, що використовуються для змащення поверхонь тертя.

Метод полягає у випробуванні змащувального матеріалу на машині тертя при заданих осьових навантаженнях та визначенні основних трибологічних характеристик змащувальних матеріалів: несучої здатності – за критичним навантаженням  $P_k$ , протизадирних властивостей за індексом задиру –  $I_z$ , граничної навантажувальної здатності – за навантаженням зварювання  $P_z$  та протизносних властивостей – за діаметром плям зносу ( $d$ ) [163].

Перед початком випробування кожного зразка змащувального матеріалу всі

деталі машини, з якими стикається змащувальний матеріал під час випробування (чашка з деталями кріплення нижніх кульок і деталі кріплення верхньої кульки), промивають бензином або бензолом і просушують на повітрі. Кульки, які використовуються при випробуванні, також промивають бензином і просушують на повітрі [163-166].

Випробування кожного змащувального матеріалу проводять за температур, встановлених у нормативно-технічній документації.

Випробування складається із серії визначень. Кожне визначення проводять на новій пробі випробуваного змащувального матеріалу з чотирма новими кульками [168].

Для проведення випробування кульки закріплюють у шпинделі машини і чашці для змащувального матеріалу. При випробуванні олив її заливають так, щоб кульки були цілком покриті нею. Потім встановлюють чашку із змащувальним матеріалом у машину, задають навантаження і включають електродвигун. Для того, щоб уникнути деформації кульок, необхідно уникати ударних навантажень.

При проведенні випробування при підвищених температурах попередньо включають електронагрівач. Після досягнення заданої температури створюють необхідне навантаження і включають електродвигун. Температура випробування повинна підтримуватися з похибкою не більше  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  [168-169].

Тривалість випробування від моменту вмикання до моменту вимикання електродвигуна при визначенні критичного навантаження, навантаження зварювання та індексу задиру повинна бути  $10 \pm 0,2$  с, при визначенні показника зносу –  $60 \pm 0,5$  хв.

Випробування починають з початкового навантаження 196 Н (20 кгс). Наступні випробування проводять зі зростаючим навантаженням відповідно до ряду навантажень 1 (табл. 3.3), і закінчують визначенням навантаження зварювання [169].

Таблица 3.3

## Ряди навантажень

Ряд навантажень 1		Ряд навантажень 2		Граничний знос ( $d_r + 0,15$ ), мм
Н	кгс	Н	кгс	
59	6	64	6,5	0,31
		69	7,0	0,31
		74	7,5	0,31
				0,32
				0,32
78	8	83	8,5	0,32
		88	9,0	0,33
		93	9,5	0,33
				0,33
98	10	103	10,5	0,34
		108	11,0	0,34
		118	12	0,35
				0,35
				0,35
127	13	132	13,5	0,35
		137	14	0,36
		147	15	0,36
				0,37
157	16	167	17	0,37
		176	18	0,37
		186	19	0,38
				0,38
				0,38
196	20	205	21	0,39
		216	22	0,39
		225	23	0,39
				0,40

Ряд навантажень 1		Ряд навантажень 2		Граничний знос ( $d_r + 0,15$ ), мм
Н	кгс	Н	кгс	
235	24	255	26	0,40
		274	28	0,41
		294	30	0,42
				0,42
314	32	333	34	0,43
		353	36	0,43
		372	38	0,44
				0,44
392	40	416	42,5	0,45
		441	45	0,46
		465	47,5	0,46
				0,47
490	50	519	53	0,47
		549	56	0,48
		588	60	0,49
				0,49
617	63	657	67	0,50
		696	71	0,51
		735	75	0,51
				0,52
784	80	823	84	0,53
		872	89	0,54
		921	94	0,54
				0,55
980	100	1039	106	0,55
		1098	112	0,56
		1166	119	0,56

Ряд навантажень 1		Ряд навантажень 2		Граничний знос ( $d_r + 0,15$ ), мм
Н	кгс	Н	кгс	
				0,57
1235	126	1303	133	0,58
		1381	141	0,59
		1470	150	0,60
				0,61
1568	160	1646	168	0,62
		1744	178	0,62
		1842	188	0,63
				0,64
				0,65
1960	200	2067	211	0,66
		2195	224	0,67
		2323	237	0,68
				0,69
2450	250	2607	266	0,70
		2764	28	0,71
			2	
		2930	29	0,72
			9	0,73
3087	315	3283	335	0,75
		3479	355	0,76
		3685	376	0,77
				0,78
3920	400	4136	422	0,79
		4381	447	0,81
		4635	473	0,82
				0,83

Ряд навантажень 1		Ряд навантажень 2		Граничний знос ( $d_r + 0,15$ ), мм
Н	кгс	Н	кгс	
4900	500	5204	531	0,85
		5508	562	0,86
		5841	596	0,87
				0,89
6174	630	6546	668	0,90
		6938	708	0,92
		7350	750	0,93
				0,95
7840	800	8232	840	0,96
		8722	890	0,98
		9232	942	0,98
				0,99

При визначенні критичного навантаження, що характеризує здатність змащувального матеріалу запобігати виникненню задиру поверхонь тертя, і навантаження зварювання, що характеризує граничну працездатність мастильного матеріалу в умовах випробування, попередньо проводять ряд послідовних випробувань зі зниженням або зростанням навантаження відповідно до ряду навантажень 1 (див. табл. 3.3), максимально наближених до передбачуваних критичного навантаження і навантаження зварювання [163-167].

Потім, використовуючи ряд навантажень 2, встановлюють значення критичного навантаження і навантаження зварювання.

Проводять два паралельних випробування.

При зварюванні необхідно негайно виключити електродвигун, щоб уникнути пошкодження машини.

Показник зносу, що характеризує вплив мастильного матеріалу на знос поверхонь тертя, визначають при постійному навантаженні, встановленому у нормативно-технічній документації на мастильний матеріал [165].

Після закінчення випробування й охолодження вузла тертя нижче  $40^{\circ}\text{C}$ , зливають рідкий мастильний матеріал чи знімають ватним тампоном пластичний мастильний матеріал з ділянок тертя на нижніх кульках.

Потім вимірюють діаметри плям зносу кожної з трьох нижніх кульок у напрямку ковзання і перпендикулярно йому у площині, перпендикулярній вісі об'єктива мікроскопа. За результат виміру приймають середнє арифметичне значення вимірів плям зносу нижніх кульок у двох напрямках.

Критичним навантаженням ( $P_k$ , кгс) вважають навантаження, при якому середній діаметр плям зносу нижніх кульок знаходиться у межах значень величини граничного зносу ( $d_r + 0,15$ ) для даного навантаження, збільшення якого на величину наступного навантаження за рядом навантажень 2 викликає збільшення середнього діаметра плям зносу на величину, більшу ніж 0,1 мм.

За результат випробування приймають меншу величину критичного навантаження з двох отриманих величин [169].

Розбіжності, що допускаються між паралельними визначеннями  $P_k$  на одному зразку мастильного матеріалу, не повинні перевищувати різниці між найбільшим і найменшим значеннями чотирьох послідовних навантажень, у першому і другому рядах навантаження [166].

Навантаженням зварювання ( $P_z$ , кгс) вважають найменше навантаження, при якому відбулася автоматична зупинка машини при досягненні моменту тертя  $1180 \pm 25 \text{ Н}\cdot\text{с}$  ( $120 \pm 2,5 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ) чи зварювання кульок.

Для тих мастильних матеріалів, для яких навантаження зварювання не встановлюється, за навантаження зварювання приймають навантаження, при якому утворюється пляма зносу з діаметром 3 мм і більше [167-168].

### Висновки до розділу 3

1. Для визначення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей олив для гелікоптерів запропоновано застосовувати відомі методики проведення випробувань з урахуванням особливостей їх застосування для олив іноземного

виробництва та специфіки показників їх якості.

2. Визначено кореляційні заходи щодо відповідності методів та методик визначення показників якості олив, що використовуються у системах змащування вітчизняних та зарубіжних гелікоптерів.

3. Проаналізовано методики визначення показників якості оливи Mobil Jet Oil 254 і мінеральної оливи МК-8п, які найбільш схильні до змін у процесі експлуатації: густина; кінематична в'язкість; загальне лужне число; температура спалаху; колір; температура застигання (кристалізації); вміст механічних домішок та води; випаровуваність; трибологічні характеристики, що дозволяє прогнозувати та цілеспрямовано змінювати обмеження щодо використання олив, які досягли критичного експлуатаційного рівня.



## РОЗДІЛ 4

### ДИНАМІКА ЗМІНИ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОЛИВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Для дослідження зміни показників якості олив у процесі їх експлуатації були відібрані два різних види олив, а саме: синтетична Mobil Jet Oil 254 та мінеральна МК-8п. Визначення основних показників якості олив проводилися з різним напрацюванням після 50, 100, 150, 200, 250, 300 годин нальоту задля оцінки їх якості та прогнозування працездатності. Синтетична олива Mobil Jet Oil 254 досліджувалася у реальних умовах експлуатації гелікоптера «Airbus Helicopters H-145» з двигунами MBV-BK117, а мінеральна олива МК-8п, що використовується у системах змащування військових гелікоптерів Мі-6 (двигун Д-25В, турбокомпресорна частина), а також входить до складу сумішей олив для редуктора за стендових умов випробування.

Динаміка зміни основних фізико-хімічних та експлуатаційних показників якості олив проводилася за такими показниками:

- масову частку води в авіаційних оливах досліджували за стандартною методикою відповідно до ГОСТ 2477;

- густину авіаційних олив визначали за допомогою ареометра згідно зі стандартною методикою за ГОСТ 3900, ДСТУ ГОСТ 31072, ASTM D 4052, EN ISO 3675;

- кінематичну в'язкість авіаційних олив за температур 40 °С, -40 °С, 100 °С визначали візкозиметричним методом відповідно до стандартної методики за ДСТУ ГОСТ 33, ISO 3104, ASTM D445;

- кислотне число авіаційних олив визначали за методикою ASTM D2896;

- трибологічні властивості авіаційних олив за методикою ASTM D2783, ГОСТ 9490;

- колір авіаційних олив визначали на колориметрі ЦНТ згідно зі стандартною методикою за ГОСТ 20284, ISO 2049, ASTM D1500;

- вміст механічних домішок в авіаційних оливах визначали згідно зі стандартною методикою за ГОСТ 6370;
- температура спалаху авіаційних олив у відкритому тиглі визначали згідно зі стандартною методикою за ГОСТ 4333, ISO 2592, ASTM D 92;
- температуру застигання авіаційних олив визначали згідно зі стандартною методикою за ГОСТ 20287, ISO 3016, ASTM D10.

Основні фізико-хімічні показники якості олив, відповідно до паспортів їх якості, наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

### Фізико-хімічні показники якості олив

Фізико-хімічні показники олив	Метод визначення	МК-8п	Jet Oil 254
В'язкість кінематична за температури 100 °С ( 50 °С для МК-8п), сСт, не менше	ASTM D445	2.6 (8.0)	5.3
В'язкість кінематична за температури 40 °С, сСт, не більше	ASTM D445	16.0	26.4
В'язкість кінематична за температури - 40 °С, сСт, не більше	ASTM D445	6500	11500
Лужне число, мг КОН/г, не менше	ASTM D2896	0.04	0.08
Температура спалаху, °С, не менше	ASTM D92	140	254
Температура застигання, °С, не більше	ASTM D5950	-55	-62
Густина, кг/м <sup>3</sup> , за 20 °С не менше	ASTM D1429	885	1004.4

Відбір проб оливи Mobil Jet Oil 254 ми проводили відповідно до вимог технічного обслуговування гелікоптера Н-145 спеціальними пробовідбірниками після 50, 100, 150, 200, 250, 300 годин нальоту. У цих же пробовідбірниках проби зберігаються до проведення випробувань.

#### **4.1. Динаміка зміни вмісту води в авіаційних оливах залежно від напрацювання**

Причиною розчинності води у вуглеводневих рідинах є їхня гігроскопічність, тобто здатність поглинати атмосферну вологу. Оскільки вуглеводні та вода не мають хімічного споріднення між собою, розчинність її у ПММ обмежена.

Гігроскопічність виявляється у двох формах: зворотній та незворотній. У разі незворотній розчинності волога, що поглинається рідиною під час зміни зовнішніх умов (температури, тиску, вологості повітря), не виділяється у вигляді самостійної рідкої фази, тобто відсутня межа поділу фаз. Такою гігроскопічністю характеризується, наприклад, етиловий спирт, який у міру поглинання вологи розчиняється до більш низької концентрації.

Якщо рідина при зміні зовнішніх чинників виділяє раніше розчинену воду у вигляді самостійної рідкої фази, є межа поділу, то гігроскопічність такої рідини називається зворотною. Подібною властивістю характеризуються палива, масла, мастила.

Вода в оливах може перебувати в трьох станах:

- розчиненому – гігроскопічна вода;
- емульсійному – дрібнодисперсна емульсія, частинки якої розчинені в насиченому вологою паливі;
- відстійна (вільна вода), тобто між водою та паливно-мастильними матеріалами існує межа поділу фаз.

Паливо-мастильні матеріали можуть містити в собі лише певну кількість води в розчиненому стані. Вона дифундує, тобто проникає у міжмолекулярний

простір, під дією зовнішніх сил, зумовлених власним парціальним тиском над паливом. Оскільки парціальний тиск (вологість повітря) постійно змінюється, то і насичення водою ПММ у початковий період відбувається інтенсивно, але рівновага між паливом і газовим середовищем встановлюється тільки через деякий час.

Таким чином, механізм розчинення води в ПММ зумовлений дифузією і заповненням водою міжмолекулярного простору вуглеводнів з наступним установаженням міжмолекулярних зв'язків між молекулами води й молекулами вуглеводнів олив.

Отже, розчинність води в ПММ залежить від їхнього хімічного складу й зовнішніх умов (тиску, температури, вологості, механічних впливів – перемішування, вібрації тощо).

Розчинність води в ароматичних і ненасичених вуглеводнях вища, ніж у парафінових. Нафтові вуглеводні займають проміжне положення між ароматичними й парафіновими. З підвищенням молекулярної маси розчинність води зменшується, що пояснюється збільшенням густини вуглеводнів, унаслідок чого зменшується міжмолекулярний простір, що заповнюється молекулами води.

Молекули води у вуглеводнях асоціюються (взаємодіють) між собою за рахунок сил водневого зв'язку. Кожна молекула води може брати участь в утворенні двох водневих зв'язків, тобто атом кисню стає пов'язаним із чотирма атомами водню.

Найпростіше пояснення утворення водневого зв'язку засноване на полярній природі зв'язку  $O - H$ . У молекулі води електронна хмара зміщена в бік ядра атома кисню з підвищеною електронегативністю і віддалена від ядра атома водню. Унаслідок цього атом водню стає майже позбавлений електрона. Мінімальні розміри протона дають змогу йому підходити близько до інших частинок. Тому між протоном і двома зовнішніми неподіленими парами електронів кисню виникає електростатичне притягання.

Визначальну роль у взаємодії між водою та ароматичними вуглеводнями відіграє  $\pi$ -електронний зв'язок. Аналогічний ефект спостерігається в ненасичених

вуглеводнях, і не випадково вони розчиняють більшу частину води. Підвищена розчинність останньої в ароматичних і ненасичених вуглеводнях зумовлена появою під впливом полярних молекул води орієнтаційно-індукційних сил.

У присутності гетероорганічних сполук розчинність води зростає. Це пов'язано передусім з підвищеною взаємодією між молекулами води та полярними поєднаннями гетероатомів. До цих полярних груп належать:  $-\text{OH}$ ;  $-\text{NO}_2$ ;  $-\text{COOH}$ ;  $-\text{CN}$ ;  $-\text{CNS}$ ;  $-\text{CHO}$ ;  $-\text{SO}_3\text{H}$ .

Кількісно розчинність води у ПММ описується законом Генрі, відповідно до якого концентрація води в розчині за даної температури пропорційна парціальному тиску водяної пари у повітрі:

$$C = H p_v,$$

де  $H$  – коефіцієнт розчинності (константа Генрі);  $p_v$  – парціальний тиск водяної пари.

У реальних умовах, завдяки зворотній гігроскопічності палив і фазовим переходам води, спостерігається відхилення від закону Генрі.

Вологість повітря постійно змінюється, тому і змінюється вміст розчиненої води в паливі. Збільшення вологості повітря призводить до виділення води в емульсійний стан. Вона рівномірно розподілена в нафтопродуктах у вигляді крапель. За подальшого збільшення вологості вода переходить у вільний стан, тобто відстійну воду, коли мікрокраплі укрупнюються.

Найбільший вплив на фазові переходи води має температура. У разі її збільшення волога з надпаливного простору переходить у паливо, розчиняючись у ньому, оскільки збільшується міжмолекулярний простір між вуглеводнями палива. Під час зниження температури відбувається зворотний процес – виділення води з палива (випаровування), тобто зворотна дифузія – це витіснення молекул води з міжмолекулярного простору. Якщо ПММ охолоджується швидко, то розчинена вода за час охолодження не встигає перейти з оливи в повітря, конденсується, утворюючи мікроемульсії та водний відстій.

Розмір крапель води, які утворюються, визначається температурою конденсації: що нижча температура (глибина охолодження), то більше

укрупнюються молекули води за рахунок водневих зв'язків.

За подальшого зниження температури краплі конденсованої вологи будуть перетворюватися в кристали льоду за формою, що нагадує іній. Через малу густину такі кристали залишаються в ПММ у вільному стані. У реальних умовах польоту одночасно знижуються температура й тиск, особливо під час набору висоти. Зниження температури та тиску призводить до пересичення ПММ розчиненою водою.

Таким чином, під час набору повітряним судном висоти польоту частина краплин кристалізується, а частина, що має більшу кінетичну енергію, перебуває в рідкому переохолоджені стані. Такий стан є нестабільним, і під час зіткнення переохолодженої краплі з твердою поверхнею (фільтром, механічними домішками) залишок вільної енергії розсіюється, і частка вміть перетворюється в кристал.

На розчинність води в паливі впливає також барометричний тиск і відносна вологість. Зниження цих параметрів призводить до зменшення вмісту води в паливі.

Візуальним методом, описаним в розділі 3, не встановлено наявності вільної води в цих оливах. Наявність розчиненої води кількісним методом показано на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Кількісне визначення вмісту розчиненої води в оливах

Суть кількісного визначення вмісту води в паливах, маслах і робочих рідинах за ГОСТ 2477 ґрунтується на відгоні води з паливно-мастильних матеріалів при їх перегонці з розчинником.

Залежність динаміки зміни вмісту розчиненої води в оливах Mobil Jet Oil 254 та МК-8п від їх напрацювання наведена на рис. 4.2.

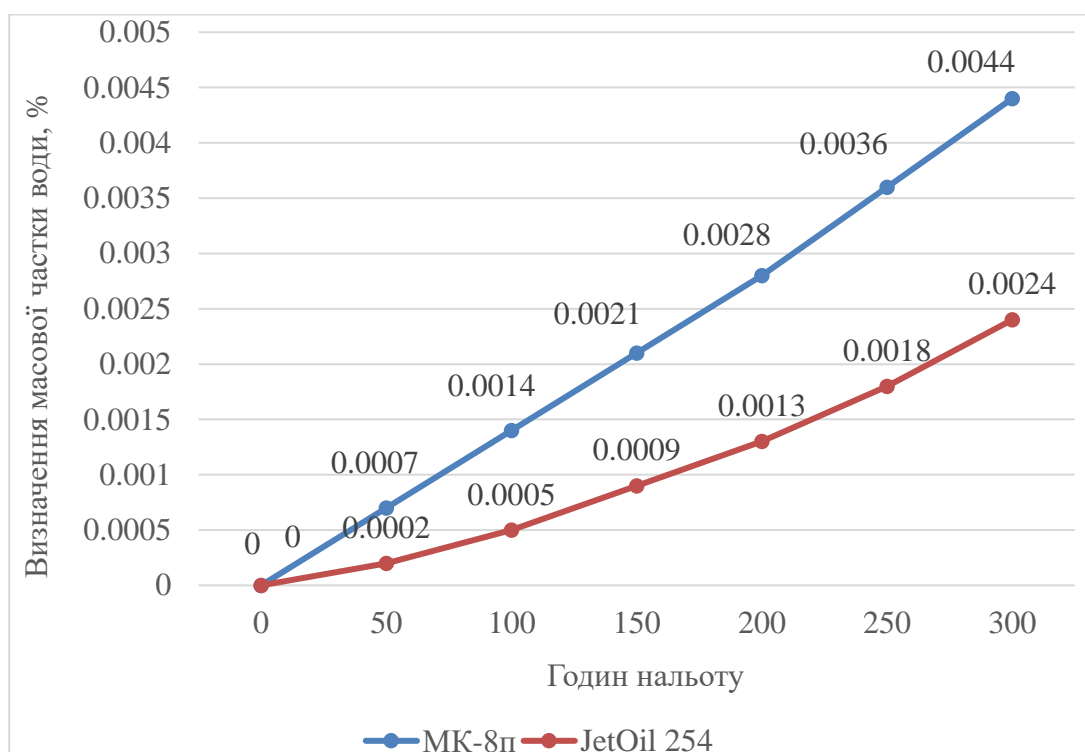


Рис. 4.2. Динаміка зміни вмісту масової частки води в оливах від напрацювання

Встановлено, що вміст масової частки води у мінеральній оливі МК-8п під час напрацювання підвищується до 0,0044 % після 300 годин напрацювання, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil до 0,0024 % за це й же термін її роботи в системі змащування гелікоптера.

Показано, що вміст масової частки розчиненої води, тобто тієї, що знаходиться на молекулярному рівні, в мінеральній оливі майже у двічі перевищує вміст масової частки води у синтетичній. Це обводнення пов'язане із насиченням та поглинанням вологи з атмосфери, наявності в МК-8п полярних вуглеводнів та більшою густиною синтетичної оливи.

За негативних температур розчинена вода переходить у вільну і замерзає, утворюючи кристали льоду, що забивають фільтри та жиклери, через що вони перестають працювати.

Відстійна вода зумовлює прямі пошкодження покриттів і швів баків, корозію металевих поверхонь, що своєю чергою призводить до забруднення ПММ.

Найбільш небезпечною вода є під час експлуатації оливних систем, оскільки робоча поверхня оливи має температуру, як правило, більшу за 100 °С. За такої температури вода закипає, що призводить до спінення оливи та викиду її через дренажну систему в атмосферу.

У паливних і масляних системах на межі поділу фаз розвиваються грибки й мікроорганізми, які призводять до забивання фільтрів.

Існують такі методи боротьби з водою:

- відстоювання та зневоднення ПММ у фільтрах-сепараторах;
- випаровування води з олив за температури 105 °С протягом доби.

На практиці як методи боротьби з наявністю води використовують відстоювання та фільтрування.

#### **4.2. Визначення вмісту масової частки механічних домішок в оливах у процесі експлуатації**

У паспортах якості на оливу Mobil Jet Oil 254 та МК-8п визначення вмісту механічних домішок відповідно до стандартів здійснюється візуальним методом, методика визначення за яким описана в розділі 3. За цим методом визначення вміст механічних домішок нормується як «відсутні». На наш погляд це суб'єктивний метод оцінки, оскільки залежить від досвіду та зору фахівця, що проводить дослідження. Тому визначення вмісту механічних домішок проводили кількісним методом відповідно до ГОСТ 6370, методика проведення випробування за яким описана у вищезгаданому розділі.

У разі виникнення розбіжностей у наявності механічних домішок різного



характеру, арбітражний аналіз проводиться за ГОСТ 10577.

У завдання нашої роботи входило визначення загальної кількості механічних домішок, не вникаючи у природу їх походження.

Суть метода полягає у фільтруванні випробуваних олив з попереднім розчиненням продуктів, що повільно фільтруються в бензині або толуолі, промиванні осаду на фільтрі розчинником з подальшим висушуванням і зважуванням. Результати випробувань наведені на рис.4.3.

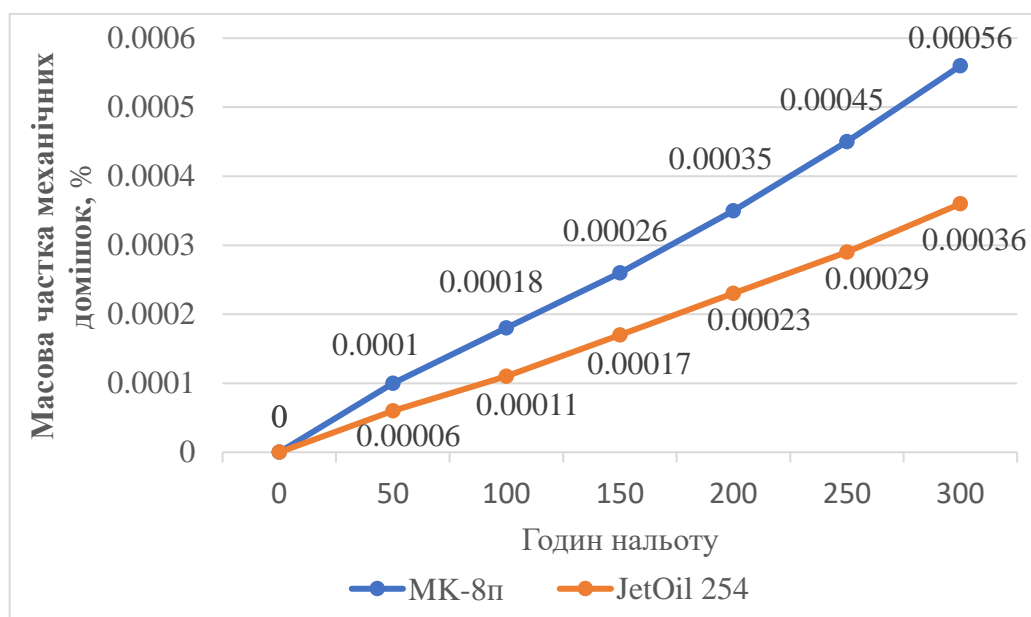


Рис. 4.3 Залежності вмісту масової частки механічних домішок в оливах від напрацювання

Встановлено, що вміст масової частки механічних домішок мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується до 0,00056 % мас. після 300 год нальоту, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 – до 0,00036 % мас. Якщо порівнювати дві оливи, то із зростанням напрацювання вміст масової частки механічних домішок мінеральної оливи більше ніж у півтора рази перевищує вміст масової частки механічних домішок синтетичної оливи, що можливо передбачити більш низькими протизносними та окисними властивостями вуглеводнів цих оливи.

У процесі напрацювання в двигунах механічні домішки можуть потрапляти у нафтопродукти з атмосфери або в результаті окисних процесів сталевих

ємностей, що використовуються для їх зберігання. Як показали у своїх роботах д.т.н., професор Стельмах О. У., Чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор Майстренко А. Л. найбільш впливають на механічні забруднення олив продукти зносу деталей машин і механізмів, які не затримуються фільтрами тонкої очистки. [170-172].

Наявність механічних домішок у нафтопродуктах призводить до забивання фільтрів та системи змащування, абразивного зношування деталей, збільшення заряду статичної електрики.

Основними методами боротьби з механічними домішками в системах змащування є фільтрація та адсорбційне очищення.

#### **4.3. Динаміка зміни густини авіаційних олив Mobil Jet Oil 254 та МК-8п залежно від їх напрацювання**

Густина – це маса речовини в одиниці об'єму. Одиниця вимірювання густини – кілограм на метр кубічний ( $\text{кг/м}^3$ , або  $\text{г/см}^3$ ). Густина ПММ змінюється зі зміною температури, тому для отримання порівняльних результатів густину слід вимірювати за однієї і тієї ж температури. Якщо вимірювання проводяться за іншої температури, то результати необхідно звести до стандартної температури 20 °С. У США та більшості країн Європи відносно густину нафтопродуктів зводять до температури 60 °F (за шкалою Фаренгейта, що відповідає 15,5 °С), тому в паспорті якості на імпортований нафтопродукт вказується температура заміру густини 15 °С.

Густина олив за технічними вимогами повинна перебувати у певних межах. У процесі тривалого зберігання цей показник якості практично не змінюється, тому розбіжність значень під час визначення густини може з'явитись лише за рахунок можливих помилок при її вимірюваннях, у результаті неправильного відбору проб або за випадкового змішування нафтопродуктів.

Густина відіграє важливу роль при обліку нафтопродуктів. Оскільки об'єм будь-якої рідини залежить від температури і за її зростання збільшується, то облік

нафтопродуктів проводять в одиницях маси (кг, т). Для цього і вимірюють густину нафтопродукту та його температуру, щоб знаючи об'єм розрахувати масу. Густина нафтопродукту тісно пов'язана з його в'язкістю, тому безпосередньо впливає на режим тертя та зносу деталей машин та механізмів.

Густина є контрольним показником якості будь-якого ПММ.

Суть метода полягає у вимірюванні густини олив ареометричним методом відповідно до ДСТУ ГОСТ 31072, ASTM D 4052, EN ISO 3675, ГОСТ 3900 та приведення до відповідної стандартної температури (рис. 4.4).



Рис.4.4. Ареометричний метод визначення густини олив

На рис.4.5. наведені залежності динаміки зміни густини олив від їх напрацювання у двигуні гелікоптера.

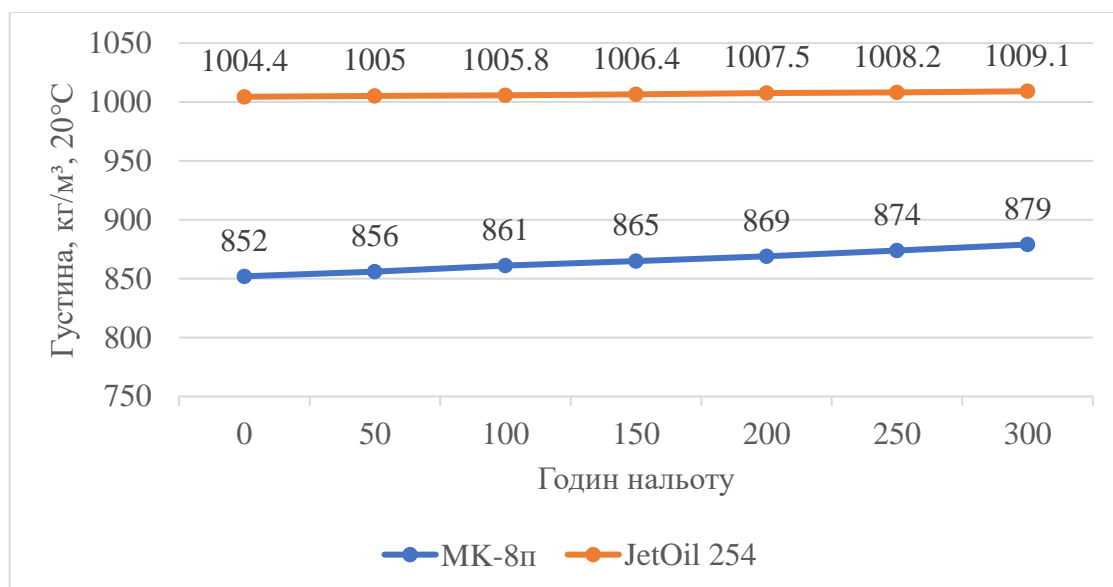


Рис. 4.5. Залежність густини олив від напрацювання

Встановлено, що густина мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується з 852 кг/м³ до 879 кг/м³, після 300 год роботи у системі змащування, тобто на 3,4 % об., а синтетичної оливи з 1004,4 кг/м³ до 1009,1 кг/м³, тобто на 0,5 % об. Різниця між зміною густин двох олив становить майже 7 раз.

Густина в оливах зростає за рахунок окисних процесів, утворення і нагромадження асфальто-смолистих речови, випаровування частини легких компонентів, а також від фракційного складу базових олив.

#### **4.4. Динаміка зміни кінематичної в'язкості та загального лужного числа авіаційних олив Mobil Jet Oil 254 та МК-8п залежно від їх напрацювання**

Під час експлуатації змащувальні матеріали взаємодіють з механізмами обладнання авіаційної техніки і, як наслідок такої взаємодії, вони накопичують інформацію щодо нормальної чи аномальної роботи обладнання, а саме, про термодинамічні, хімічні та фрикційні процеси, що протікають у вузлах і системах змащення. Як показано у роботі [173] у процесі роботи в підшипниках ротора оливи змінюють свої фізико-хімічні показники під впливом зовнішніх факторів –

температури, тиску, кисню повітря, активної дії металів. Це комплексний складний процес, що включає у собі зміну хімічних і фізичних параметрів оливи під час експлуатації.

Аналіз фізико-хімічних параметрів під час експлуатації авіаційної техніки допомагає здійснити раннє виявлення можливих поломок або несправностей та уникнути коштовного ремонту або подальшого пошкодження деталей.

Відсутність контролю якості олив під час експлуатації та визначення граничного стану їх показників, не гарантують обґрунтованості термінів їх заміни відповідно до реальних умов роботи. Тому актуальними є проведення дослідження зміни фізико-хімічних показників якості олив у динаміці під час експлуатації авіаційної техніки. Дотримання цієї норми сприятиме підвищенню ефективності використання олив та зниженню витрат, що підтверджує екологічну та економічну доцільність проведення робіт у цьому напрямку.

Завдяки періодичному контролю динаміки показників якості оливи накопичуються статистичні дані щодо ресурсу її роботи та періодичності заміни в системі змащування підшипників ротора та редуктора гелікоптерів.

Старіння олив під час роботи у двигунах являє собою дуже складний процес. Підвищена температура і кисень повітря, з яким контактує олива, викликають окиснення і окиснювальну полімеризацію її молекул. Такі продукти окиснення вуглеводнів, як смоли, органічні кислоти, присутні в оливі в розчиненому стані, сприяють збільшенню в'язкості і кислотного числа, а асфальтенові сполуки, які є основою для утворення лаків, відкладаються на поверхнях деталей та перешкоджають відводу від них тепла. Продукти глибокої окисної полімеризації, що відкладаються в зонах високої температури і надходять назад в картер, погіршують нормативні показники якості оливи.

Таким чином, в картері працюючого двигуна утворюється складна суміш оливи з найрізноманітнішими продуктами її старіння, від яких повністю очистити оливу фільтрацією не вдається, внаслідок чого в ній накопичується кількість забруднюючих частинок.

Найсучасніші оливи мають забезпечувати працездатність механізмів у широкому діапазоні температур (від - 50-70 до + 300-360 °C). Значне збільшення в'язкості оливи під час охолодження і її зниження під час високих температур, може порушити нормальне функціонування машин і механізмів.

Для запобігання різких змін в'язкості зі зміною температури (підвищення індексу в'язкості) і поліпшення прокачуваності оливи під час низьких температур, вводяться в'язкісні присадки.

В'язкісні (загущувальні) присадки – високомолекулярні полімери, які мають змінну розчинність у маслах за різної температури, завдяки чому вони підвищують в'язкість олив і зменшують зміну в'язкості в разі зміни температури. В'язкісні присадки менше загущають базові оливи за низьких температур ніж за високих. Як в'язкісні присадки використовують різні полімерні і сополімерні продукти: поліізобутен, поліметакрилати, полівінілалкілові етери, сополімери олефінів, стиролдієнові сополімери.

Чим вище молекулярна маса полімеру, тим краще його здатність до загущення, але тим більше схильність до термомеханічного руйнування.

Механізм дії в'язкісних присадок вдосконалено не визначений. Їх здатність запобігати різким змінам в'язкості оливи в широкому діапазоні температур пов'язана зі здатністю макромолекул полімерів змінювати свою конфігурацію залежно від температури, а саме згортатися у сфери під час високих температур і розтягувати довгі лінійні структури під час низьких.

Потрібний рівень експлуатаційних властивостей сучасним моторним оливам надається завдяки використанню для їх виготовлення високоякісних ефективних присадок різної функціональної дії. На ринок найчастіше виставляються композиції присадок – пакети. За своєю експлуатаційною дією присадки умовно поділяють на такі типи:

- антиокисні – покращують антиокисну стійкість оливи, зменшують її витрату і збільшують ресурс роботи;
- антикорозійні – захищають металеві поверхні від корозійної дії кисне- і сірковмісних продуктів та вологи;

- мийно-диспергувальні (детергенти) – сприяють зниженню відкладень продуктів окиснення на металевих поверхнях;
- присадки, які покращують змащувальні властивості олив – протизносні, протизадирні та антифрикційні;
- в'язкісні (загущувальні) – покращують в'язкісно-температурні властивості олив;
- депресорні – знижують температуру застигання олив;
- антипінні – попереджають спінювання олив.

До складу цього пакету присадок входять сполуки частково кислого та лужного характеру, але перевага віддається останнім, тобто рН олив повинно бути 7, або незначно більше.

Неповна нейтралізація кислот призводить до більш кислого середовища оливи в двигуні. У такому середовищі можуть розвиватися корозійні процеси, які негативно впливають на його деталі.

Антиокисна стійкість – найважливіша робоча характеристика моторної оливи, що визначає тривалість її експлуатації. Під дією кисню повітря, високої температури, навантаження та металевого каталізу вуглеводні нафтопродуктів піддаються окисненню, руйнуванню, полімеризації та багатьом іншим хімічним перетворенням.

При цьому утворюються продукти кислого характеру та смоли, які впливають на лужне число оливи. Продукти окиснення важко розчиняються в оливі та сприяють утворенню відкладень і нагару, викликаючи корозію та посилюючи знос деталей.

Антиокисні присадки захищають вуглеводні від окиснення, взаємодіючи з утвореними вільними радикалами ( $R\cdot$ ,  $ROO\cdot$ ) або переводячи гідропероксиди ( $ROOH$ ) в стабільний стан, перериваючи і запобігаючи розвитку ланцюгових реакцій.

Усі ці присадки до олив сприяють резерву лужності. Здатність мийно-диспергуючих, антиокисних, антикорозійних присадок нейтралізувати кислоти залежить від їх кількості та сили. Найбільш поширеним методом оцінки здатності

присадок нейтралізувати кислоти у процесі експлуатації оливи є вимірювання її лужного числа.

Основними критеріями заміни будь-якої оливи, окрім спрацювання пакету присадок, є утворення продуктів окиснення. Нагрів оливи, навіть до їх експлуатаційних температур, за наявності кисню зменшує термоокиснювальну стабільність вуглеводнів і призводить до виникнення твердої фази у вигляді осаду і смол, які, відкладаючись на деталях масляної системи, змінюють її змащувальні характеристики і викликають забруднення фільтрів, знижують ефективності теплообмінних пристроїв.

У науковій літературі в основному приводяться результати досліджень щодо зміни фізико-хімічних властивостей автомобільних оливи, а інформація щодо авіаційних оливи, із-за специфіки їх використання, практично відсутня.

Передчасна заміна оливи не вигідна як з економічної точки зору, так і створює проблеми подальшого її використання та екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є збільшення терміну роботи оливи. Тому метою цієї роботи є обґрунтування можливості збільшення ресурсу моторних оливи шляхом здійснення контролю за їх станом в процесі експлуатації двигуна.

Основними вузлами змащування в турбореактивних авіаційних двигунах є підшипники кочення, на відміну від вузлів змащування поршневих двигунів в яких переважає тертя ковзання. Температура зовнішньої обойми таких підшипників досягає 125-150 °C, яка створюється за рахунок тепла, що надходить від крильчатки турбіни. Після зупинки двигуна, коли зменшується обдув повітрям, тепловий потік, що надходить від крильчатки, розігріває обойму підшипника і оливу, що його змащує і відводить тепло із зони тертя, до температури понад 200 °C.

У турбореактивних двигунах надзвукових літаків різко збільшується температура у вузлах тертя як за рахунок зростання навантаження на підшипники турбіни, так і за рахунок тепла, що надходить від камери згоряння та крильчатки



турбіни. Одночасно з цим підвищується температура оливи. У перспективних надзвукових турбореактивних двигунах температура у вузлах тертя може досягати 400 і навіть 540 °С, а температура оливи до 200 °С. Для роботи за таких температур рідкі мінеральні оливи непридатні, а синтетичні оливи повинні містити протизносні та антиокисні присадки, які виконували б свої функції за таких умов.

Тому дослідження динаміки показників якості авіаційних олив, що працюють за високих температур і значних навантажень є досить актуальними.

Метою роботи є дослідження процесу зміни фізико-хімічних показників олив, а саме, кінематичної в'язкості та лужного числа під час експлуатації гелікоптера Airbus Helicopters H-145.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися завдання проведення аналізу кінематичної в'язкості та лужного числа мінеральної МК-8п та синтетичної Mobil Jet Oil 254 олив у процесі їх роботи в турбореактивних авіаційних двигунах та проаналізувати та оцінити ефективність використання в гелікоптерах мінеральної та синтетичної олив.

Дослідженню підлягали синтетична Mobil Jet Oil 254 та мінеральна МК-8 моторні оливи.

Велика потужність авіаційних редукторів, що передається, у поєднанні з їх невеликими масою й габаритами призводить до посилення умов роботи пар тертя, зростання теплової та динамічної напруженості деталей та вузлів двигуна. Шестерні редукторів працюють за умов високих контактних навантажень. Міцність плівок малов'язкої авіаційної оливи (МК-8), придатної для змащування опор турбореактивних двигунів за даних умов виявляється недостатньою. Для забезпечення надійного змащування шестерень редуктора потрібні оливи з більшою в'язкістю і вищою змащувальною здатністю. На даний момент цим вимогам задовільняє синтетична олива Mobil Jet Oil 254.

Mobil Jet Oil 254 – це надзвичайно високоефективна синтетична олива для газотурбінних двигунів третього покоління, розроблена відповідно до їх вимог та використовується в комерційній і військовій авіації. Цей продукт виготовлений із

спеціально підготовленої базової синтетичної оливи із складним ефіром та збагачений пакетом присадок. Олива має чудову термічну та окиснювальну стабільність із ефективним робочим діапазоном від мінус 40 °С до плюс 230-250 °С.

В'язкість синтетичних олив за температур 250-300 °С вище ніж у рівнов'язких їм за температури 100 °С мінеральних, вони мають кращу термічну стабільність, низьку випаровуваність та малу схильність до високотемпературних відкладень та піноутворення.

У зв'язку з цим термін їх експлуатації в кілька разів перевищує термін експлуатації мінеральних олив.

В'язкість або внутрішнє тертя – властивість рідини створювати опір відносному переміщенню шарів, тобто, це сила внутрішнього тертя між шарами рідини.

Кінематична в'язкість – основна фізико-механічна характеристика нафтових та синтетичних змащувальних олив. Вона характеризує здатність масла здійснювати гідродинамічний режим змащування за робочої температури, тобто здатність забезпечувати заміну сухого тертя рідинним і відтак запобігти швидкому зношуванню матеріалу. Тому для змащувальних олив в'язкість є нормованим показником. Нормується в'язкість олив за різних температур залежно від технічних умов їх виготовлення. Для авіаційних мінеральних олив в'язкість нормується за температури 50 °С ( $v_{50}$ ) та 100 °С ( $v_{100}$ ). Для сучасних імпортованих синтетичних олив для повітряних суден, наприклад, Jet Oil 254 кінематична в'язкість за ASTM D445 нормується за плюсових температур 40 та 100 °С та мінусової температури 40 °С.

Кінематична в'язкість за цих температур визначається за ДСТУ ГОСТ 33-2003, GB/T265-1988, ISO 3104-94, ASTM D445, DIN 51366.

Як описано в розділі 3, що методика визначення полягає у вимірюванні часу витікання визначеного об'єму рідини у секундах під дією сили тяжіння через калібрований скляний капілярний віскозиметр.

Кінематичну в'язкість визначають методом ручного (рис.4.6) або

автоматичного вимірювання за ASTM D445.

Віскозиметр заповнюють досліджуваною оливою. Для цього приєднують гумову грушу до бокового відводу, перевертають віскозиметр і занурюють вузьке коліно в оливу. Закривши широке коліно пальцем, втягують грушею нафтопродукт до мітки  $M_1$ . Після цього віскозиметр перевертають у робоче положення, витирають вузьке коліно від оливи і встановлюють у термостат, нагрітий до потрібної температури. Віскозиметр витримують у термостаті не менше ніж 15 хв за температури досліджу.

Далі за допомогою груші, приєднаної до кінця коліна, оливу перекачують у розширення віскозиметра дещо вище від мітки  $M_1$ . Знявши грушу, спостерігають за протіканням рідини через капіляр. Засікають час опускання меніска рідини від мітки  $M_1$  до  $M_2$ .

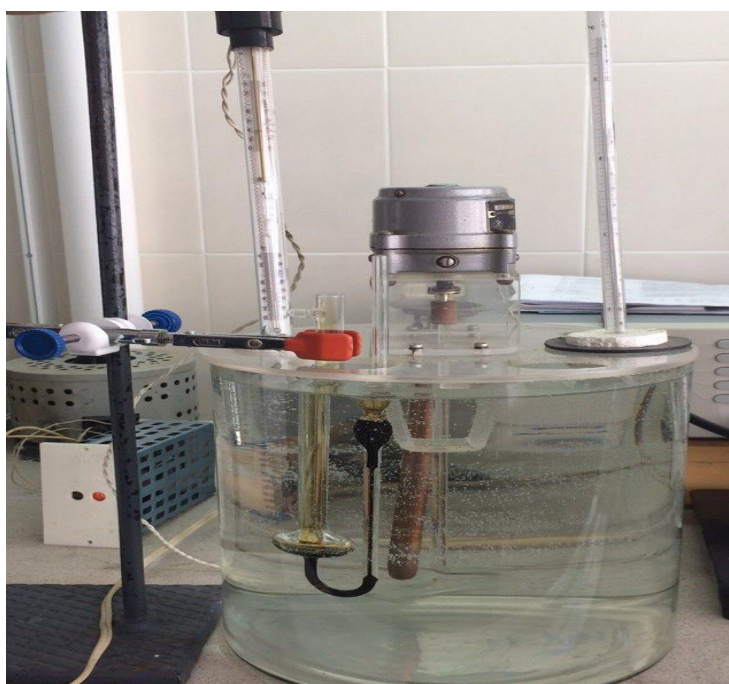


Рис. 4.6. Прилад для визначення в'язкості олив

Принцип автоматичного вимірювання кінематичної в'язкості за методикою ASTM D445 полягає у тому, що зразок поміщають в обраний капілярний віскозиметр, а в подальшому вимірювання і обчислення в'язкості здійснюється

автоматично. Час витікання оливи через капіляр повинен бути не менше 200 с.

Зміна в'язкості олив визначається умовами протікання двох взаємопротилежних процесів: накопичення продуктів окиснення, що викликають збільшення в'язкості оливи та деструкцією (руйнуванням) в'язкісних присадок, що призводить до зниження в'язкості. Зазвичай під час експлуатації змащувальних матеріалів у вузлах машин та механізмів вирішальну роль відіграють окисні процеси.

Нормативні показники якості мінеральної МК-8п та синтетичної Jet Oil 254 олив наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

#### Фізико-хімічні властивості олив

Показники	МК-8п	Jet Oil 254
В'язкість кінематична за температури 100 °С ( 50 °С для МК-8п), сСт, не менше	2.6 (8.0)	5.0
В'язкість кінематична за температури 40 °С, сСт, не більше	16.0	26.4
В'язкість кінематична за температури - 40 °С, сСт, не більше	14000	11500
Лужне число, мг КОН/г, не менше	0.04	0.08

Дослідженню підлягали зразки олив Mobil Jet Oil 254 та МК-8п з різним напрацюванням (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 год) та проводився аналіз відібраних проб на динаміку зміни та відповідність основних показників якості нормативним документам. Зразки оливи Jet Oil 254 відбиралися пробовідбірниками за реальних умов експлуатації гелікоптера Airbus Helicopters H-145, а щодо оливи для турбореактивних двигунів МК-8п, оскільки вона немає допуску до використання на гелікоптерах, проводили стендові випробування.

Результати динаміки кінематичної в'язкості мінеральної МК-8п та

синтетичної Mobil Jet Oil 254 оливи за температур близьких до робочих у вузлах тертя механізмів (40 °C) залежно від напрацювання наведені на рис.4.7.

Встановлено, що кінематична в'язкість оливи МК-8п під час напрацювання за температури 40 °C зростає за рахунок процесів окиснення вуглеводнів, часткового випаровування легких фракцій і утворення високомолекулярних вуглеводневих сполук у процесі деструкції мінеральних оливи з 16 сСт. до 25.6 сСт. після 300 год напрацювання, тобто на 60 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 за рахунок полімеризації за високих температур у присутності кисню – з 26.4 сСт. до 33.2 сСт., тобто на 26 %. Якщо порівнювати дві оливи, то в'язкість мінеральної оливи порівняно із синтетичною збільшилася у 2,3 рази.

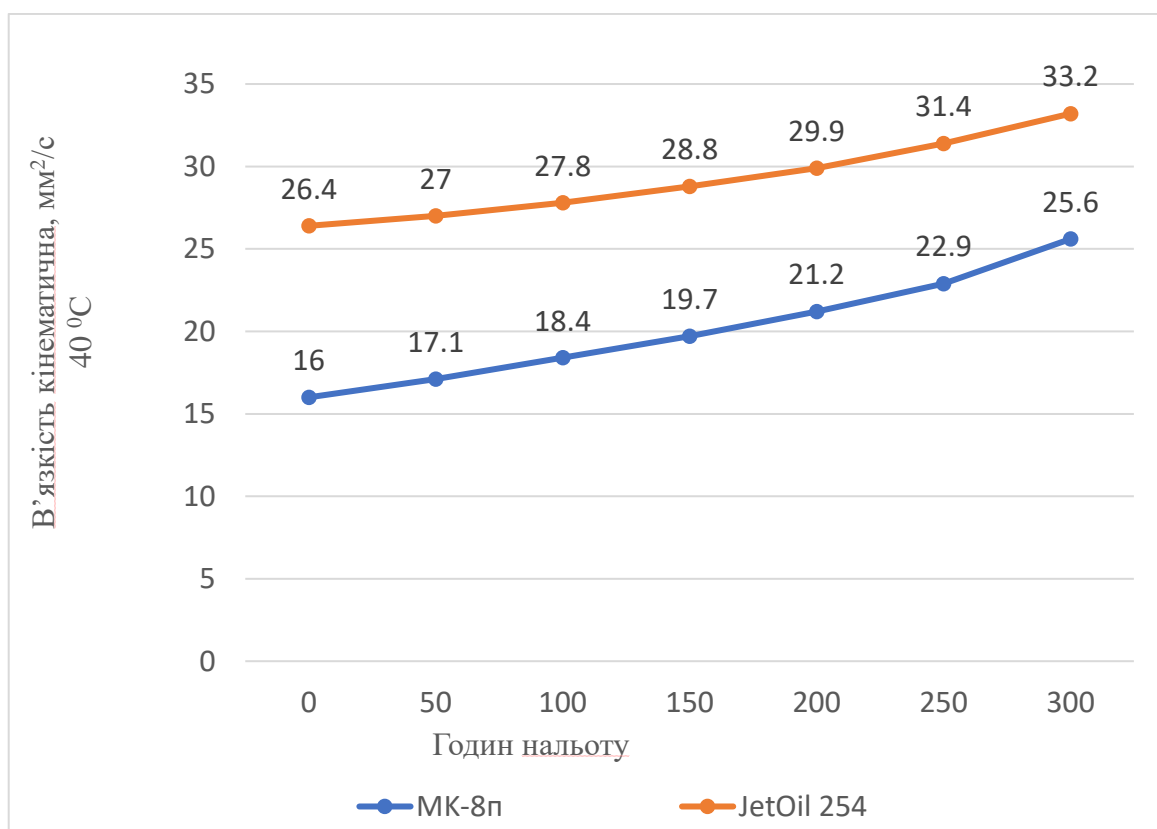


Рис. 4.7. Вплив напрацювання оливи на кінематичну в'язкість за температури вимірювання 40 °C

Результати динаміки кінематичної в'язкості мінеральної МК-8п та

синтетичної Mobil Jet Oil 254 оливи за температур близьких до робочих у вузлах тертя механізмів (100 °C) залежно від напрацювання наведені на рис.4.8.

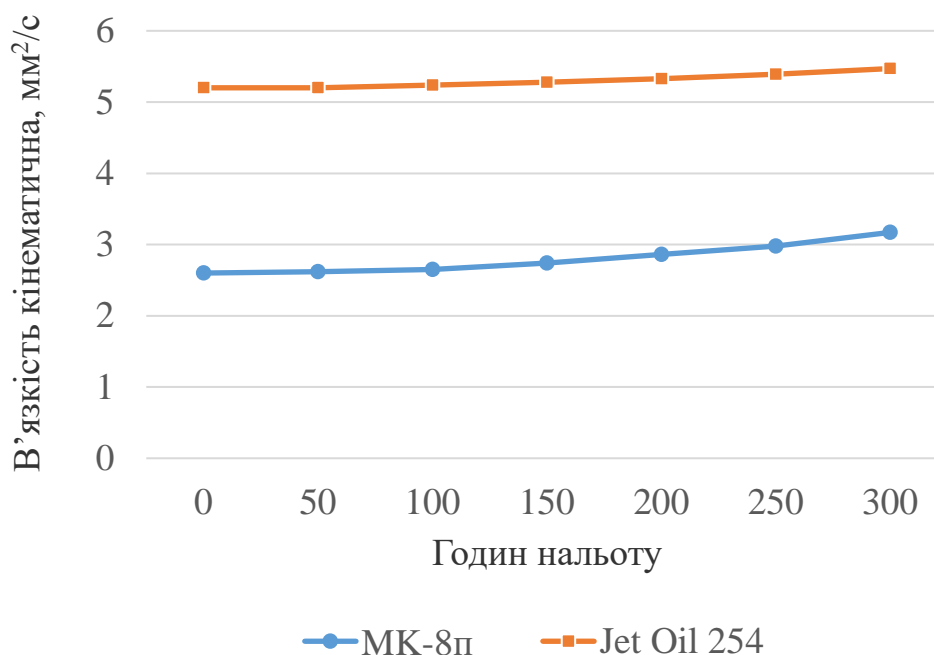


Рис. 4.8. Вплив напрацювання оливи на кінематичну в'язкість за температури 100 °C

Як показали результати випробувань, зміна кінематичної в'язкості синтетичної моторної оливи Jet Oil 254 за 300 год експлуатації в двигуні становить біля 5 %, а мінеральної оливи МК-8п за цей же період роботи в двигуні – понад 18 %. Причому, для мінеральної оливи більш стрімкий приріст кінематичної в'язкості відбувається після 150 год напрацювання, а для синтетичної таких стрибків не спостерігається. Це можливо пояснити тим, що Mobil Jet Oil 254 містить пакет присадок, які діють комплексно, тоді як МК-8п містить одну антиокиснювальну присадку.

Основна причина зростання кінематичної в'язкості, на нашу думку, пов'язана з накопиченням в оливах продуктів окиснення та утворенням високомолекулярних вуглеводневих сполук в процесі їх полімеризації та конденсації.

Слід відмітити, що таке зростання кінематичної в'язкості не є бракувальним показником для обох олив та не є причиною щодо їх заміни.

У стандартах на оливи проводяться випробування в'язкості за різних температур. Вказуються максимально допустимі значення за низьких температур та мінімально допустимі за високих (робочих) температур.

Динаміка кінематичної в'язкості мінеральної МК-8п та синтетичної Mobil Jet Oil 254 олив за низьких температур ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) залежно від напрацювання наведена на рис.4.9.

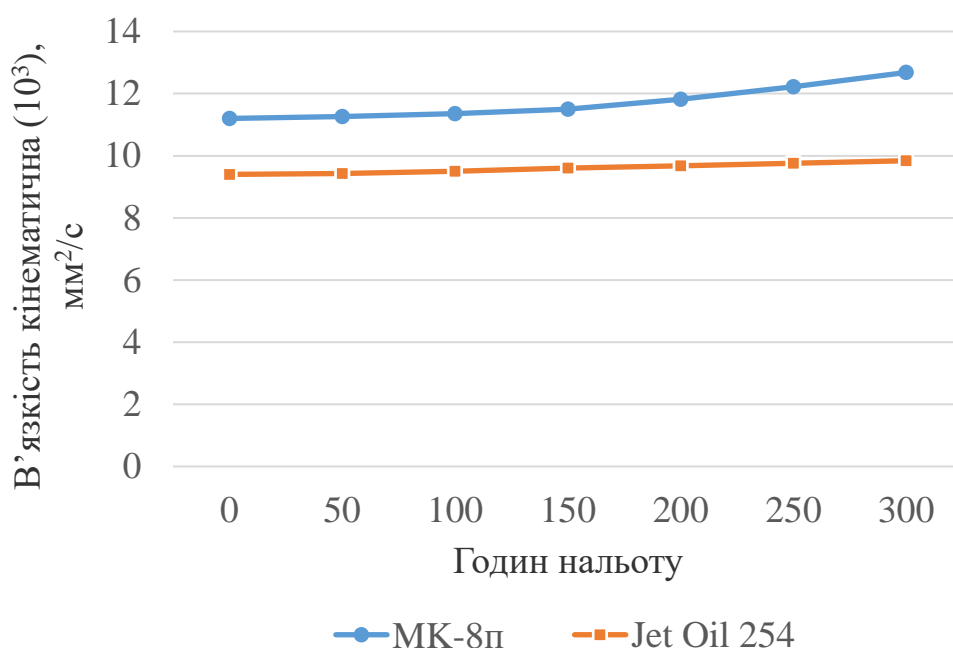


Рис. 4.9. Вплив напрацювання олив на кінематичну в'язкість за температури  $-40^{\circ}\text{C}$

За низьких температур ( $-40^{\circ}\text{C}$ ), кінематична в'язкість синтетичної моторної оливи Mobil Jet Oil 254 менше залежить від зміни температури ніж мінеральної МК-8п, що робить її більш привабливою щодо використання у двигунах та редукторі гелікоптера.

Як показали результати випробувань, кінематична в'язкість синтетичної моторної оливи Jet Oil 254 менше залежить від зміни температури, що робить її більш привабливою щодо використання у двигунах. Це можливо пояснити

наявністю в ній в'язкісних присадок.

Як показали результати випробувань за температури 100 °С, зміна кінематичної в'язкості синтетичної моторної оливи Mobil Jet Oil 254 за 300 год експлуатації в двигуні становить біля 5 %, а мінеральної оливи МК-8п за цей же період роботи в двигуні – понад 18 %. Причому, для мінеральної оливи більш стрімкий приріст кінематичної в'язкості відбувається після 150 год напруження, а для синтетичної таких стрибків не спостерігається.

Закономірності зміни кінематичної в'язкості за низьких температур для синтетичної і мінеральної олив аналогічні, що і за температури 100 °С.

Необхідна в'язкість оливи залежить від типу газотурбінного двигуна. Для турбореактивних двигунів питомі навантаження на підшипники не великі, що дає можливість використовувати малов'язкі оливи. Шестерні редукторів гелікоптерів працюють за більших контактних навантажень. Малов'язкі оливи не утримуються на металевих поверхнях та не витримують високих тисків, видавлюючись із зони контакту, що призводить до збільшення зносу та поломки зубчастих передач. Тому для змащування редукторів гелікоптерів необхідні більш високов'язкі оливи. Однак, застосування таких олив призводить до утруднення запуску двигуна за низьких температур, зменшення швидкості зміни вугла установки лопатей гвинтів. Щоб уникнути цього протиріччя між в'язкістю олив для змащування підшипників двигуна і редукторів установлюють роздільні системи змащування з оливами різної в'язкості, що ускладнює конструкцію і експлуатацію гелікоптерів. У гелікоптерах Airbus Helicopters H-145 застосовується єдина масляна система, що вимагає приділяти більшу увагу показникам якості та хімічному складу оливи.

Мінеральні та синтетичні базові оливи є нейтральними, тобто вони мають значення рН близько 7 за шкалою від 0 (надзвичайно кисле середовище) до 14 (надзвичайно лужне середовище). Проте на значення рН впливають присадки, які додають до базової оливи. Деякі комбінації, такі як протизносні та антикорозійні присадки, мають слабокислу реакцію. Вміст кислотних сполук в оливах також продовжує зростати під час їх роботи в двигуні, наприклад, у результаті



окиснення вуглеводнів.

Однією із найважливіших функцій оливи у двигуні, окрім змащування, є запобігання відкладень на деталях двигуна і підшипниках, тобто здатність до підтримання двигуна у чистоті, а також здатність до нейтралізації кислих продуктів згорання, що можуть потрапити до оливи. Ці властивості оливи забезпечуються мийними та диспергуючими присадками. Мірою мийних і диспергуючих присадок є лужне число (число нейтралізації, TBN, мг KOH/г).

Загальне лужне число визначається методом потенціометричного титрування за національним стандартом України ДСТУ 5094 та міжнародними стандартами ASTM D2896 і ASTM D 4739.

Для визначення лужності проводиться титрування соляною кислотою (HCl). В даний час, для цих цілей частіше використовують метод потенціометричного титрування (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Титратор Titrando 905 для визначення загального лужного числа  
ОЛИВ

Кислотне забруднення може відбуватися з різних джерел, включаючи окиснювальний і термічний процеси. Це може призвести до накопичення побічних продуктів, які збільшують знос деталей та знижують їх трибологічні характеристики.

Найпоширенішим методом оцінки здатності моторної оливи нейтралізувати кислоти є вимірювання загального лужного числа (ЗЛЧ). Загальноприйнятими для вимірювання резервної лужності є два методи: ASTM D2896 і ASTM D4739.

Стандарт ASTM D2896 призначений для моніторингу нових олив, а стандартом ASTM D4739 навпаки, користуються для дослідження лужного числа олив під час експлуатації, щоб контролювати витрату пакету присадок з часом.

Точку еквівалентності та об'єм титранту, який їй відповідає, визначається електронною системою установки та на графіку кривої титрування. Загальне лужне число обчислюється автоматично.

Методика визначення загального лужного числа наведена в розділі 3.

Досліджена зміна загального лужного числа мінеральної МК-8п та синтетичної Mobil Jet Oil 254 олив у процесі їх напрацювання у двигуні гелікоптера. Результати динаміки лужного числа наведені на рис.4.11.

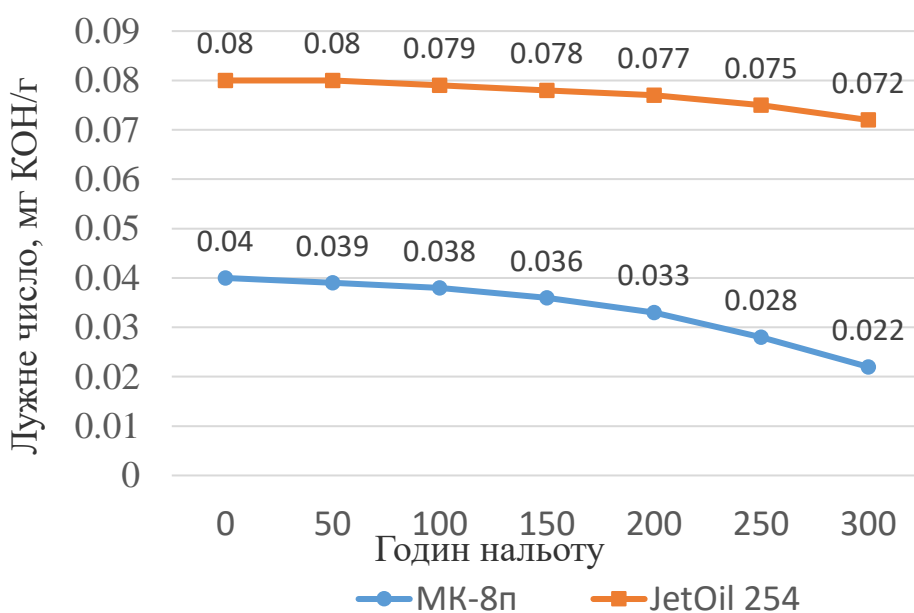


Рис.4.11. Вплив напрацювання олив на загальне лужне число

Як відмічалось, лужне число показує загальну лужність оливи, включаючи ту, яка вноситься миючими і диспергуючими присадками, що мають лужні властивості.

Показано, що із зростанням напрацювання, лужне число мінеральної оливи МК-8п падає більш різко ніж синтетичної Mobil Jet Oil 254, що вказує на відсутність у ній лужних присадок.

При роботі оливи в двигуні лужне число неминуче знижується, нейтралізуючі присадки спрацьовуються. Таке зниження має допустимі відхилення після досягнення яких олива вважається такою, що втратила працездатність. Вважають, що оливу слід замінити при зменшенні її лужності понад 50 % від початкової величини.

Динаміка зміни лужного числа характеризує швидкість спрацьовування присадок в оливах. Для мінеральної оливи темп зниження лужного числа вищий і критичне значення досягається набагато швидше. У синтетичної оливи на момент закінчення випробувань залишається значний запас лужного числа.

Показано, що лужне число мінеральної оливи МК-8п із зростанням напрацювання до 300 год зменшується практично на 50 % та падає більш різко ніж синтетичної Mobil Jet Oil 254, що вказує на спрацювання антиокиснювальної та відсутність у ній лужних присадок.

Кінематична в'язкість та загальне лужне число — це два найважливіших показники якості авіаційних олив, за результатами яких оцінюються протизносні властивості і наявність в оливі необхідних присадок та їх спрацювання. На підставі цього ми маємо інформацію щодо подальшого обслуговування та надійності авіаційного обладнання та формуємо рекомендації щодо заміни оливи. Адже ресурс та надійність роботи двигунів здебільшого залежить від того, в якій мірі авіаційна олива, що застосовується, відповідає експлуатаційним вимогам її використання.

#### 4.5. Визначення кольору олив залежно від їх напрацювання

Інтенсивність забарвлення оливи залежить від присутності в ній темних смолистих речовин і від дисперсності системи. За кольором лише наближено можна судити про ступінь очищення оливи. Висновок про колір оливи роблять порівнюючи його з низкою еталонних світлофільтрів. Оцінювання проводиться за умовним показником – одиниця кольору ЦНТ. У стандартах (ISO 2049, ASTM D1500, ГОСТ 20284) цей показник нормується «не більше» одиниць кольору ЦНТ.

Суть метода полягає у порівнянні кольору досліджуваної оливи з набором кольорових еталонів, які нумеруються від 0,0 (білий) до 8,0 (дуже темний коричневий) через 0,5 одиниці (всього 16 номерів). Колір олив у процесі експлуатації в результаті окиснення вуглеводнів змінюється – олива темнішає. Цей показник умовно характеризує протікання процесу смолоутворення (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

##### Залежність кольору олив від напрацювання

Години нальоту, год	Колір оливи Mobil Jet Oil 254	Колір оливи МК-8п
50	0,5	2,5
100	1,0	3,0
150	1,5	3,5
200	2,0	4,0
250	2,5	4,5
300	3,0	5

Встановлено, що колір олив під час напрацювання набуває більш інтенсивного забарвлення. У мінеральній оливі МК-8п колір змінюється від

жовтого (2,5 одиниць) до коричневого (5 одиниць), а в синтетичній оливі Mobil Jet Oil 254 від світло-жовтого (0,5 одиниць) до світло-коричневого (3,0 одиниць). Зміна кольору відбувається внаслідок окиснення вуглеводнів під час експлуатації (присутність в ній темних смолистих речовин) і від дисперсності системи та властивостей нафти, з якої виготовлено мінеральну оливу.

#### **4.6. Визначення динаміки температури спалаху олив залежно від напрацювання**

Температурою спалаху називається температура, за якої нафтопродукт, що нагрівається у стандартних умовах, виділяє таку кількість пари, яка утворює з навколишнім повітрям горючу суміш, що спалахує під час піднесення до неї полум'я. Вона характеризує пожежо- та вибухонебезпечність ПММ.

Сутність методу полягає у визначенні найнижчої температури, за якої в умовах досліду над поверхнею горючої речовини утворюється суміш пари з повітрям, яка здатна спалахувати від джерела запалювання, але швидкість утворення якої ще недостатня для подальшого горіння. Визначається температура спалаху ПММ у закритому тиглі за ГОСТ 6356 за методикою наведеною у розділі 3. Зразок палива рівномірно нагрівають у закритому тиглі, неперервно перемішуючи, і досліджують на спалах за певних температур.

Нижня температурна межа спалаху – мінімальна температура оливи, за якої її пара спалахує у закритому об'ємі. Верхня температурна межа спалаху – максимальна температура оливи, за якої її суміш з повітрям ще може спалахувати. У разі подальшого підвищення температури суміш збагачується парами і стає негорючою.

Температура, за якої нафтопродукт під час піднесення полум'я спалахує і продовжує горіти протягом деякого часу, називається температурою займання. Якщо нафтопродукт нагріти до високої температури, а потім привести в контакт з повітрям, він може самовільно зайнятися. Найнижча температура, за якої відбувається загоряння нафтопродукту без запалювання, називається температурою

самозаймання.

Температура спалаху оливи майже завжди вказується в списку типових характеристик. Вона пов'язана з фракційним складом оливи і структурою молекул базових компонентів і є важливою з кількох причин. По-перше, це показник пожаробезпечності оливи, тому краще більш високе значення температури спалаху. По-друге, вона показує присутність летких фракцій у оливі, які швидше випаровуються в працюючому двигуні (витрата оливи на випаровування). По-третє, під час аналізу оливи, що працює за зниження температури спалаху, легко визначається розбавлення її іншими вуглеводнями.

Сутність методів полягає в нагріванні проби нафтопродукту у відкритому тиглі із встановленою швидкістю доти, доки не станеться спалах парів (температури спалаху) нафтопродукту над його поверхнею від запального пристрою і поки при подальшому нагріванні не станеться загоряння продукту (температура займання) з тривалістю горіння не менше 5 с.

Прилад для визначення температури спалаху оливи показано на рис. 4.12.



Рис.4.11. Прилад для визначення температури спалаху оливи

Динаміку температури спалаху олив Mobil Jet Oil 254 та МК-8п залежно від напрацювання наведено на рис. 4.13.

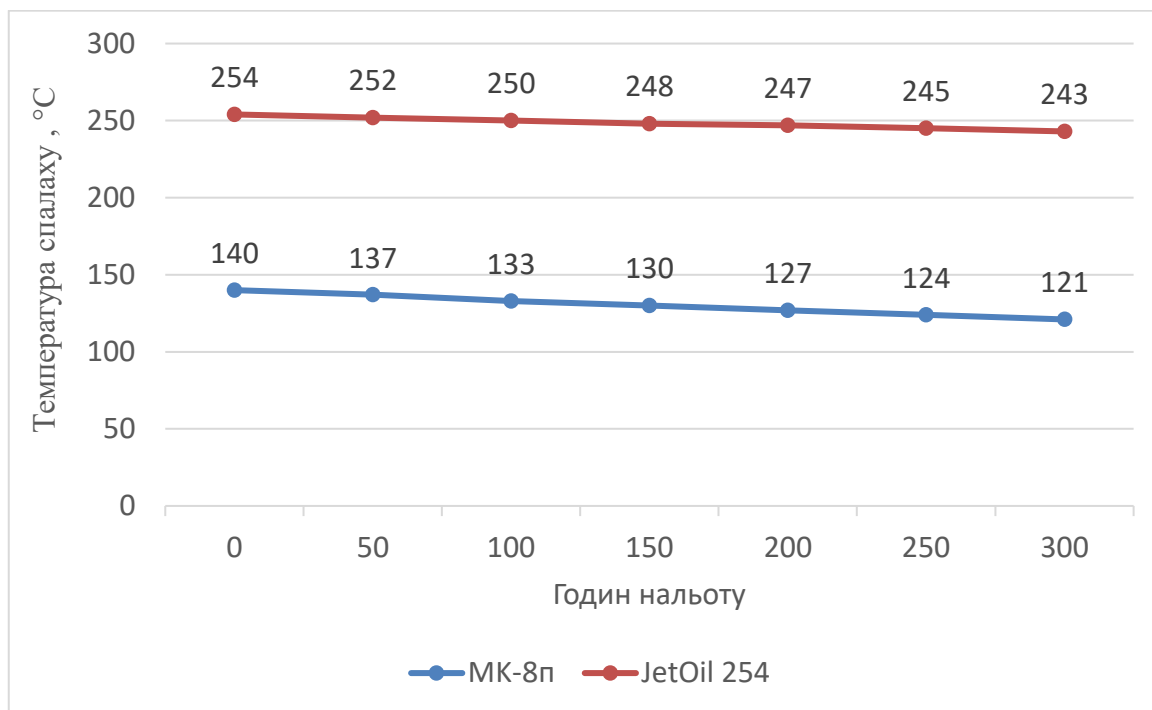


Рис. 4.13. Вплив напрацювання олив на температуру спалаху

Встановлено, що температура спалаху мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання знижується із 140 °C до 121 °C після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 14 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil - з 254 °C до 243 °C, тобто на 9,6 %. Якщо порівнювати дві оливи, то із зростанням напрацювання температура спалаху мінеральної оливи знижується більш різко ніж синтетичної, різниця більша ніж у 1,5 рази, що можливо пояснити більш інтенсивним випаровуванням легких фракцій.

#### 4.7. Динаміка зміни температури застигання олив у процесі їх експлуатації

Температурою застигання називається температура, за якої паливно-мастильний матеріал втрачає свою рухливість.

Від температури застигання палива здебільшого залежить можливість пуску холодного двигуна. Для надійної роботи системи живлення найнижча температура навколишнього середовища повинна бути на 10–12 °С вище температури застигання.

Температура застигання або температура втрати текучості – це найнижча температура, за якої олива ще може текти. За зарубіжними стандартами, температурою застигання називається температура, яка на 3 °С вище дійсної температури затвердіння, за якої протягом 5 с олива перебуває в нерухомому стані (стандарти ISO 3016, ASTM D 97, ГОСТ 20287). Прилад для визначення цього показника показано на рис. 4.14.



Рис.4.14. Прилад для визначення температури застигання олив

Температура застигання вказує тільки на можливість запуску холодного двигуна. Вона повинна бути нижче тієї температури, за якої визначають прокачуваність згідно з класифікацією SAE J 300.

Мінеральна олива – це багатокомпонентна система, застигання якої є складним багатостадійним процесом, залежним від взаємодії окремих компонентів, їх взаємного розчинення тощо. В мінеральній оліві у разі зниження



температури в першу чергу зароджуються і ростуть кристали парафінових вуглеводнів. З появою дрібних кристалів олива мутніють і ця температура називається температурою помутніння. Надалі кристали парафіну ростуть, з'єднуються, злипаються і, як наслідок, утворюють кристалічний каркас, олива стає нерухомою, желеподібною.

Таким чином, температура застигання фактично є температурою желеутворення. Між кристалічним каркасом оливи ще залишається рідким і при струшуванні або перемішуванні текучість усієї маси масла може частково відновитися. Такий процес затвердіння, як специфічний процес кристалізації, залежить від швидкості охолодження оливи, низькотемпературного режиму, інтенсивності та тривалості примусового течіння, в інтервалі часу до вимірювання температури застигання. Тому під час визначення цієї температури потрібно суворо дотримуватися запропонованої процедури охолодження і витримки рідини.

Під час запуску холодного двигуна моторна олива в перший же момент своєї роботи має надходити в найвужчі і віддалені місця тертя. Тому температура застигання повинна бути нижчою за мінімально передбачувану температуру навколишнього середовища.

Суть метода полягає у охолодженні оливи із заданою швидкістю до температури, за якої зразок залишається нерухомим. Зазначену температуру приймають за температуру застигання.

Залежність впливу напрацювання оливи на їх температуру застигання наведено на рис. 4.15.

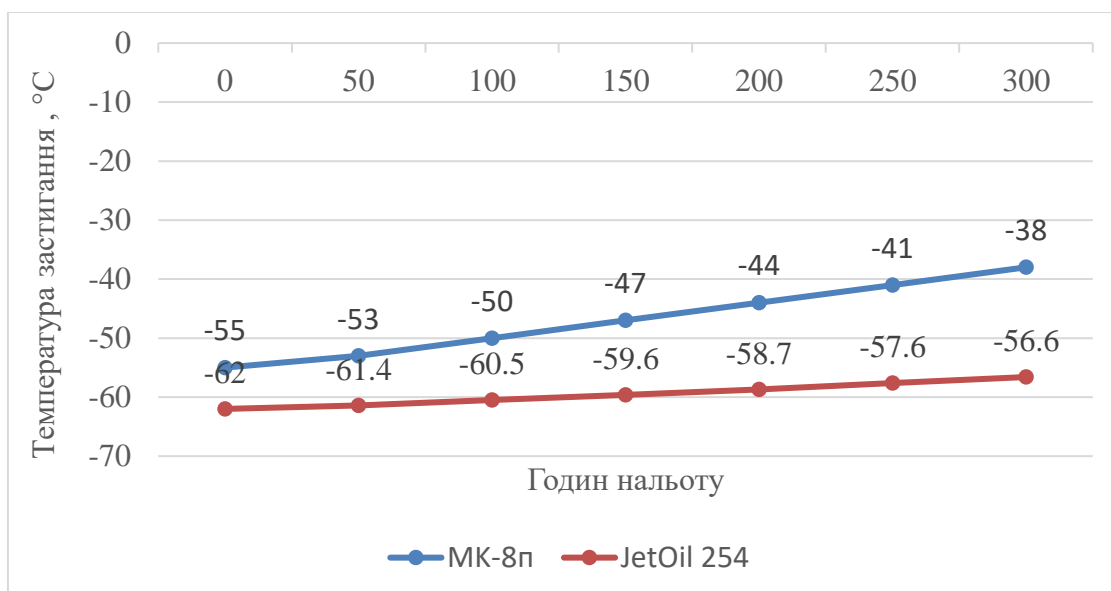


Рис. 4.15. Вплив напрацювання оливи на температуру застигання

Встановлено, що температура застигання мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується з - 55 °С до -38 °С після 300 год нальоту, тобто на 31 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil з -62 °С до -56,6 °С, тобто на 8,8 %. Якщо порівнювати дві оливи, то із зростанням напрацювання температура застигання мінеральної оливи підвищується більш інтенсивно ніж синтетичної, різниця складає 3,5 рази. Це пов'язано із утворенням високомолекулярних сполук (смолисто- асфальтенових речовин).

#### 4.8. Визначення трибологічних характеристик сучасних авіаційних олив

Важливе місце у підвищенні надійності роботи техніки та збільшення термінів її експлуатації займають питання зносостійкості деталей. Протягом експлуатації відбувається інтенсивний знос вузлів тертя у результаті значних навантажень, швидкостей та температур, впливу агресивних середовищ та вібрацій.

Одним з найбільш економічно вигідних шляхів збільшення довговічності вузлів тертя в різних машинах і механізмах є підвищення якості мастильних матеріалів, у першу чергу, їх змащувальних властивостей, що досягається в

основному шляхом введення в них протизносних, протизадирних і антифрикційних присадок.

Введення присадок в оливи та мастила дозволяє задовольнити дві основні вимоги техніки: підвищення терміну роботи (надійності) машин і механізмів; збереження енергії палива, тому що близько 30% енергії, що виробляється в промислових країнах світу, в кінцевому рахунку витрачається на тертя.

В останні роки одним з найбільш розвиваючим напрямом науки є вивчення фулеренів та можливостей їх застосування в якості присадок до змащувальних матеріалів. Це пов'язано з тим, що ці сполуки являють собою унікальні об'єкти з точки зору електронної будови, фізичних та хімічних властивостей. Надзвичайною особливістю також є те, що це єдина розчинна форма карбону у вуглеводневих сполуках, що дозволяє використовувати її у різноманітних напрямках. Проведення експериментальних досліджень по можливості застосування фулеренів та фулереновмісної сажі в якості протизносних присадок є досить актуальним напрямом наукової роботи [174-175].

Визначення протизносних властивостей олив проводили за методикою викладеною у розділі 3.

Для покращання експлуатаційних властивостей паливно-мастильних матеріалів – термоокисної стабільності вуглеводнів, протизносних характеристик, застосовують антиокисні присадки фенольного характеру – «іонол», протизносні – «Hatec-580», але при підвищених температурах вони швидко окиснюються. Тому, основною задачею даної роботи є проведення досліджень по можливості впровадження нових, перспективних комплексних присадок до паливно-мастильних матеріалів на основі нанорозмірних вуглецевих матеріалів (фулеренів), які більш стійкі до процесу окиснення та дослідження під їх впливом зміни протизносних властивостей змащувальних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначення трибологічних показників синтетичних олив Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 для турбореактивних авіаційних двигунів без та з вмістом фулерену  $C_{60}$  на стандартизованій чотирьохкульковій машині тертя;

- вивчення доцільності використання фулеренових присадок у авіаційних синтетичних оливах.

Протиріччя у вимогах до якості мінеральних олив, що повинні поєднувати високу змащувальну здатність із задовільними в'язкісно-температурними характеристиками для забезпечення надійного запуску двигуна за низьких температур, призвели до необхідності використання для змащування редукторів гвинта гелікоптерів та турбогвинтових двигунів суміші з малов'язких мінеральних та високов'язких олив. Причому співвідношення вказаних олив у сумішах є різним для різних типів двигунів.

Альтернативою вирішення цього протиріччя є використання в двигуні та редукторній системі гелікоптерів H-145 Airbus Helicopters синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254.

Протизносні властивості досліджували на чотирьохкульковій машині тертя відповідно до ASTM D2783 за параметрами діаметр плями зносу ( $d$ ) та критичного навантаження ( $P_k$ ). Останній показник характеризує максимальну величину навантаження, за якого ще не виникає металевого контакту (задирів) при терті стандартизованих металевих кульок.

Суть метода полягає у визначенні протизносних та протизадирних характеристик олив під час тертя кулькових підшипників у змащувальних середовищах.

При визначенні показника граничного зносу ( $d$ ) тривалість випробування від моменту вмикання до моменту вимикання двигуна становить  $60 \pm 0.5$  хв, за стандартного навантаження 20 кгс (196 Н) та кімнатної температури. Взагалі, для кожного змащувального матеріалу вказуються умови випробовування в нормативно-технічній документації. В даному випадку вибрані однакові умови випробовування для мінеральної і синтетичної олив для зручності порівняння їх властивостей.

За показник зносу ( $d$ ) у міліметрах приймають середнє арифметичне значення діаметрів плям зносу нижніх кульок двох паралельних випробувань при сталому навантаженні.

Заміри діаметрів плями зносу проводяться під мікроскопом у двох взаємно перпендикулярних напрямках з точністю до 0.01 мм (рис. 4.16).

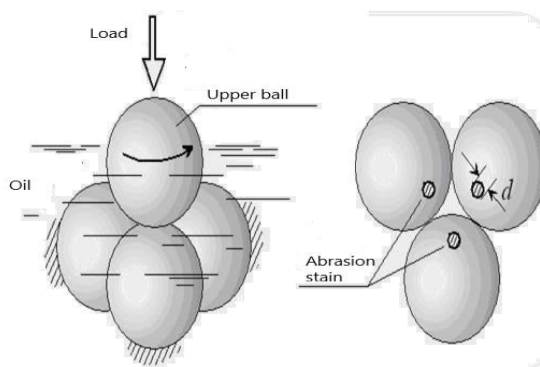


Рис. 4.16. Вузол тертя

Мета роботи полягала у вивченні можливостей використання та впровадження нових, перспективних комплексних присадок до паливно-мастильних матеріалів які будуть працювали більш тривалий термін, ніж традиційні присадки.

Залежність діаметра плями зносу від концентрації фулеренової присадки в мінеральній МК-8п та синтетичній Mobil Jet Oil 254 авіаційних оливах наведена на рис. 4.17.

Як показали результати досліджень, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу спостерігається. Слід також відмітити, що більш інтенсивно зменшення зносу спостерігається в мінеральній оливі, ніж у синтетичній. Природа такої дії фуллереновмісних присадок поки не зовсім з'ясована.

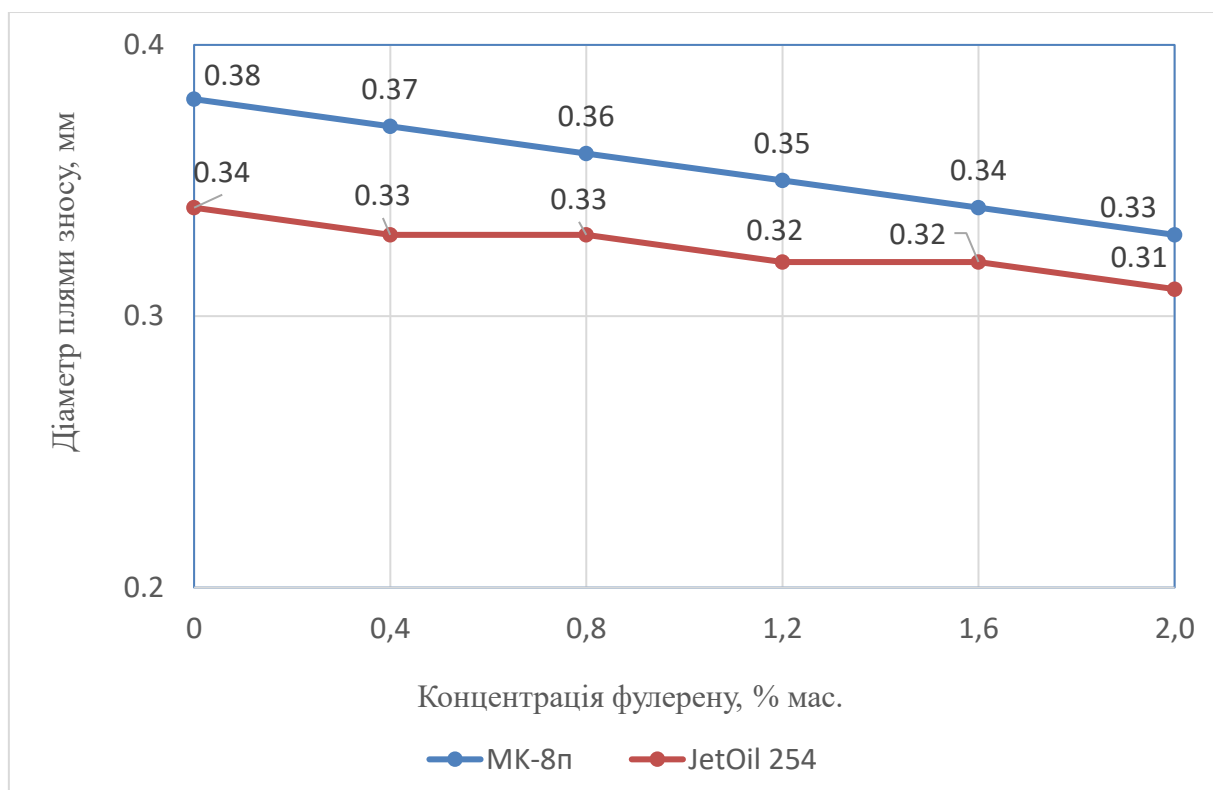


Рис. 4.17. Залежність показника зносу від вмісту фулерену  $C_{60}$  в оливах

Критичним навантаженням ( $P_k$ , кгс) вважають навантаження, при якому середній діаметр плям зносу нижніх кульок знаходиться у межах значень величини граничного зносу для даного навантаження, що наводиться у таблиці ASTM D2783, збільшення якого на величину наступного навантаження за рядом навантажень викликає збільшення середнього діаметра плям зносу на величину, понад 0,1 мм.

За результат випробування приймають меншу величину критичного навантаження з двох отриманих величин (табл. 4.3 та табл.4.4).

Критичне навантаження характеризує початок руйнування змащувальної плівки та перехід від нормального виду тертя до аномального, яке характеризується великими зносами деталей.

Таблиця 4.3

**Визначення критичного навантаження ( $P_k$ ) для оливи МК-8**

Навантаження, кгс	Навантаження, Н	Середній діаметр плям зносу нижніх кульок, мм	Критичне навантаження, кгс
20	196	0.38	-
40	392	0.46	-
60	588	0.49	-
80	784	0.53	-
100	980	0.57	-
120	1176	0.61	-
160	1568	0.65	-
200	1960	0.82	( $P_k$ ) 200

Таблиця 4.4

**Визначення критичного навантаження ( $P_k$ ) для оливи Mobil Jet Oil 254**

Навантаження, кгс	Навантаження, Н	Середній діаметр плям зносу нижніх кульок, мм	Критичне навантаження, кгс
20	196	0.36	-
40	392	0.41	-
60	588	0.45	-
80	784	0.51	-
100	980	0.54	-
120	1176	0.59	-
160	1568	0.61	-
200	1960	0.65	-
240	2352	0.68	-
280	2744	0.71	-
320	3136	0.89	$P_k$ (320)
360	3528	0.96	+

Із вищевикладених таблиць видно, що критичне навантаження для мінеральної оливи МК-8 за однакових умов випробування становить 1960 Н, тоді як для синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 критичне навантаження становить 3136

Н. Це можна пояснити тим, що синтетична олива містить пакет присадок, які значно покращують її протизносні властивості, тоді як мінеральна олива містить лише одну антиокисну присадку.

Залежність критичного навантаження від вмісту фулеренової присадки в оливах наведена на рис.4.18.

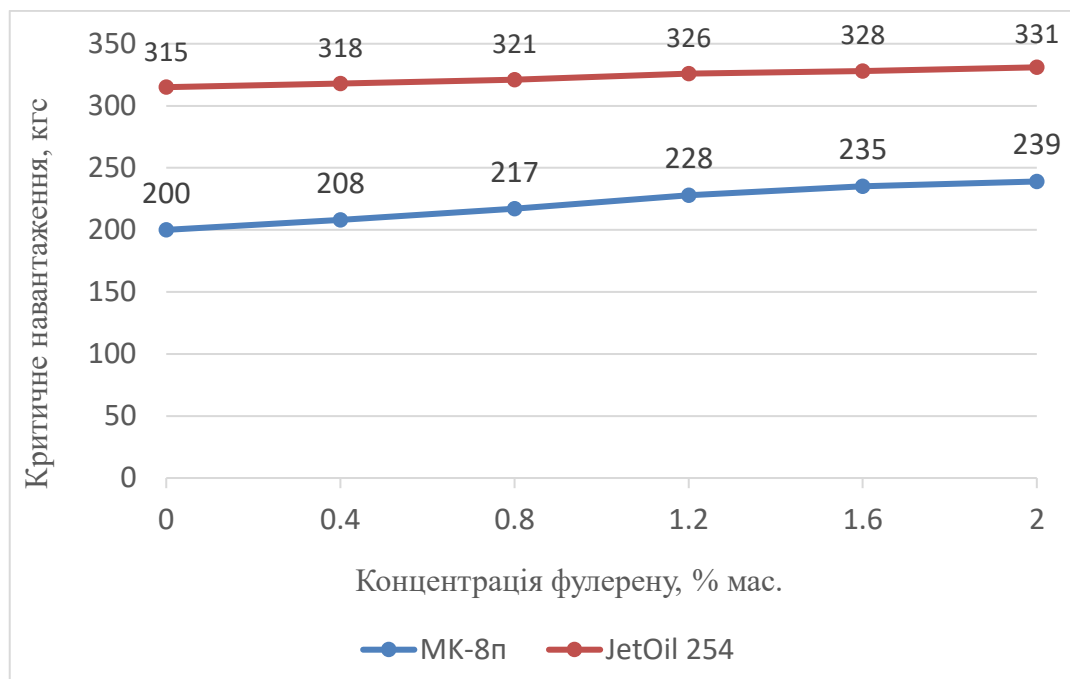


Рис.4.18. Залежність критичного навантаження від вмісту фулерену в оливах

Як показали результати досліджень, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень, як для мінеральної, так і для синтетичної оливи. Слід також відмітити, що інтенсивність цього зростання в мінеральній оливі спостерігається в більшій мірі, ніж у синтетичній оливі, можливо за рахунок дії пакету присадок.

За сукупністю отриманих результатів можна передбачити та спрогнозувати механізм антифрикційної і протизносної дії фулеренів наступним чином. У процесі трибополімеризації мінеральної оливи на тертьових поверхнях утворюється покриття у вигляді просторової трибополімерної сітки, зв'язаної з підкладкою хімічними зв'язками. Це покриття захищає поверхні, що труться від безпосереднього контакту, і в той же час, будучи просторовою полімерною



сіткою, утримує мінеральну оливу, забезпечуючи таким чином і малозносний режим тертя, і малий коефіцієнт тертя. Цей процес може відбуватися і без присутності  $C_{60}$ . Однак без фулерену для формування трибометалополімерного покриття потрібні, мабуть, більше часу і більш специфічні умови. Присутність фулерену завдяки його великій реакційній спроможності різко прискорює процес трибополімеризації і призводить до утворення трибополімерної сітки, у вузлах якої знаходяться переважно молекули  $C_{60}$ . Це принципово змінює картину тертя, так як трибополімерне захисне покриття в цьому випадку реалізується значно швидше і малозносний і антифрикційний режим тертя встигає реалізуватися до руйнування захисної плівки. Нарешті, якщо в процесі тертя трибополімерне покриття порушується (наприклад, під дією збільшення навантаження) і виникає безпосередній контакт тертьових тіл, процес трибополімеризації збільшується і трибоплівка відновлюється.

Тому трибоконтакт є досить потужним реактором для різного роду структурних перетворень і можна очікувати появи в зоні тертя тих модифікацій фулерену, які володіють підвищеною твердістю і можуть визначати властивості поверхневих плівок, що утворюються в процесі трибозносу.

Показано, що протизносні властивості – діаметр плями зносу ( $d$ ), визначений на чотирьохкульковій машині тертя, синтетичної Mobil Jet Oil 254 оливи для турбореактивних авіаційних двигунів перевищують понад 10 % мінеральну оливу МК-8п, що пояснюється якістю та наявністю в синтетичній оливі пакету комплексних присадок.

Як показали результати досліджень, що збільшення концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу спостерігається. Слід також відмітити, що більш інтенсивно зменшення зносу спостерігається в мінеральній оливі, ніж у синтетичній.

Встановлено, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень як для мінеральної, так і для синтетичної оливи. Інтенсивність цього зростання в

мінеральній оливі спостерігається в більшій мірі, ніж у синтетичній оливі, можливо за рахунок дії пакету присадок.

Науковий прогрес в цьому напрямку визначається в основному експериментальними дослідженнями, проведення яких є досить актуальними.

#### **Висновки до розділу 4**

За результатами проведених досліджень встановлено, що забруднення олив механічними домішками, продуктами зносу та водою відбувається у процесі їх експлуатації у вузлах змащування гелікоптерів. Вміст масової частки води у мінеральній оливі МК-8п під час напрацювання підвищується до 0,0044 % мас. після 300 годин напрацювання, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil до 0,0024 % мас. за це й же термін її роботи в системі змащування гелікоптера.

Показано, що вміст масової частки розчиненої води в мінеральній оливі майже у двічі перевищує вміст масової частки води у синтетичній. Це обводнення пов'язане із насиченням та поглинанням вологи з атмосфери, наявності в МК-8п полярних вуглеводнів та більшою густиною синтетичної оливи.

Встановлено, що вміст масової частки механічних домішок мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується до 0,00056 % після 300 год нальоту гелікоптера, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 до 0,00036 %, тобто понад 1,5 рази.

Встановлено, що кінематична в'язкість оливи МК-8п під час напрацювання за температури 40 °С зростає з 16 сСт до 25.6 сСт після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 60 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 за рахунок полімеризації за високих температур у присутності кисню - з 26.4 сСт до 33.2 сСт, тобто на 26 %. Якщо порівнювати дві оливи, то в'язкість мінеральної оливи порівняно із синтетичною збільшилася у 2,3 рази. Кінематична в'язкість оливи МК-8п під час напрацювання за температури -40 °С зростає з 6500 сСт до 10800 сСт після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 61,5 %, а синтетичної оливи Mobil

Jet Oil 254 - з 11500 сСт. до 13800 сСт., тобто на 20 %, тобто в'язкість мінеральної оливи порівняно із синтетичною збільшилася у 3 рази. Кінематична в'язкість оливи МК-8п під час напрацювання за температури 100 °С зростає з 2,6 сСт до 4,38 сСт після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 68 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 - з 5,3 сСт до 6,64 сСт, що становить 25,2 %, тобто в'язкість мінеральної оливи порівняно із синтетичною збільшилася у 2,7 рази.

Показано, що загальне лужне число (ЗЛЧ) оливи МК-8-п під час напрацювання після 300 годин нальоту знижується з 0,04 мг КОН/г до 0,022 мг КОН/г., тобто на 45 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 знижується з 0,08 мг КОН/г до 0,072 мг КОН/г, що становить 10 %, тобто ЗЛЧ мінеральної оливи порівняно із синтетичною зменшилося у 4,5 рази.

Встановлено, що температура спалаху мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання знижується із 140 °С до 121 °С після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 14 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil - з 254 °С до 243 °С, що становить 9,6 %, тобто температура спалаху мінеральної оливи зменшується у 1,5 рази ніж синтетичної.

Визначено, що температура застигання мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується з - 55 °С до -38 °С після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 31 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil з -62 °С до -56,6 °С, тобто на 8,8 %, що становить понад 3,5 рази.

Встановлено, що густина мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується з 852 кг/м<sup>3</sup> до 879 кг/м<sup>3</sup> після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 3,4 %, а синтетичної оливи з 1004,4 кг/м<sup>3</sup> до 1009,1 кг/м<sup>3</sup>, тобто на 0,5 %, тобто різниця між двома оливами за цим показником складає майже у 7 разів.

Показано, що колір олив під час напрацювання набуває більш інтенсивного забарвлення. В мінеральній оливі МК-8п колір змінюється від жовтого (2,5 одиниць) до коричневого (5 одиниць), а в синтетичній оливі Mobil Jet Oil 254 від світло-жовтого (0,5 одиниць) до світло-коричневого (3,0 одиниць).

Встановлено, що протизносні властивості синтетичної Mobil Jet Oil 254 оливи перевищують понад 10 % мінеральну оливу МК-8п, що пояснюється якістю

та наявністю в синтетичній оливі пакету комплексних присадок. Як показали результати досліджень, що збільшення концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу спостерігається.

## РОЗДІЛ 5

### ВИПАРОВУВАННЯ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 5.1. Оцінка втрат нафтопродуктів від випаровування

Підвищення ефективності використання паливно-мастильних матеріалів на сьогодні є одним із найреальніших напрямів вирішення енергетичних і екологічних проблем [176].

На сьогодні в Україні відсутні будь-які стандарти, які регламентували б визначення такого показника якості паливно-мастильних матеріалів, як їх випаровуваність, що впливає не лише на експлуатаційні властивості (втрату нафтопродукту, пожежовибухобезпечність, доливання олів у процесі експлуатації в системах змащування та ін.), а й екологічні властивості.

На відміну від олів випаровуваність палив можна опосередковано оцінити такими показниками якості як фракційний склад, тиск насиченої пари для бензинів, температура спалаху у закритому тиглі. Останнім із цих показників якості також опосередковано можливо оцінити випаровування олів у процесі експлуатації, але він більш характеризує їх пожежобезпечність в системі змащування, ніж втрати від випаровування.

Світові статистичні дані вказують на те, що загальні втрати нафтопродуктів від випаровування коливаються в межах 1,1–1,7 % від загального об'єму переробленої сировини.

Значною частиною цих втрат є втрати від випаровування при проведенні різних технологічних операцій, а саме: транспортуванні; зберіганні; перекачуванні; застосуванні тощо. Емісія нафтопродуктів, наприклад, під час зберігання та транспортування, зазвичай становить від 1 % до 6 % від загальних антропогенних джерел. За даними зарубіжних досліджень автозаправні станції (АЗС) Німеччини щорічно викидають 145 тис. т пари вуглеводнів; АЗС Англії – понад 120 тис. т [176].

Французькі експерти оцінюють втрати від випаровування при заповненні резервуарів АЗС та зберіганні автомобільних бензинів у розмірі 0,18 % від обсягу операції. Німецькі експерти оцінюють ці втрати в 0,17 %. Японські ж дослідники встановили, що оскільки в умовах Японії температура в підземному резервуарі протягом року сильно не змінюється, а саме варіюється від 15 до 25 °С, то втрати від випаровування складають  $1,08 \text{ кг/м}^3$ , бензину, що закачується.

Такі викиди призводять до істотного забруднення навколишнього середовища, а також створюють пожежонебезпечну ситуацію. Вихід з ситуації, що склалася потребує впровадження новітніх наукових досягнень і вдосконалення способів уловлювання парів нафтопродуктів.

Таким чином, в контексті глобальної проблеми виснаження енергетичних ресурсів і пов'язаної з цим деградації навколишнього середовища, актуальність даної проблеми не викликає сумнівів та тільки підтверджує, що зменшення втрат нафтопродуктів від випаровування залишається важливою екологічною та економічною проблемою [176].

Втрати паливно-мастильних матеріалів від випаровування в умовах їх зберігання обумовлюються властивістю нафтопродуктів випаровуватися. При цьому основним джерелом втрат від випаровування є «дихальна» арматура резервуарів, а в гелікоптерах сапуни, тобто дихальні клапани паливних та оливних систем. Випаровування нафтопродуктів під час їх зберігання та застосування становлять основну частку втрат.

Норма втрати 0,3 % для нафтопродуктів вважається стандартним значенням під час випаровування [176].

Оскільки, такі нафтопродукти як автомобільні бензини мають низькі температури початку кипіння на них найлегше відпрацювати методики визначення втрат вуглеводнів від випаровування, щоб потім перенести ці дослідження на випаровуваність олив.

Значна кількість наукових праць професора Бойченка С. В. та хімотологічної наукової школи під його керівництвом присвячена аналізу та обґрунтуванню методів та методик оцінки втрат нафтопродуктів від

випаровування [176].

Підвищення європейських вимог до якості паливно-мастильних матеріалів під час використання та до норм викидів пари (емісії вуглеводнів) в атмосферу спричинили актуальність науково-прикладного завдання мінімізації втрат нафтопродуктів від випаровування. Для дослідження проблеми емісії вуглеводнів із паливних та оливних баків, виявлення та вивчення впливу сукупності причин, факторів, джерел, їх наслідків було використано метод Ісікави, що характеризує причинно-наслідкові зв'язки цього процесу [176-177].

Алгоритм побудови причинно-наслідкової діаграми зв'язків передбачає формулювання проблеми для її вирішення. На рис. 5.1 представлено отриману нами сукупність чинників впливу на процес емісії вуглеводнів із резервуарів та баків [176].



Рис. 5.1. Причинно-наслідкова діаграма емісії вуглеводнів із резервуарів та баків

Деталізація причинно-наслідкової діаграми зв'язків дозволила встановити найбільш вагомі і проблемні чинники, фактори, джерела, що впливають на процес емісії вуглеводнів із баків, виявити негативні наслідки втрат нафтопродуктів та спрогнозувати методи та засоби мінімізації задля попередження випаровування вуглеводнів [176].

Основними наслідками, виявленими нами за методом Ісікави є наслідки економічного, екологічного та технологічного характеру, що було нами згруповано, структуровано та графічно відображено методом системного аналізу (рис. 5.2).

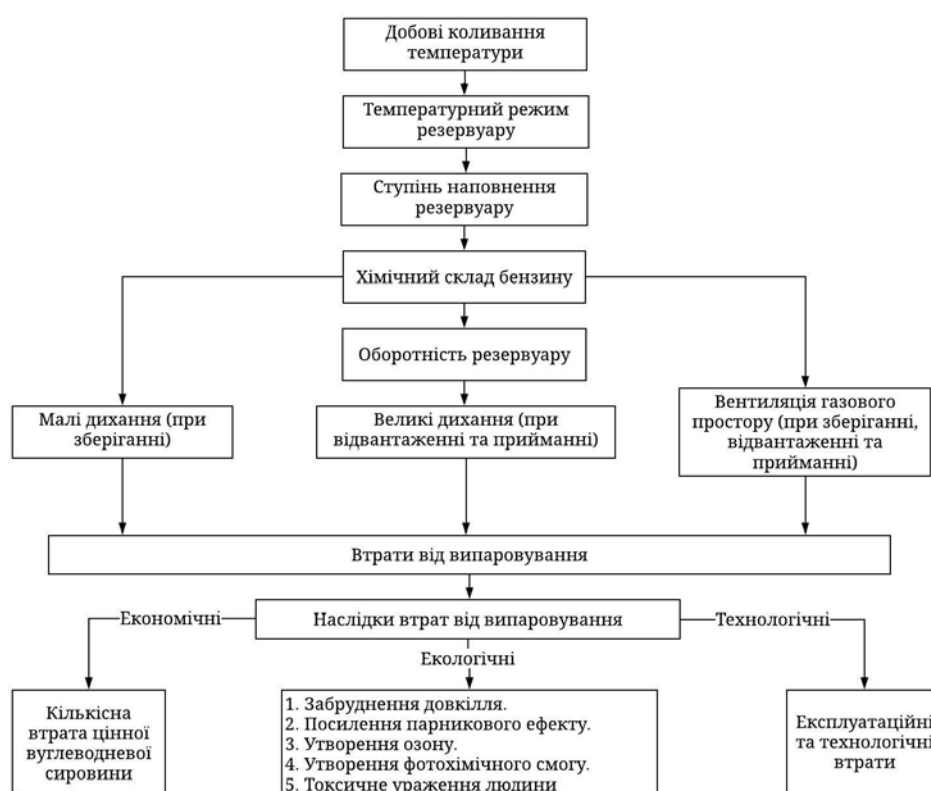


Рис. 5. 2. Системний аналіз причин і наслідків втрат паливно-мастильних матеріалів

Втрати від випаровування призводять до погіршення експлуатаційних властивостей нафтопродуктів, створення пожежовибухонебезпечних концентрацій, економічних збитків. Нафтопереробна промисловість забезпечує потреби різних галузей економіки. Забруднення навколишнього середовища є



причиною виникнення двох видів матеріальних витрат: на запобігання впливу забрудненого середовища на здоров'я людини і на ліквідацію такого впливу.

Емісія летких вуглеводнів чинить значний вплив на якість довкілля. Не менш актуальною проблемою на сьогодні є забруднення атмосферного повітря токсичними речовинами внаслідок випаровування нафтопродуктів, що ставить під загрозу екологічну рівновагу та здоров'я людини, завдає матеріального збитку

Ступінь і характер ураження людини випаровуваннями нафтопродуктів обумовлені концентрацією пари у повітрі, тривалістю перебування в загазованій атмосфері, температурою навколишнього середовища, фізичним станом та фізіологічними особливостями даного організму.

Проте, для попередження забруднення навколишнього середовища та для безпеки людини встановлені гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин.

Під час перекачування, зберігання, відвантаження, завантаження, транспортування та безпосереднього використання нафтопродуктів відбуваються процеси випаровування, що призводять до посилення парникового ефекту, внаслідок емісії вуглеводневих газів. Парниковий ефект пов'язують з глобальним потеплінням, що призводить до зміни клімату у планетарних масштабах [176].

Разом з тим, сучасний стан використання засобів та способів зменшення витрат вуглеводнів на об'єктах нафтопродуктозабезпечення не задовольняє головне завдання в ресурсо- та енергозбереженні нафтопродуктів і екологічній політиці в техносфері, зокрема. Цьому є свої причини, а саме [176]:

- позитивний економічний ефект від використання засобів для попередження витрат від випаровування досягається тільки в тому випадку, якщо витрати на попередження витрат 1 тонни нафтопродукту менші, ніж загальна вартість тонни нафтопродукту;
- крім того, ситуація ускладнюється тим, що навіть морально и технічно застарілі технології використовуються нерационально. Передові технічні розробки, як правило, орієнтовані на великі капіталовкладення, або в кращому

випадку носять локальний характер.

Таким чином, при стрімкому здорожчанні нафтопродуктів, а також з прийняттям більш суворих екологічних норм науково-прикладне завдання мінімізації втрат вуглеводневої сировини і товарної продукції через емісію вуглеводнів стає все більш значущим.

Різні технічні рішення можуть бути використані для зменшення втрат від випаровування, їх обирають згідно техніко-економічних розрахунків з урахуванням метеорологічних та виробничих умов [176-188].

Аналіз способів і засобів уловлювання парів нафтопродуктів з резервуарів дозволяє зробити висновок про те, що найбільш перспективними на сьогоднішній день є способи, в основі яких лежать принципи адсорбції.

Причинно-наслідковий аналіз з використанням методу Ісікави дозволив виявити взаємозв'язки між різними факторами, вивчити причини, систематизувати джерела та їх вплив на процес емісії вуглеводнів із резервуарів та баків. Ми вважаємо, що системний аналіз причин і наслідків дозволить удосконалити технології обліку емісії вуглеводнів, оптимізувати та підвищити ефективність техно-логічних операцій, а також економити цінну вуглеводневу сировину та мінімізувати техногенний вплив на довкілля [176-179].

Розглядаючи випаровування вуглеводнів приходимо до висновку, що запобігання цим втратам є одним із важливих напрямів економії паливно-енергетичних ресурсів. Тобто, проблема втрат від випаровування – це комплексна еколого-економіко-енергетична проблема, що потребує уваги суспільства, держави та вчених щодо її вирішення [177-181].

На сьогодні існує багато методик розрахунку та визначення втрат нафтопродуктів від випаровування, але в Україні так же як і в європейських країнах немає розробленої єдиної методики для оцінки цього показника якості.

## **5.2. Методика визначення втрат вуглеводнів від випаровування**

Визначення фізичної стабільності (динамічної випаровуваності, втрат)

здійснюється за допомогою методу, який розроблений П. І. Бударовим. Втрати за цим методом умовно приймається як зменшення маси нафтопродукту після продування його десятикратним об'ємом повітря за температури 20 °С [182]. Для виконання випробувань використовують прилад, який зображено на рис. 5.3.

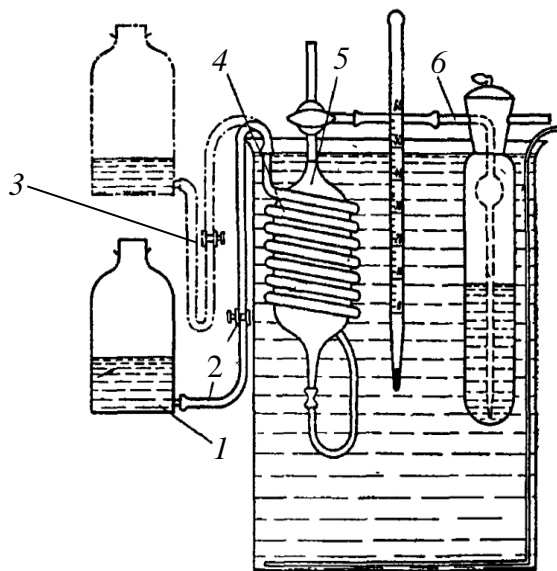


Рис. 5.3. Прилад для визначення втрат палива від випаровування:

1 – напірна склянка; 2 – трубка; 3 – затискач (кран);  
4 – змійовик; 5 – капілярний мірник; 6 – пробірка

Спочатку випробовування необхідно перевірити об'єм мірника, а для наступних досліджень він залишається незмінним. Для цього надіти на капіляр мірника, попередньо промитого хромовою сумішшю, спиртом та висушеним, гумову трубку із затискачем та налити в мірник дистильовану воду за температури 20 °С до верхньої позначки.

Зняти з капіляра гумову трубку та спустити воду з мірника до нижньої мітки у вимірювальну колбу, попередньо зважену з похибкою не більше 0,0002 г. Колбу з водою зважити з похибкою не більше 0,0002 г.

Налити дистильовану воду у напірну склянку, піднімаючи її, заповнити з'єднувальну трубку, змійовик та мірник водою. Склянку встановлюють на підставках у двох положеннях: верхньому та нижньому. При нижньому положенні: вода в мірнику повинна знаходитись на рівні нижньої позначки, при верхньому – на рівні верхньої.

Провести перевірку приладу на герметичність, для цього на вільне відгалуження приладу надіти гумову трубку із затискачем. Пробірку, мірник, зміювик трубки й крани повністю занурити у воду. Температуру води підтримувати на рівні (20 °С. Для створення надмірного тиску в системі підняти напірну склянку до рівня верхньої позначки. Якщо при цьому із сполучень не виходять бульбашки повітря й відсутнє підвищення рівня води в мірнику – прилад вважається герметичним.

Триходовий кран мірника з'єднати з атмосферою та встановити напірну склянку в нижнє положення.

Чисту й суху пробірку зважити з похибкою не більше 0,0002 г та залити 10 мл досліджуваного нафтопродукту.

Внутрішню поверхню горла пробірки витерти фільтрувальним папером, пробірку закрити пробкою і зважити з похибкою не більше 0,0002 г.

Пробірку з'єднати з мірником і помістити в склянку, де витримати за температури 20 °С протягом 5 хв.

Пробку пробірки повернути так, щоб отвір із припаяною трубкою збігався з отвором горла пробірки, що приєднане до мірника. Краном з'єднати пробірку з мірником.

Напірну склянку встановити у верхнє положення та почати продування палива повітрям, що витискується з мірника в пробірку. Продування має бути інтенсивним, але без розбризкування палива. Тривалість продування 3 – 5 хв. Швидкість регулюють затискачем (або краном), установленим на гумовій трубці в напірній склянці. Температура у термостаті під час продування підтримується на рівні 20 °С.

Після того, як рівень води у мірнику досягне верхньої позначки, пробірку поворотом крана відключають від мірника.

Пробірку виймають із склянки, витирають лляною ганчіркою або фільтрувальним папером і зважують.

Втрату нафтопродукту від випаровування  $X$  визначають за формулою

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100,$$

де  $m_1, m_2$  – маса проби палива відповідно до та після випаровування, г.

За показник втрат від випаровування приймають середнє арифметичне з результатів двох визначень. Розбіжності між ними не повинні перевищувати 1 % від середнього арифметичного значення.

Ця методика придатна до застосування під час визначення втрат від випаровування бензинів, тобто легколетких вуглеводнів. Як показали дослідження, що за температури 20 °С, яка підтримується в термомтаті за цієї методики визначення втрат неможливо визначити випаровуваність олив, оскільки вони мають набагато вищі температури початку кипіння ніж бензини.

Це спонукало нас вдосконалити цю методику визначення випаровуваності нафтопродуктів для можливості її застосування у процесах дослідження цього показника для олив, а саме, замінити в термостаті воду на оливу та проводити випробування не за температури 20 °С, а за температури 50 °С. Це дозволило провести порівняльний аналіз випаровуваності різних паливно-мастильних матеріалів. Тим більше, що визначення такого показника якості як кінематична в'язкість для досліджуваної оливи МК-8п здійснюється також за температури 50 °С відповідно до ГОСТ 6457.

Методика проведення дослідження за цим показником та розрахунки залишаються незмінними.

Результати проведених випробувань щодо випаровування за данною методикою для бензину А-95, олив МК-8п та Mobil Jet oil 254 наведено в табл. 5.1.

Основним недоліком цієї методики проведення досліджень щодо випаровування нафтопродуктів є ускладнення проведення випробувань за високих температур, оскільки зростає тиск повітря у скляному мірнику, що може призвести до його руйнування.

Таблиця 5.1

**Втрати від випаровування нафтопродуктів за температури 50 °С**

Втрати від випаровування під час продування повітрям протягом 5 хв, % мас.	Нафтопродукт		
	бензин А-95	олива МК-8п	олива Jet oil 254
	28	0.04	0.016

Процес випаровування можливо характеризувати шляхом визначення фракційного складу нафтопродуктів відповідно до ISO 3405, але ж знову таки цим стандартом передбачено визначати фракційний склад світлих нафтопродуктів за методикою пункту А, а за методикою пункту Б – визначення фракційного складу нафти та темних нафтопродуктів до температури випробувань 300 °С. Враховуючи, що синтетична олива Mobil Jet oil 254 є високомолекулярною полімерною сполукою цим методом неможливо дослідити її випаровуваність за різних температур, оскільки вона має сталу температуру кипіння і може розкладатися за високих температур нагрівання.

### 5. 3. Випаровування олив

Синтетичні оливи, як відмічалось вище, і мінеральні нафтові оливи, які одержують з висококиплячих фракцій нафти, в процесі експлуатації випаровуються незначно. Наприклад, фракційний склад мінеральної оливи МК-8п знаходиться в межах 260-420 °С, а робочі їх температури за нормальних умов роботи не перевищують 100 °С. Тому, фракційним складом неможливо оцінити випаровуваність олив, на відміну від бензинів чи інших світлих нафтопродуктів, а оцінку краще здійснювати методом П.І. Бударова, описаному в п. 5.2.

Оливи з вузьким фракційним складом, тобто, що википають у невеликому інтервалі температур, володіють кращими в'язкісно-температурними характеристиками, більш високою температурою спалаху у порівнянні з оливами, що мають однакову в'язкість за температури 100 °С, але з більш широким фракційним складом [192].

Нижні межі температури кипіння олив встановлюють залежно від їх випаровуваності під час роботи та від змащувальних властивостей. В оливах, наприклад, для автомобільних двигунів, які безпосередньо контактують з гарячими поршнями циліндра, допускається не більш 5 % фракцій, що википають до 340 °С. Ці фракції впливають на витрату олив у двигуні. Чим їх більше, тим більше втрати оливи внаслідок випаровування легких фракцій, у результаті чого зростає в'язкість і, як наслідок, затрудняється її прокачування по змащувальній системі. Вимоги до фракційного складу дизельних олив менш жорсткі, ніж до олив для бензинових і газових двигунів. Вміст у дизельних оливах не більш 5% фракцій, що википають до 320-325 °С, практично не збільшує витрату оливи. Верхні межі температури кипіння олив встановлюють, керуючись головним чином такими вимогами, як прокачуваність по системі за низьких температур [193-194].

Носіями високої в'язкості мінеральних олив є ароматичні поліциклічні вуглеводні, що визначають підвищену схильність олив до нагароутворення. Із збільшенням температури викіпання олив збільшується в'язкість і нагароутворення. Для одержання олив з низькою схильністю до нагароутворення необхідно, щоб верхня межа фракційного складу олив не перевищувала 400°C, а температура кінця кипіння оливи МК-8п становить 420 °С.

За більш високих температур у залишкових оливах схильність до нагароутворення збільшується. Регулювання фракційного складу оливної основи по верхній межі викіпання у поєднанні із використанням в'язкісних присадок, дозволяє одержувати оливи з необхідними в'язкісно-температурними і менш нагароутворюючими властивостями. Використовуючи інші за призначенням присадки, можна одержати якісні за всіма експлуатаційними показниками оливи [179].

Випаровуваність олив опосередковано характеризується температурою спалаху. Так для олив одного класу в'язкості, наприклад, 10 мм<sup>2</sup>/с за температури 100 °С, зниження температури спалаху з 250 до 218 °С викликає перевитрату оливи на 10-15 %, внаслідок збільшення випаровування [185].

Методика визначення цього показника якості олив наведена в розділі 3, а результати випробувань – у розділі 4 цієї роботи.

### **5.3.1. Визначення випаровування моторних олив методом ASTM D5800 (тест NOACK)**

Схильність до випаровування моторної оливи регламентується стандартами API (американський інститут нафти), ACEA (асоціація європейських автомобілебудівників) та OEM (оригінальні виробники обладнання) за допомогою спеціального тесту Селбі-Ноака (Selby-Noack) рис. 5.4. Суть метода ASTM D5800 (стандартизований тест Селбі-Ноака) полягає в імітації високотемпературного випаровування оливи в двигуні шляхом витримування проби оливи у спеціальному приладі за температури 250°C протягом 1 години. Випаровуваність визначається у відсотках. Чим менший відсоток випаровування у тесті, тим стабільніша олива до випаровування. Знаючи показник NOACK можна передбачити інтенсивність випаровування оливи у двигуні, або під час робот. Вимогами до випаровування є на рівні близько 15% за стандартами API і близько 13 % – за вимогами виробників двигунів (OEM) [197-200].



Рис. 5.4. Автоматичний прилад для визначення випаровування олив



У табл. 5.2 наведемо порівняння моторних олив деяких виробників [197-200]:

Таблиця 5.2

**Порівняльна таблиця випаровування олив**

Моторна олива	Випаровування, %
Katana Makuri E7 10W-40	8,37
Shell Rimula R5E 10W-40	10

Цим стандартом передбачено проведення досліджень випаровуваності моторних олив.

### 5.3.2. Визначення випаровування авіаційних олив методом ASTM D972

Переходячи до європейських стандартів визначення показників якості авіаційних олив ми стикнулися з проблемою відсутності методів випробувань щодо випаровування оливи МК-8п та для тих олив, що потенційно можуть вироблятися в Україні. На нашу думку ці стандарти з часом адаптуються до запровадження на нашому ринку. Прилад для проведення таких випробувань зображено на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Прилад для визначення випаровування олив за ASTM D972

Цим методом можливо проводити дослідження випаровуваності олив та мастил за будь-яких температур.

Суть методу полягає у дослідженні проби оливи, яка розміщена у випарній камері приладу та продувається нагрітим до визначеної температури повітрям визначений у стандарті на дану оливу час. Витрата повітря на продування оливи становить 2 л/хв.

Для випробування необхідно 10 г оливи. Спочатку необхідно зважити чашку для випаровування з точністю 10мг, потім у цю чашку заливаємо піпеткою оливу та зважуємо знову, доводячи масу оливи до 10 г. Закриваємо кришкою чашку для випробування та ставимо її у термостат нагрітий до необхідної температури та пропускаємо гаряче повітря з швидкістю 2 л/хв протягом усього часу випробування.

Після завершення випробувань дістаємо чашку із оливою, охолоджуємо її в ексікаторі до кімнатної температури та зважуємо на вагах. За різницею маси чашки до та після випаровування визначаємо втрати.

Очевидно, що метод та методика визначення випаровуваності олив за ASTM D972 нічим не відрізняється від методики П.І. Бударова, описаної в п.5.1. Різниця становить лише у тому, що прилад більш сучасний, вдосконалений та виконаний із нержавіючої сталі.

Результати випаровування авіаційних олив за їх продування повітрям протягом 6,5 год відповідно до ASTM D972 наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

### Випаровування авіаційних олив

Олива	Випаровування, % мас.	
	MIL-PRF-23699-HTS	Експеримент
oil Jet 254, 204 °C	не більше 7.4	4.8
oil Jet 254, 232 °C	не більше 25.2	15.4
МК-8п, 204 °C	-	18.6
МК-8п, 232 °C	-	26.4

## Висновки до розділу 5

Проведено аналіз випаровуваності паливно-мастильних матеріалів з використанням методу Ісікави, що характеризує причинно-наслідкові зв'язки цього процесу, оскільки цей показник якості характеризує їх втрату, в тому числі оливи, що в свою чергу впливає на безпеку польотів.

Запропоновано методику для проведення таких випробувань, оскільки стандартами на паливно-мастильні матеріали для оливи МК-8п це не передбачено.

Показано, що процес випаровування оливи на відміну від випаровування легких нафтопродуктів відбувається за високих температур, що зменшує їх кількісні втрати.

## РОЗДІЛ 6

### РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Одержані в дисертаційній роботі результати є підґрунтям для ефективного використання змащувальних матеріалів у процесі експлуатації у двигунах повітряних суден та прогнозування термінів їх заміни по динаміці зміни показників якості олив.

На підставі досліджень, проведених у дисертаційній роботі, були розроблені практичні рекомендації щодо заміни оливи залежно від напрацювання, аналізу зміни фізико-хімічних показників у процесі експлуатації та факторів, що найбільш впливають на швидкість зміни показників якості оливи під час її роботи у системі змащування та подальшої оцінки працездатності, а саме:

- Запропоновано проводити заміну мінеральної оливи МК-8п після 150 год, за тих же самих умов експлуатації, що і синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254, оскільки кінематична в'язкість її зростає понад 60 %, що характеризує інтенсифікацію процесів окиснення вуглеводнів та смолоутворення та загальне лужне число зменшується на 50 % завдяки спрацюванню лужних присадок, що призведе до зростання зносу деталей двигуна;

- Встановлено та експериментально доведено, що термін працездатності синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 перевищує понад 5 разів працездатність мінеральної оливи МК-8п, яка застосовується для змащування підшипників турбіни та унеможлиблюється її використання для гелікоптерів Airbus Helicopters H-145 та інших, що мають єдину систему змащування для двигуна і редуктора. Застосування оливи Mobil Jet Oil 254 може бути альтернативою в системах змащування замість МК-8п, що сприятиме раціональному використанню моторних олив.

- Вперше проведено трибологічні випробування оливи Mobil Jet Oil 254 з фулереновмісними присадками та доведено недоцільність їх використання у підшипниках кочення турбіни гелікоптера як протизносних присадок, за умов

проведених досліджень.

- Набули подальшого розвитку експериментальними підтвердженнями теоретичні положення хімотології, які в сукупності вирішують важливу наукове завдання з теоретичного та науково-практичного обґрунтування динаміки зміни основних показників якості олив у процесі реальних умов експлуатації гелікоптерів «Airbus Helicopters H-145».

- Рекомендовано 10 Хімотологічному центру МО України проводити заміну оливи МК-8п, на випадок закінчення її запасу, що застосовується для потреб військової авіації, на альтернативні синтетичні оливи Mobil Jet Oil 254, Mobil Jet Oil II, які за фізико-хімічними та експлуатаційними показниками якості перевищують останню, після проведення випробувань, передбачених Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України (Наказ Міністерства оборони України № 662, від 08.12.2016).

Змішування, або приготування маслосумішей із синтетичної Mobil Jet Oil 254 та мінеральної МК-8п олив **категорично заборонено!**

Випробування дослідних олив є заключним етапом у комплексі їх випробувань і проводяться після задовільних результатів випробувань даних олив на попередніх етапах (лабораторні, стендові і контрольні випробування).

Випробування дослідних олив проводяться протягом одного календарного року з ресурсом не менше 500 годин. Після вказаного напрацювання двигуни знімаються з ПС для розбирання і дефектації. За матеріалами випробувань, результатами розбирання і дефектації приймається рішення про серійне застосування випробуваної оливи або продовження випробувань на інших двигунах.

Випробування дослідних олив, особливості експлуатації яких проявляються лише у визначених умовах (температура зовнішнього повітря, вологість), мають проводитись у визначену пору року.

Випробування та впровадження нових олив проводити комісією з представників авіаційних частин, виділених для проведення випробування, і спеціалістів науково-дослідних організацій.

Основними керівними документами під час проведення випробувань дослідних олив є:

- наказ Міністра оборони України про випробування ПС;
- наказ командувача виду Збройних Сил України;
- робоча програма і методичні вказівки з проведення випробувань дослідної оливи.

Основною метою випробувань авіаційних олив є:

- перевірка надійності роботи двигунів, агрегатів гвинтів гелікоптера на дослідній оливі протягом встановленого програмою напрацювання двигунів на всіх режимах роботи двигуна та у всьому діапазоні експлуатаційних висот і швидкостей польоту ПС;
- встановлення можливості застосування дослідної оливи на даних типах двигунів ПС в умовах експлуатації, а також виявлення особливостей експлуатації технічного обслуговування двигунів, агрегатів і повітряних гвинтів під час застосування дослідної оливи.

Перед початком випробувань необхідно здійснити:

- вивчення матеріалів раніше проведених випробувань дослідної оливи, аналіз особливостей роботи двигунів, їх агрегатів і повітряних гвинтів під час застосування дослідної оливи;
- відпрацювання робочих програм і методичних вказівок з проведення випробувань;
- виділення ПС для проведення випробувань, призначення основних і резервних екіпажів і посадових осіб, відповідальних за збір, підготовку й оформлення матеріалів для складання відповідних розділів акта за результатами випробувань;
- укомплектування двигунів і повітряних гвинтів, призначених для випробування на дослідній оливі, гумотехнічними виробами згідно з рекомендаціями;
- вивчення льотним та інженерно-технічним складом, визначеним для проведення випробувань, наказу, програми і методичних вказівок з проведення

випробувань, фізико-хімічних властивостей та особливостей дослідної оливи, а також результатів раніше проведених випробувань;

- підготовку журналів щодо обліку робіт за програмою випробувань та проведення інструктажу по їх заповненню;
- таврування приладів, що контролюють роботу силових установок ПС, та додаткової апаратури;
- підготовку резервуарів і засобів заправки для дослідної оливи;
- проведення фізико-хімічного випробування дослідної оливи відповідно до вимог стандарту.

Підготовка ПС до випробувань дослідної оливи включає:

- зливання із систем двигунів ПС наявної оливи (проводиться після знімання наземних характеристик і обльоту ПС на стандартній оливі);
- огляд масляних фільтрів і ділянок системи, доступних для огляду (за необхідності фільтри промиваються або замінюються новими);
- промивання систем і силових установок ПС дослідною оливою;
- заправку систем дослідною оливою.

Наземні випробування здійснюються в такій послідовності:

- перевірка відповідності основних параметрів роботи двигунів на дослідній оливі в процесі пусків, проб сприйманості й роботи на встановлених режимах вимогам інструкції з експлуатації і порівняння їх з параметрами, одержаними на стандартній оливі;
- оцінка стабільності параметрів роботи силової установки в процесі напруження ресурсів двигунів;
- визначення надійності і стабільності пуску двигунів від аеродромних і бортових засобів залежно від атмосферних умов, теплового стану двигунів і напруження ресурсів двигунів;
- перевірка флюгерування повітряного гвинта на працюючому і непрацюючому двигуні;
- перевірка стійкості робіт двигунів на встановлених і перемінних режимах;
- визначення часу, необхідного на пуск, прогрівання і випробування двигуна

під час підготовки до польоту;

- виявлення особливостей експлуатації двигунів для застосування дослідної оливи.

Випробування в польоті здійснюється в такій послідовності:

- виконання польотів під час випробувань поєднується з виконанням завдань бойової підготовки авіаційних частин (у разі незабезпечення виконання окремих пунктів програми випробування проводяться польоти за спеціальним завданням, розробленим комісією з проведення випробувань);

- перед початком експлуатації на дослідній оливі проводиться обліт ПС на стандартній, а потім на дослідній оливі для перевірки роботи двигунів і контрольно-вимірювальної апаратури відповідно до інструкції льотчику для даного типу ПС.

У процесі випробувань дослідної оливи перевіряються:

- надійність роботи двигунів та їх агрегатів за всім діапазоном висот і швидкостей польотів ПС, передбачених інструкцією льотчику;
- відповідність параметрів роботи двигунів інструкції з експлуатації (на початку і в кінці випробувань при мінімально і максимально допустимих температурах оливи);
- ефективність роботи системи охолодження для підтримання рекомендованої температури оливи на всіх висотах і швидкостях польоту, передбачених інструкцією для даного типу ПС;
- параметри роботи систем силової установки ПС на встановлених режимах:
- під час зльоту і набору висоти - на максимальному і форсованому режимах до практичної стелі;
- у горизонтальному польоті - у всьому діапазоні висот і швидкостей бойового використання ПС;
- під час планерування ПС з висот практичної стелі і роботи двигунів - на режимах, рекомендованих інструкцією льотчику.

У разі виконання пусків двигунів у польоті необхідно записати:

- умови, за яких включається двигун і проводиться пуск;



- кількість включень форсажу, проб сприйманості, пусків, флюгерування;
- тип двигуна і ПС в робочій програмі.

Огляд фільтрів для олив проводиться відповідно до інструкції з експлуатації двигуна. У разі виявлення на фільтрах відкладень проводиться їх зняття і зважування, за необхідності визначається хімічний склад відкладень.

Щомісяця головою комісії проводиться узагальнення матеріалів випробувань і доповідається письмово командувачу виду Збройних Сил України.

У процесі випробувань дослідної оливи визначаються:

- витрата оливи;
- фізико-хімічні властивості дослідної оливи;
- вплив дослідної оливи на якість повітря, що подається в кабінку ПС;
- вплив дослідної оливи на гумові вироби і лакофарбові покриття ПС.

Проби оливи з двигунів відбираються через 25-50 год напрацювання, проби повітря з кабін ПС - через 50-100 год.

Робота після випробувань здійснюється в такій послідовності:

- проведення зовнішнього огляду фільтрів, дюритових шлангів системи силових установок і лакофарбового покриття двигунів ПС, які працюють на дослідних і стандартних оливах;

- за результатами огляду складання акта, в якому зазначаються стан вузлів і агрегатів, лакофарбового покриття, кількість і склад знятих відкладень;

- знімання з ПС двигунів, їх огляд і відправка на підприємство-виробник для розбирання і дефектації. Розбирання і дефектація відбуваються в присутності членів комісії, що проводить випробування. Під час розбирання особливу увагу звертають на наявність відкладень на деталях, знос деталей і стан гумотехнічних деталей. Виявлені дефекти фотографуються, гумотехнічні деталі направляються на дослідження. У розбиранні і дефектації деталей можуть брати участь представники організацій, які розробили оливу;

- фотографування дефектних деталей двигунів і апаратури систем, а також деталей з характерними відкладеннями, корозією, забрудненнями;

- дослідження причин утворення дефектів або характерних відкладень на

деталях. Порівняння цих деталей з деталями інших двигунів, які напрацювали встановлений ресурс на стандартній оливі;

- зважування нагарів і відкладень та визначення в них кількості органічних і неорганічних часток за ГОСТ 1461 [ ]. За необхідності проводиться більш повний аналіз у науково-дослідних організаціях.

Комісія, що проводить випробування, узагальнює, аналізує матеріали, одержані в процесі випробувань, розбирання і дефектації двигунів, і складає акт за результатами випробувань, який включає такі основні розділи:

- *Стислі відомості про об'єкт*

У цьому розділі викладаються інформація та дані, пов'язані з розробкою дослідної оливи. Наводяться відомості про дослідну оливу (технологія виробництва, основні результати попередніх лабораторних, стендових і льотних випробувань), підстава для закінчення випробувань.

- *Підсумки*

У підсумках надаються прямі і повні відповіді на питання щодо випробувань, рекомендації щодо усунення недоліків. Оцінка надійності роботи двигунів і агрегатів систем ПС під час експлуатації на дослідній оливі проводиться за результатами розбирання і дефектації двигунів. Висновок надається комісією з проведення випробувань.

- *Висновки*

У висновках надається оцінка результатів використання дослідної оливи порівняно зі стандартною. Перевіряються результати виконання пунктів програми, вказуються особливості і дефекти, отримані при застосуванні дослідної оливи, і надаються пропозиції щодо усунення виявлених дефектів і недоліків. Висновки підписуються комісією, що проводила випробування.

- *Льотна оцінка*

У цьому розділі надається характеристика стійкості роботи двигунів, систем ПС на дослідній оливі й відповідність параметрів роботи двигунів вимогам інструкцій з експлуатації.

Оцінюється робота двигунів і систем ПС у польотах на дослідній оливі й

відмічаються особливості їх роботи, виявлені під час випробування.

Льотна оцінка складається льотчиками, які виконували програму випробування, і підписується командиром частини.

- *Експлуатаційна оцінка*

У цьому розділі надається оцінка роботи двигунів на дослідній оливі у процесі випробувань, наводяться особливості експлуатації силової установки на землі, особливості, виявлені службою пального під час зберігання, видачі і заправки.

Експлуатаційна оцінка підписується старшим інженером частини й начальником служби паливно-мастильних матеріалів.

- *Матеріали випробувань*

У матеріалах випробувань наводяться відомості про ПС, двигуни й агрегати, напрацювання двигунів, дані про дослідну оливу (склад оливи, технологія виробництва, застосована сировина, домішки), дані про фізико-хімічні властивості дослідної оливи, фактичні матеріали, одержані у процесі випробувань (фотографії, графіки, таблиці, акти), які характеризують хід роботи і результати випробувань. Акт має містити матеріали виконання кожного пункту програми.

Матеріали випробувань підписуються керівним складом авіаційної частини, що проводила випробування.

Ця робота є проміжним етапом щодо вивчення матеріалів раніше проведених випробувань дослідної оливи.

Результати дисертаційної роботи апробовано і впроваджено у Національному авіаційному університеті, що підтверджується Актом впровадження у навчальний процес.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень встановлено динаміку зміни основних показників якості олив у процесі експлуатації гелікоптерів. Встановлено, що забруднення олив механічними домішками, продуктами зносу та водою відбувається у процесі їх експлуатації у вузлах змащування. Вміст масової частки води у мінеральній оливі МК-8п під час напрацювання підвищується до 0,0044 % мас. після 300 годин напрацювання, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil до 0,0024 % мас. за це й же термін її роботи в системі змащування гелікоптера.

Показано, що вміст масової частки розчиненої води в мінеральній оливі майже у двічі перевищує вміст масової частки води у синтетичній. Це обводнення пов'язане із насиченням та поглинанням вологи з атмосфери, наявності в МК-8п полярних вуглеводнів та більшою густиною синтетичної оливи.

Встановлено, що вміст масової частки механічних домішок оливи МК-8п під час напрацювання підвищується до 0,00056 % після 300 год нальоту гелікоптера, а оливи Mobil Jet Oil 254 – до 0,00036 %, тобто понад 1,5 рази, що можливо пояснити кращими протизносними властивостями синтетичної оливи.

Встановлено, що кінематична в'язкість оливи МК-8п під час напрацювання за температури 40 °С зростає з 16 сСт до 25.6 сСт після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 60 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 за рахунок полімеризації за високих температур у присутності кисню – з 26.4 сСт до 33.2 сСт, тобто на 26 %, тобто в'язкість мінеральної оливи порівняно із синтетичною збільшилася у 2,3 рази. Кінематична в'язкість оливи МК-8п під час напрацювання за температури -40 °С зростає з 6500 сСт до 10800 сСт після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 61,5 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 – з 11500 сСт. до 13800 сСт., тобто на 20 %, тобто в'язкість мінеральної оливи порівняно із синтетичною збільшилася у 3 рази. Кінематична в'язкість оливи МК-8п під час напрацювання за температури 100 °С зростає з 2,6 сСт до 4,38 сСт після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 68 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 – з 5,3 сСт до 6,64 сСт, що становить 25,2 %, тобто в'язкість мінеральної оливи

порівняно із синтетичною збільшилася у 2,7 рази. Зростання в'язкості засвідчує утворення смолистих речовин (продуктів окиснення) у процесі напрацювання олив.

Показано, що загальне лужне число (ЗЛЧ) оливи МК-8-п під час напрацювання після 300 годин нальоту знижується з 0,04 мг КОН/г до 0,022 мг КОН/г., тобто на 45 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254 – з 0,08 мг КОН/г до 0,072 мг КОН/г, що становить 10 %, тобто ЗЛЧ мінеральної оливи порівняно із синтетичною зменшилося у 4,5 рази, що характеризує спрацювання присадок.

Встановлено, що температура спалаху мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання знижується із 140 °С до 121 °С після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 14 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil з 254 °С до 243 °С, що становить 9,6 %, тобто температура спалаху мінеральної оливи зменшується у 1,5 рази ніж синтетичної, що характеризує випаровуваність легких фракцій.

Визначено, що температура застигання мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується з - 55 °С до -38 °С після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 31 %, а синтетичної оливи Mobil Jet Oil – з -62 °С до -56,6 °С, тобто на 8,8 %, що становить понад 3,5 рази, що характеризує значним окисненням мінеральної оливи.

Встановлено, що густина мінеральної оливи МК-8п під час напрацювання підвищується з 852 кг/м<sup>3</sup> до 879 кг/м<sup>3</sup> після 300 год нальоту гелікоптера, тобто на 3,4 %, а синтетичної оливи – з 1004,4 кг/м<sup>3</sup> до 1009,1 кг/м<sup>3</sup>, тобто на 0,5 %, тобто різниця між двома оливами за цим показником складає майже 7 разів, що характеризує інтенсивним окисненням мінеральної оливи.

Показано, що колір олив під час напрацювання набуває більш інтенсивного забарвлення. Що пояснюється процесами смолоутворення. В мінеральній оливі МК-8п колір змінюється від жовтого (2,5 одиниць) до коричневого (5 одиниць), а в синтетичній оливі Mobil Jet Oil 254 від світло-жовтого (0,5 одиниць) до світло-коричневого (3,0 одиниць).

Встановлено, що протизносні властивості синтетичної Mobil Jet Oil 254 оливи перевищують понад 10 % мінеральну оливу МК-8п, що пояснюється якістю

та наявністю в синтетичній оливі пакету комплексних присадок. Як показали результати досліджень, що збільшення концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу та збільшення критичного навантаження спостерігається спостерігається в обох оливах.

Доведено, що за вищеперерахованими показниками термін експлуатації мінеральної оливи МК-8п у системах змащування не може перевищувати 150 год.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія виробництва авіаційних двигунів. Ч. 5: Випробування авіаційних двигунів / В. О. Богуслаєв, О. Я. Качан, А. І. Долматов, В. Ф. Мозговий ; під ред. В. О. Богуслаєва. Запоріжжя: АО «Мотор Січ», 2015. 330 с.
2. Технологія виробництва авіаційних двигунів. Ч. 4 : Складання авіаційних двигунів / В. О. Богуслаєв, О. Я. Качан, А. І. Долматов та ін. під ред. В. О. Богуслаєва. Запоріжжя: АО «Мотор Січ», 2013. 329 с.
3. Bushell, K. W. (2003). Jet and Gas Turbine Engines. In R. A. Meyers *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (3rd ed., pp. 127-152). New York, USA: Academic Press.
4. Sadineni, A., Ivvala, J., Sai, S. (2017). A review on the importance of viscosity in engine oils. *Journal of Mechanical and Production Engineering (JMPE)*. 7(1). 10.
5. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О.О., Якобчук О. Є., Хімко А. М. Огляд класифікацій за фізико-механічними та експлуатаційними властивостями мастил закордонного виробництва. Проблеми тертя та зношування. – 2020. – 3 (88). – С. 52-70. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14920
6. О. О. Мікосянчик, О. Є.Якобчук, Є. В. Педан, Н. М. Березівський. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. Проблеми тертя та зношування, 2023, 2 (99). С.4-13. DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17611
7. Rostek, E., Babiak, M. (2019). The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*, 40, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>.
8. Hu, E., Liu, T., Song, R., Dearn, K., Xu, Y. (2013). Effect of  $TiF_3$  catalyst on the tribological properties of carbon black-contaminated engine oils. *Wear*. 305, 166-176.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.003>.
9. Wolak, A., Zając, G. (2019). An Empirical Study of the Variables Affecting the Frequency of Engine Oil Change in the Environmental Aspect. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 21, 738-766.

10. Martini, A., Ramasamy, U.S., Len, M. (2018). Review of Viscosity Modifier Lubricant Additives. *Tribol Lett.* 66, 58. <https://doi.org/10.1007/s11249-018-1007-0>.
11. Thong, D., Hutchinson, P.A., Wincierz, C., Schimmel, T. (2014). Viscosity Modifiers. In: Mang, T. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication* (pp. 2292–2316). Berlin, Germany: Springer.
12. Méheust, H., Le Meins, J.-F., Grau, E., & Cramail, H. (2021). Bio-Based Polyricinoleate and Polyhydroxystearate: Properties and Evaluation as Viscosity Modifiers for Lubricants. *ACS Applied Polymer Materials*. 3(2), 811–818. <https://doi.org/10.1021/acsapm.0c01153>.
13. Hu, C., You, G., Liu, J., Du, S., Zhao, X., Wu, S. (2021). Study on the mechanisms of the lubricating oil antioxidants: Experimental and molecular simulation. *Journal of Molecular Liquids*. 324, 115099. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115099>.
14. Sadineni, A., Ivvala, J., Sai, S. (2017). A review on the importance of viscosity in engine oils. *Journal of Mechanical and Production Engineering (JMPE)*. 7(1). 10.
15. V.M. Ledovskykh, Yu.P. Vyshnevskaya, I.V. Brazhnyk, S.V. Levchenko. Thermodynamic States and Transitions Diagrams. In book: *Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces, and Their Applications*. 2021. (pp. 441-458). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74741-1\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74741-1_30)
16. O. Matvyeyeva, Y. Vovk, O. Nilov. Microbiological Contamination of Motor Fuels: Analysis and Identification in Fuelling Companies. *Proceedings of the National Aviation University*. – 2021. N1(86). –P. 49–56. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15444>
17. Alimova, Z. Kh., Abdurazzoqov, A. A., Yuldasheva, G. B. (2022). Improving the Anticorrosive Properties of Motor Oils by Adding Additives. *Texas Journal of Engineering and Technology*. 8, 16-19.
18. Syabilah, S., Amit, R. N., Mohd, H. A., Zulkifli, N.W.M., Mohd, R. J., Wageeh, A. Y., Lee H. V. (2021). Semicarbazide and thiosemicarbazide containing butylated hydroxytoluene moiety: new potential antioxidant additives for synthetic



lubricating oil. *RSC Adv.* 11(13), 7138–7145. <https://doi.org/10.1039/d0ra10626g>.

19. Nassar, A. M., Ahmed, N. S., Abdel-Hameed, H. S., El-Kafrawy, A. F. (2016). Synthesis and utilization of non-metallic detergent/dispersant and antioxidant additives for lubricating engine oil. *Tribology International*. 93, 297-305.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.033>.

20. Valerii Yefymenko. Oxidative stability of lubricating materials with fullerene nanoadditives/ Valerii Yefymenko, Tetiana Kravchuk , Oleksandr Yefimenko// – К.: Вісник НАУ, №1, 2021. – Р. 57 - 62. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15445>

21. Cai, Z.B., Zhou, Y., Qu, J. (2015). Effect of oil temperature on tribological behavior of a lubricated steel–steel contact. *Wear*. 332–333, 1158-1163.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.064>.

22. Wierzbička, N., Szadkowska, D., Patalas, A., Talar, R., Łabudzki, R., Zawadzki, P. (2020). Evaluation of deterioration of engine oil properties in the function of mileage. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1426, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012004>.

23. Idzior, M. (2021) Aging of engine oils and their influence on the wear of an internal combustion engine. *Combustion Engines*. 185(2), 15-20. <https://doi.org/10.19206/CE-138033>.

24. Khamidullaevna, A.Z., Siddikov, F. (2022). The aging process of motor oils during operation. *European international journal of multidisciplinary research and management studies*. 2(6), 166-169. <https://doi.org/10.55640/eijmrms-02-06-32>.

25. Airbus H145 helicopters. <https://www.airbus.com/en/products-services/helicopters/civil-helicopters/h145>.

26. Інструкції з контролювання якості нафти і нафтопродуктів на підприємствах і організаціях України. *Офіційний вісник України*. 2007. № 50. С. 413.

27. О.О. Мікосянчик, О.Є.Якобчук, Є.В. Педан, Н.М. Березівський. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. Проблеми тертя та зношування, 2023, 2 (99). С.4-13. <https://doi.org/10.18372/0370->

2197.2(99).17611 <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PTZ/article/view/17611>

28. Sutar, K. T. & Singare, P. U. (2018). Study of antioxidant activity of hindered phenols in bulk oil and thin film oxidation conditions in Lubricants. *Rasayan J. Chem.*, 11(2), 465–474.

29. Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України. *Офіційний вісник України*. 2017 р. № 14. С. 444.

30. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing / George E. Totten, Rajesh J. Shah, David R. Forrester. USA, 2019. – P.1900. DOI 10.1520 / MNL37-2ND-EB

31. ДСТУ 4488:2005. Нафта і нафтопродукти. Методи відбирання проб.

32. Єфименко В.В., Кустовська А.Д., Єфіменко О.В, Атаманенко Н.С. Визначення зміни основних показників якості моторної оливи Castrol Magnetec SAE 5w-30 в процесі експлуатації. *Поступ в нафтопереробній та нафтохімічній промисловості*. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. С. 294-298. <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/53956>

33. Chervinsky, T. Grynshyn, O. Prokop, R. Shapoval, P. Korchak, B. Study on the properties of semi-synthetic motor oil castrol 10w-40 after use in a diesel engine *Chem. Chem. Technol.*, 2021, Chemical Vol. 15, No. 3, pp. 432–437. DOI 10.23939/chcht15.03.432 <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85116349340&partnerID=MN8TOARS>

34. Wolak, A., Zając, G., Słowik, T. (2021). Measuring Kinematic Viscosity of Engine Oils: A Comparison of Data Obtained from Four Different Devices. *Sensors*. 21. 2530. <https://doi.org/10.3390/s21072530>.

35. Macián, V.; Tormos, B.; Bastidas, S.; Pérez, T. Improved fleet operation and maintenance through the use of low viscosity engine oils: Fuel economy and oil performance. *Maint. Reliab.* 2020, 22, 201–211. [Google Scholar] [CrossRef]

36. Sejkorová, M.; Šarkan, B.; Caban, J.; Marczuk, A. On relationship between infrared spectra of worn out engine oils and their kinematic viscosity. *Przem. Chem.* 2018, 97, 49–54. [Google Scholar] [CrossRef]

37. Wolak, A. (2018). TBN performance study on a test fleet in real-world driving conditions using present-day engine oils. *Measurement*. 114. 322-331.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.044>.
38. Chikunova, A.S., Vershinin, V.I. (2021). Determining the Total Base Number of Engine Oils Using Potentiometric Titration. *Inorg Mater*. 57. 1440–1446.  
<https://doi.org/10.1134/S002016852114003X>.
39. State Committee for Technical Regulation and Consumer Policy of Ukraine. (2008). [National standardization basic principles]. (DSTU 5094:2008). Kyiv, Derzhpozhystandart Ukraine (in Ukrainian).
40. ASTM International. (2015). ASTM D2896-15. Standard Test Method for Base Number of Petroleum Products by Potentiometric Perchloric Acid Titration.
41. ASTM International (2017). ASTM D4739-17, Standard Test Method for Base Number Determination by Potentiometric Hydrochloric Acid Titration.
42. Sikora, G., Miller, H. (2012). The analysis of changes in total base number and the flash point in the exploited engine oil. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 19(3). 395-398.
43. Niculescu, R., Iorga-Siman, V., Trica, A. & Clenci, A. (2016). Study on the engine oil's wear based on the flash point. *Materials Science and Engineering*, 147 (012124), 12124–12132.
44. Song, B.-H. and Choi, Y.-H. (2008) Investigation of variations of lubricating oil diluted by post-injected fuel for the regeneration of CDPF and its effects on engine wear, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 2526 – 2533
45. ASTM D 5133-15-Standard test method for low temperature, low shear rate, viscosity/temperature dependence of lubricating oils using a temperature- scanning technique. 11. Ziółkowska M, Biernat K (2018) Skłonność olejów silnikowych do tworzenia żelu w niskich temperaturach. *Przemysł Chemiczny* 97(6): 938-941. 12. Urzędowska W, Stępień Z (2012) Wybrane zagadnienia dotyczące zmian właściwości silnikowego oleju smarowego w eksploatacji. *Nafta-Gaz* 68(12): 1102-1110.
46. Бойченко С. В. Визначення факторів, що впливають на величину втрат легких вуглеводнів від випаровування з бензиніву резервуарах горизонталь-них

сталевих / С. В. Бойченко, В. М. Шутко, Н. А. Чернобаєва // Наукоємні технології. – 2014. – № 2(22). – С. 236–239.

47. Бойченко С.В., Причинно-наслідковий взаємозв'язок емісії вуглеводнів і втрат бензинів у горизонтальних резервуарах. Причини, фактори, джерела. *Наукоємні технології*, № 2. 2020. С. 218-235. DOI: [10.18372/2310-5461.46.14810](https://doi.org/10.18372/2310-5461.46.14810)

48. Spaska O. A. Ultralight surface-active systems for preventing liquid hydrocarbons evaporation / O. A. Spaska // *Chemistry and chemical technology*. – 2016, № 1. – P. 63–66.

49. Spaska O. Low density inverted microdispersions to minimize evaporation of hydrocarbons / O. Spaska // Мат. XII Міжн. наук.-техн. конф. «ABIA–2015». – К., 2015. – С. 41.64–41.68.

50. Spas`ka O. Influence of physico-chemical parameters of surface-active systems components for minimization of evaporation of hydrocarbon liquids / Olena Spas`ka, Vitaliy Chumak, Maria Maksymyuk, Vira Rudenko, Olena Kosenko, Evgen Polunkin, Olga Gaidai Olena Spas`ka, Vitaliy Chumak, Maria Maksymyuk, Vira Rudenko, Olena Kosenko, Evgen Polunkin, Olga Gaidai // *Каталіз і нафтохімія*. – №31, 2021. – С.84-91.

51. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikocyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.

52. Мікосянчик О.О. Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи: дис. д-ра техн. наук:05.02.04, Київ, 2017. 416с.

[53.](#) Stelmakh A., Kostyunik R., Mikosianchyk O. et al. Improvement of operational parameters for precision rolling bearings by cleaning working surfaces from micro pollution of various nature. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10(1). P. A31-A40. DOI: [10.21272/jes.2023.10\(1\).a5](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a5)

54. Jiang, H., Hou, X., Ma, Y., Guan, W., Liu, H., Qian, Y. (2022). Elaboration of Ionic Liquids on the Anti-Wear Performance of the Reinforced Steel-Steel Contact

Surface. *Lubricants*. 10, 260. <https://doi.org/10.3390/lubricants10100260>.

55. Restuccia, P., Righi, M. C. (2016). Tribochemistry of graphene on iron and its possible role in lubrication of steel. *Carbon*, 106, pp. 118-124. [doi.org/10.1016/j.carbon.2016.05.025](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.05.025).

56. Rasheed, A. K., Khalid, M., Rashmi, W., Gupta, T. C. S. M., Chan, A. (2016). Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, pp. 346-362. [doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.072](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.072).

57. Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H., Liang, H. (2016). Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 102, pp. 88-98. [doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.020](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.020).

58. Vacher, B., Le Mogne, T. (2014). Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS<sub>2</sub> nanoparticles on friction and wear reduction. *Wear*, 320, pp. 161-178. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.09.001>.

59. Fang, J., Chen, B., Pan, H. (2015). Anomalous friction of graphene nanoribbons on waved graphenes. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 5(6), pp. 212-215. [doi.org/10.1016/j.taml.2015.09.001](https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.09.001).

60. Polunkin E.V., Kameneva T.M., Zhyla R.S. Peculiarities of the antioxidant action of exommodified fullerenes C60 at the oxidation of organic compounds // The International research and practice conference “NANOTECHNOLOGY AND NANOMATERIALS (NANO-2017)”, 23-26 August 2017, Chernivtsi. - P. 778.

61. Csaba Tóth-Nagy, Ádam István Szabó. Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 51(3), pp. 257-262, 2023. [doi.org/10.3311/PPtr.20594](https://doi.org/10.3311/PPtr.20594).

62. Shahnazar, S., Bagheri, S., Hamid, S. B. A. (2016). Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), pp. 3153-3170. [doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040).

63. Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.А., Куш А.І.

Кінетика зношування контактних поверхонь із застосуванням присадки фулерену C<sub>60</sub> до моторної оливи. Журнал тертя та зношування. 2009. 30 (6). С. 399-403.

64. Zhang, Z. J., Simionesie, D., Schaschke, C. (2014). Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants*, 2(2), pp. 44–65. [doi.org/10.3390/lubricants2020044](https://doi.org/10.3390/lubricants2020044).

65. Tóth-Nagy, C., Szabó, Á. I. (2022). Experimental investigation of the friction modifying effects of different nanoforms of graphene additives in engine lubricating oil. *FME Transactions*, 50(2), pp. 248–259. [doi.org/10.5937/fme2201248T](https://doi.org/10.5937/fme2201248T).

66. Csaba Tóth-Nagy, Ádam István Szabó. Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 51(3), pp. 257-262, 2023. [doi.org/10.3311/PPtr.20594](https://doi.org/10.3311/PPtr.20594).

67. Valerii Yefymenko, Tetiana Kravchuk, Oleksandr Yefimenko. Oxidative stability of lubricating materials with fullerene nanoadditives. – К.: *Вісник НАУ*, №1, 2021. Р. 57 - 62. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15445>

68. Оливи. Моторні, турбінні, гідравлічні та трансмісійні: властивості та якість. Підручник / Сергій Бойченко, Андрій Пушак, Петро Топільницький, Йосип Любінін, Казимир Лейда; за редакцією проф. С. Бойченка. – К.: «Центр учбової літератури», 2019. – 323 с. DOI [doi.org/10.18372/38010](https://doi.org/10.18372/38010)

69. Бойченко С.В., Черняк Л.М., Любінін Й.А. та ін. Хімотологія та інженерне забезпечення використання газу і паливно-мастильних матеріалів: навчальний посібник. К.: НАУ, 2014. 276с

70. Оливи. Моторні, турбінні, гідравлічні та трансмісійні: властивості та якість. Підручник / Сергій Бойченко, Андрій Пушак, Петро Топільницький, Йосип Любінін, Казимир Лейда; за редакцією проф. С. Бойченка. – К.: «Центр учбової літератури», 2019. – 323 с. DOI [doi.org/10.18372/38010](https://doi.org/10.18372/38010)

71. Технологія нафти та газу: навчальний посібник. Друге видання /Братичак М.М., Гринишин О.Б. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2013. – 180 с.

72. Технологія первинної переробки нафти і газу: підручник



/П.І.Топільницький, О.Б. Гринишин, О.Я. Мачинський. Львів, Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2014. – 468 с.

73. Pirro, D.M.; Wessol, A.A. *Lubrication Fundamentals*; Marcel Dekker Inc.: New York, NY, USA; Basel, Switzerland, 2001. [[Google Scholar](#)])

74. Tripathi, A.K.; Vinu, R. Characterization of Thermal Stability of Synthetic and Semi-Synthetic Engine Oils. *Lubricants* 2015, 3, 54–79. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

75. Робертс А. Мейерс. Основные процессы нефтепереработки. Справочник: пер.с англ./ Р.А. Мейерс и др., под ред. О.Ф. Глаголевой. – СПб.:, Изд. ЦОП «Профессия», 2011. – 944с.

76. Шпак О.Г. Нафта і нафтопродукти. – К.: Ясон, 2000. – 370 с.

77. Топільницький П.І. Первинна переробка природних і нафтових газів та газоконденсатів: навчальний посібник. Львів, Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 260 с.

78. Aulin, V. V., Slon, V. V., & Kuzyk, O. V. (2012). Zmina fizyko-khimichnykh pokaznykiv motornoj olyvy dyzeliv avtosamoskydiv v protsesi ekspluatatsii. Naukovi pratsi Kirovohradskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia (Part 1), 25, 98–103.

79. Kuznietsova, O. Ya., & Natreba, Zh. M. (2015). Doslidzhennia starinnia mineralnykh hidravlichnykh olyv. I. Fraktsiinyi sklad. Tekhnolohycheskyi audyt y rezervy proyzvodstva, 3/4(23), 64–68.

80. Compendium of recycling and destruction technologies for waste oils. United Nations Environment Programme, 2012. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8601/IETC\\_Waste\\_Oils\\_Compendium.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8601/IETC_Waste_Oils_Compendium.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

81. Rudnick L. R., *Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants: chemistry and technology*, CRC press, 2005 .

82. Pysh'yev S., Lazorko O., Bratychak M.: Chem. Chem. Technol., 2009, 3, 1.

83. Байманова, А.Е. Серосодержащие соединения нефти и основные методы очистки нефти и нефтяных фракций от них: Учебное пособие / А.Е.

Байманова, Г.Ж. Жакупова – Актобе, 2010. – 36 с.

84. Mohammed, R.R., Ibrahim, I.A.R., Taha, A.H., McKay, G. Waste lubricating oil treatment by extraction and adsorption. *Chemical Engineering Journal*. 2013, 220, 343-351. DOI: 10.1016/j.cej.2012.12.076)

85. Бойченко С.В., Новікова В.Ф., Турчак В.М., Медведєва Т.В. Екологічні аспекти визначення вмісту сірки в нафтопродуктах. К.: НАУ, 2010 - №1-с. 1-3

86. Chervinsky T., Grynysyn O., Korchak B.: *Naftogazova Galuz Ukrainy*, 2016, 2, 32

87. Topilnysky P., Paiuk S., Stebelska H., Romanchuk V., Yarmola T. Technological Features of High-Sulfur Heavy Crude Oils Processing. *Chem. Chem. Technol.* 2019, № 13, P. 503-509. doi: 10.23939/chcht13.04.503

88. Topilnysky P., Romanchuk V., Yarmola T., Stebelska H. Study on Rheological Properties of Extra-Heavy Crude Oil from Fields of Ukraine. *Chem. Chem. Technol.* 2020, № 14, P. 412-419. doi: 10.23939/chcht14.03.412

89. Z. Wang, M. Fingas, D.S. Page Oil spill identification *J Chromatogr A*, 843 (1999), pp. 369-411

90. Nagursky A., Khlibyshyn Yu., Grynysyn O., Kochubei V. Rubber Crumb Modified Bitumen Produced from Crude Oils Residuals of Ukrainian Deposits. *Chem. Chem. Technol.* 2020, № 14, P. 420-425. doi: 10.23939/chcht14.03.420

91. Topilnysky P., Yarmola T., Romanchuk V., Kucinska-Lipka Ju. Peculiarities of Dewatering Technology for Heavy High-Viscosity Crude Oils of Eastern Region of Ukraine. *Chem. Chem. Technol.* 2021, № 15, P. 423-431. doi:10.23939/chcht15.03.423

92. Korchak B., Hrynysyn O., Chervinsky T., Polyuzhin I. Application of Vacuum Distillation for the Used Mineral Oils Recycling. *Chem. Chem. Technol.* 2018, № 12, P. 365-371. doi: 10.23939/chcht12.03.365

93. Deef-Allah E., Abdelrahman M., Fitch M., Ragab M., Bose M., He Xi. Balancing the Performance and Environmental Concerns of Used Motor Oil as Rejuvenator in Asphalt Mixes. *Recycling*. 2019. № 11. P. 1-27. doi:10.3390/recycling4010011



94. Jafari, A.J., Hassanpour, M. Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 103, 179–191. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.026

95. Топільницький П.І., Гринишин О.Б. Гідрокрекінг: монографія. Львів, Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2011. – 347 с.

96. Kanokkantapong, V., Kiatkittipong, W., Panyapinyopol, B., Wongsuchoto, P., Pavasant, P. (2009). Used lubricating oil management options based on life cycle thinking. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(5), 294– 299. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.01.002

97. Abu-Elella, R., Ossman, M. E. Farouq, R., Abd-Elfatah, M. Used motor oil treatment: turning waste oil into valuable products. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 2015, 7, 57–67.

98. Беженар В.П. Хімія і технологія неорганічних речовин: навчально-методичний посібник. – Івано-Франківськ: Вид-во Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2011-217 с.

99. Червінський, О.Б. Гринишин, Б.О. Корчак. Нафтогазова галузь України, №2. 2016 р. С.32-34

100. Tung, S., Kinker, B., Woydt, M. Automotive lubricant testing and additive developmen. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2008. 143 p

101. Tung, S., Kinker, B., Woydt, M. Automotive lubricant testing and additive developmen. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2008. 143 p.

102. Boadu K. O., Joel O. F., Essumang D. K., Evbuomwan B. O. A Review of Methods for Removal of Contaminants in Used Lubricating Oil. *Chemical Science International Journal*. 2019. № 4. P. 1-11. doi: 10.9734/CSJI/2019/v26i430101

103. Курта С.А. Основи нафтохімії / Сергій Андрійович Курта — Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2020 —193 с.

104. Спеціальне обладнання та процеси органічної хімії: Підручник / Шапоров В.П., Пляцук Л.Д., Моїсєєв В.Ф., Пітак І.В., Манойло Є.В., Васильєв М.І., Кузнєцов П.В./– Харків:, 2013.– 272с.

105. Мазепа В. О. Обґрунтування експлуатаційних вимог до підбору та експлуатації моторних олив по технічному стану в засобах транспорту: Автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація і ремонт засобів транспорту». — К., 2007. 17 с.

106. Owrang, F.; Mattsson, H.; Olsson, J.; Pedersen, J. Investigation of oxidation of a mineral and a synthetic engine oil. *Thermochim. Acta*, 2004. 413, 241–248..

107. Vigdorovich, V.I., Knyazeva, L.G., Tsygankova, L.E. *et al.* Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials. *Chem Technol Fuels Oils* **55**, 412–423 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10553-019-01046-0>

108. Топільницький П.І., Журба В.А., Максимик В.Я. Характеристика моторних олив зарубіжного виробництва. Львів, Видавництво Держ. університету «Львівська політехніка», 1999. – 166 с.:

109. Робертс А. Мейєрс. Основные процессы нефтепереработки. Справочник: пер.с англ./ Р.А. Мейєрс и др., под ред. О.Ф. Глаголевой. – СПб., Изд. ЦОП «Профессия», 2011. – 944с.

110. Топільницький П.І., Журба В.А., Максимик В.Я. Характеристика моторних олив зарубіжного виробництва. Львів, Видавництво Держ. університету «Львівська політехніка», 1999. – 166 с.:

111. Deef-Allah E., Abdelrahman M. Effect of Used Motor Oil as a Rejuvenator on Crumb Rubber Modifier's Released Components to Asphalt Binder. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*. 2020. № 10. P. 1-28. doi: 10.1177/1477760620918600

112. Олива для автоматичних коробок передач з використанням як компонента ріпакової олії / М.М. Дец, Н.М. Назарчук // Катализ и нефтехимия. — 2001. — № 9-10. — С. 65-66.

113. Boyde, S. 2002, High performance lubricants from renewables. In *Lipid Technology Newsletter*, PJ Barnes & Associates, June2002 , pp. 61–65.

114. Iakovlieva, A., Vovk, O., Boichenko, S., Lejda, K., Kuszewski, H. (2016). Physical-Chemical Properties of Jet Fuel Blends with Components Derived from Rape Oil. *Chemistry & Chemical Technology*, 10 (4), 485–492.

doi:<https://doi.org/10.23939/chcht10.04.485>.

115. Lapuerta, M., Canoira, L. (2016). The Suitability of Fatty Acid Methyl Esters (FAME) as Blending Agents in Jet A-1. *Biofuels for Aviation*, 47–84. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804568-8.00004-4>.

116. Kubitsche, J. , Lange, H. , and Strutz, H. , 2014, Carboxylic Acids, Aliphatic, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, Published Online: May 30, 2014, doi:10.1002/14356007.a05\_235.pub2.

117. Johnson, R. W. , Pollock, C. M. , and Cantrell, R. C. , 2010, Dicarboxylic acids. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, Published Online: September 17, 2010, doi: 0.1002/0471238961.0409030110150814.a01.pub2.

118. Jinlong Wu, Bo Li, Wei Wang, Shu Yang, Peng Liu, Bo Zhang, Changyan Yang, Yigang Ding. Green Refining of Waste Lubricating Oil: A China Perspective. *Trends in Renewable Energy*. 2019. No. 2. P. 165-180. doi: 10.17737/tre.2019.5.2.0084

119. Кадикало Е. М. Хімія ліпідів. Конспект лекцій: вибрані теми. Луцьк: П “Зоря–плюс” BOO BOI COIY, 2023. 81 с.

120. Misozi D., Victor M., Ebelia M., Tina Ch. Mineral Base Oil Recovery from Waste Lubricant Grease. *Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment*. 2018. № 1. P. 1-7. doi:10.4314/rjeste.v1i1.7S

121. Переэтерификация и этерификация триглицеридов для улучшения их свойств на углеродных катализаторах / Ставицкая С.С., Федоришина А.С., Стрелко В.В. // УХЖ. – 2016. – Т. 82, № 1–2. – С. 84–90.

122. Lei Wei, Haitao Duan, Dan Jia, Yongliang Jin, Song Chen, Lian Liu, Jianfang Liu, Xianming Sun, Jian Li. Motor oil condition evaluation based on on-board diagnostic system. *Friction*. 2018. № 1. P. 1-12. doi:10.1007/s40544-018-0248-0

123. Переэтерификация и этерификация триглицеридов для улучшения их свойств на углеродных катализаторах / Ставицкая С.С., Федоришина А.С., Стрелко В.В. // УХЖ. – 2016. – Т. 82, № 1–2. – С. 84–90.

124. Pinheiro C., Quina M., Gando-Ferreira L. Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach. *Critical Reviews in Environmental Science*

and Technology. 2020. P. 1-36. doi: 10.1080/10643389.2020.1771887

125. Sejkorová M., Hurtová I., Jilek P., Novák M., Voltr O. Study of the Effect of Physicochemical Degradation and Contamination of Motor Oils on Their Lubricity. *Coatings* 2021, № 11, P. 60. doi: 10.3390/coatings11010060

126. Bratychak M.M., Hun'ka V.M. *Khimiya nafty i hazu*. L.: Vydavnytstvo NU «L'vivs'ka politekhnika», 2020. 446 p.

127. Hrynyshyn O., Korchak B., Chervinsky T., Kochubei V. Change in properties of M-10DM mineral motor oil after its using in the diesel engine. *Chem. Chem. Technol.* 2017, № 3, P. 387-391. doi: 10.23939/chcht11.03.387

128. Chervinsky T., Grynishyn O., Prokop R., Shapoval P, Korchak B. Study on the Properties of Semi-Synthetic Motor Oil Castrol 10W-40 after Use in a Diesel Engine. *Chem. Chem. Technol.* 2021, № 3, P. 432-437. doi:10.23939/chcht15.03.432

129. Nikolakopoulos P., Mavroudis S., Zavos A.: *Lubricants*, 2018, 6, 90. <https://doi.org/10.3390/lubricants6040090>

130. Liang Z., Chen L., Alam M. et al.: *Fuel*, 2018, 220, 792. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.142>

131. Шевченко А.А. Применение присадок, их виды и классификация / А.А. Шевченко // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2017. – Вып. 1 (37).

132. Tripathi A., Vinu R. :*Lubricants*, 2015, 3, 54. <https://doi.org/10.3390/lubricants301054>

133. Syed, R. Lubricant additives. In *A Comprehensive Review of Lubricants Chemistry, Technology, Selection, and Design*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2009.

134. Шевченко О.О. Застосування присадок, їх види та класифікація / О.О. Шевченко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2017. – Вип. 1 (37).

135. Мікосянчик О.О. Оцінка триботехнічних параметрів мастильних матеріалів при граничному мащенні в умовах локального контакту: дис. канд.

техн. наук : 05.02.04 / О. О. Мікосянчик. — Київ: [б. в.], 2006. — 231с.

136. Бойченко С.В., Черняк Л.М., Новикова В.Ф. та ін. Контроль якості паливно-мастильних матеріалів: навчальний посібник. К.: НАУ, 2012. 308с.

137. Гуменецький В. процеси та обладнання нафтопереробних заводів. Львів, Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. — 260 с.

138. Бойченко С.В., Черняк Л.М., Новикова В.Ф. та ін. Контроль якості паливно-мастильних матеріалів: навчальний посібник. К.: НАУ, 2012. 308с.

139. B Korchak, O Grynysyn, T Chervinsky, P Shapoval, A Nagursky. [Thermooxidative Regeneration of Used Mineral Motor Oils](#). Chem. Chem. Technol Vol.14, No. 1, 2020 pp. 129-134.

140. БО Корчак, ОБ Гринишин, ТІ Червінський. [Зміна складу та властивостей мінеральної моторної оливи після її експлуатації](#). Науковий вісник НЛТУ України 27 (6), 2017 93-97

141. ТІ Червінський, ОБ Гринишин, БО Корчак. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Хімія, технологія речовин та їх застосування. 812. 2015. С. 158-162.

142. S Pyshyev, B Korchak, D Miroshnichenko, BB Nyakuma. [Study on Chemistry of Oxidative Desulfurization Process of High Sulfur Straight-Run Oil Fraction](#). Chem. Chem. Technol 15, 414-422.

143. B Korchak, O Grynysyn, T Chervinsky, A Nagursky, V Stadnik. [Integrated regeneration method for used mineral motor oils](#). Chemistry and Chemical Technology 15 (2), 239-246.

144. S Pyshyev, B Korchak, D Miroshnichenko, N Vytrykush. [Influence of Water on Noncatalytic Oxidative Desulfurization of High-Sulfur Straight-Run Oil Fractions](#). ACS omega 7 (30), 26495-26503.+

145. Stöhr, T., Eisenberg, B., Müller, M.: A new generation of high performance viscosity modifiers based on comb polymers. SAE Int. J. Fuels Lubr. **1**(2008–01–2462), 1511–1516 (2008)

146. Zakarian, J.: The limitations of the viscosity index and proposals for other

methods to rate viscosity–temperature behavior of lubricating oils. *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 5, 1123–1131 (2012)

147. Magerramov A.M., Akhmedova R.A., Akhmedova N.F. *Petrochemistry and Oil Refining: A Textbook for Higher Educational Institutions*, Baku: Baki Universiteti, (2009)

148. Alimova Z. Research of change of quality of motor oils when operating the engine and improving their. *Industrial Technology and Engineering.* 3 (36), pp.11-17, (2020)

149. Ostrikov V.V., Kleimenov O.A., Bautin V.M. *Lubricants and their quality control in the agro-industrial complex* - M.: Rosinformatekh, p. 172, (2008)

150. Alimova Z. Improvement of properties of oils used in hydraulic systems of roadconstruction equipment/ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 883, p. 012167, (2020)

151.M.L. Zheludkevich, D.G. Shchukin, K.A. Yasakau, H. Möhwald, M.G.S. Ferreira Anticorrosion coatings with self-healing effect based on nanocontainers impregnated with corrosion inhibitor *Chem. Mater.*, 19 (2007), pp. 402-411, 10.1021/cm062066k)

152. Owrang, F.; Mattsson, H.; Olsson, J.; Pedersen, J. Investigation of oxidation of a mineral and a synthetic engine oil. *Thermochim. Acta* 2004, 413, 241–248.

153. Окоча А. І. Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали : довідник. / А. І. Окоча, Білоконь Я. Ю. – К. : Агорап Медіа Груп, 2012. – 201 с..

154. Pfaendtner, J.; Broadbelt, L.J. Mechanistic modelling of lubricant degradation. 1. Structure-reactivity relationships for free-radical oxidation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, 47, 2886–2896.

155. Ahmed S.M., Khidr T.T., Ismail D.A. (2018) Effect of gemini surfactant additives on pour point depressant of crude oil, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39:8, 1160- 1164, DOI: 10.1080/01932691.2017.1385483.

156. Deepika. Nanotechnology implications for high performance lubricants. *SN Appl. Sci.* 2, 1128 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2916-8>

157. Сушко О.В. Компоненти змащувальних масел та вплив фракційного

складу на їх фізико-хімічні і трибо технічні показники. Таврійський державний агротехнологічний університет. – С. 2-3.

158.D.R. Worton, G. Isaacman, D.R. Gentner, T.R. Dallmann, A.W.H. Chan, C. Ruehl, *et al.* Lubricating oil dominates primary organic aerosol emissions from motor vehicles. *Environ Sci Technol*, 48 (2014), pp. 3698-3706

159. Окоча А.І. Моторні оливи вітчизняні та імпортовані: класифікація, позначення, взаємозамінність, рекомендації // Аграрна техніка та обладнання. — 2009. — № 1 (6). — С. 54—59.

160. S. Brandenberger, M. Mohr, K. Grob, H.P. Neukom Contribution of unburned lubricating oil and diesel fuel to particulate emission from passenger cars *Atmos Environ*, 39 (2005), pp. 6985-6994

161. Бойченко С.В., Спіркін В.Г. Вступ до хімотології палив та олив. / У двох частинах. За ред. І.Г. Фукса. – Одеса, Астропринт, 2009, 2010.

162. Андрієшин М.П., Марчук Я.С., Бойченко С.В. та ін. Газ природний, палива та оливи. – Одеса, Астропринт, 2010. – 232с.

163. B.A. Grigor'ev, N.A. Ovchinnikov. The density of petroleum products in a wide range of parameters of state. *Thermophysical Properties of Materials*, 2010; 48: 47–51.

164. Білінський Й.Й. Аналіз методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів. *Наукові праці ВНТУ*. – 2016. - № 2. – 1-13.

165. Shichun Feng, Dexin Kong, Chunfeng Wang, Linyuan Guo, Dong Jin. Comparison and Summary of Two Methods for Determination of Kinematic Viscosity of Organic Heat Carriers in Different Laboratories. *E3S Web of Conferences*, 2020; 185:

166. A. Soltani, A. Nozarpour, S. F. Aghamiri. Prediction of the Kinematic Viscosity of Crude Oil Fractions. *Petroleum Science and Technology*, 2010; 28, (6): 646-653.

167. D.V. Boldyrev, B.A. Grigoriev, A.A. Evdokimov, A.I. Koldaev. Prediction the Liquid Petroleum Products Viscosity. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2022; 979: 1-6.

168. Jack Zakarian. The Limitations of the Viscosity Index and Proposals for

Other Methods to Rate Viscosity-Temperature Behavior of Lubricating Oils. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2012; 5(3):1123-1131.

169. Grzegorz Sikora, Andrzej Miszczak. The Influence of Oil Ageing on the Change of Viscosity and Lubricity of Engine Oil. *Solid State Phenomena*, 2013; 199: 182-187.

170. A. U. Stelmakh, R. E. Kostunika, V. A. Radzievskiya, A. L. Maystrenko, S. V. Sokhan, V. G. Kulich, and O. V. Evdokimova. The Tribology of Ceramics–Steel Hybrid Sliding Friction Pairs under Different Greasing Conditions. *Journal of Friction and Wear*, 2020, Vol. 41, No. 2, pp. 183–189.

171. A. U. Stelmakh, R. E. Kostunik, V. A. Radzievskiy, A. L. Maystrenko, S. V. Sokhan, and V. G. Kulich. Rolling Friction of Hybrid Ceramic–Steel Pairs under Different Lubrication Conditions. *Journal of Friction and Wear*, 2020, Vol. 41, No. 5, pp. 432–442.

172. A. S. Vasylchuk, A. L. Maystrenko, G. A. Petasyuk, E. P. Vynohradova, G. D. Ilitska, N. A. Oleinyk, O. I. Zakutevskyi, A. P. Zakora, and A. S. Manohin.. Wear of Diamond Composite Materials during Rock Destruction. *Journal of Friction and Wear*, 2021, Vol. 42, No. 6, pp. 454–460.

173. Valerij Yefymenco, Nataliia Kalmykova, Tetiana Kravchuk, Mykola Kravchuk, Roman Zhyla,. Change in the main indicators of oil quality in the processes of operation of Airbus H-145 Helicopters. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2023, 31(3), p.p. 642-650. <http://chemistry.dnu.dp.ua/issue/view/16907>

174. Єфименко В. В., Олександренко В. П., Калмикова Н. Г. Руденко В. М., Єфіменко О. В. Перспективи застосування фулеренових присадок у сучасних авіаційних оливах. Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях», Вісник НТУ «ХПІ», 3 (17), 2023. С.17-25. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.03, <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

175. V. P. Oleksandrenko, V. V. Yefymenko, N. G. Kalmykova, O. V. Efimenko. Resistant Properties of Lubricating Materials with Fullerene Nanoadditives. *Problems of Tribology*, V. 28, No 2/108-2023. P. 28-36. <http://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib>,



<https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/912/1366>,

<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36>

176. Бойченко С. В., Калмикова Н. Г. Причинно-наслідковий взаємозв'язок емісії вуглеводнів і втрат бензинів у горизонтальних резервуарах. Причини, фактори, джерела. *Наукоємні технології*, № 2. 2020. С. 218-235.

DOI: [10.18372/2310-5461.46.14810](https://doi.org/10.18372/2310-5461.46.14810)

177. Бойченко С. В. Яковлєва А. В. Калмикова Н. Г. Технології запобігання втратам (емісії) вуглеводнів з паливних баків транспортних засобів. *Технічні науки*, № 3. 2021. С. 22-34. DOI: 10.33744/2308-6645-2021-3-50-022-034

178. Environment Accounts and Statistics Analytical and Technical Paper Series Gasolina Evaporative Losses from Retail Gasolina Outlets Across. Canada, 2009.

179. Дорошенко Ю. І. Люта Н. В. Огляд сучасних методик розрахунку втрат нафтопродуктів від випаровування за умов зберігання у наземних резервуарах. Нафтогазова інженерія. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2012. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/2437>

180. Ciolek Michael Emission Factor Documentation for AP42, Organic liquid storage tanks, September, 2006.

181. Бойченко С. В. Метод определения потерь топлив от испарения. Вісник КМУЦА. 2000. № 2. С. 237–243.

182. Хімотологія: Навч.-метод. посібник / С. В. Бойченко, Н. М. Кучма, В. В. Єфименко, О. С. Тітова, Л. М. Черняк. – К.: Книжк. вид-во НАУ, 2006. – 156 с.

183. Бойченко С. В., Калмикова Н. Г. Джерела втрат нафтопродуктів під час різних технологічних операцій з ними // Матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні технології переробки паливних копалин». - Харків, 16-17 квітня 2020.- С. 44-47.

184. Magaril, E. Improving car environmental and operational characteristics using a multifunctional fuel additive. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 147, WIT Press: UK, 2011. Pp. 373–384.

185. Marwan M. Farhan, Muthana M. Al-Jumaily, Ahmed D. Al-Muhammadi, Ali S. Ismail. Development of a New Method for Reducing the Loss of Light

Hydrocarbons at Breather Valve of Oil Tanks. *Energy Procedia*. 2017. Pages 471–478.

186. Magaril E. Reducing gasoline loss from evaporation by the introduction of a Surface-active fuel additive” *WIT Transactions on The Built Environment*. WIT Press. 2015. P. 233–242.

187. Бойченко С. В., Калмикова Н. Г. Екологічні та токсичні наслідки втрат вуглеводнів внаслідок випаровування. Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «*Екологічна безпека держави*». Київ, 23 квітня 2020 року, С.12.

188. Спаська О. А., Іванов С. В. Мінімізація втрат легких фракцій вуглеводневих рідин від аеродисипації стабілізованими плівкоутворюючими ПАР. *Вопросы химии и химической технологии*. 2011. № 1. С. 74–77.

189. API Manual of Petroleum Measurement Standarts, Chapter 19.4/ Recommended Practice for Speciation of Evaporative Losses, Second Edition, September, 2005.

190. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Emissions from Storage. Joint Research Centre, Institute of Prospective Technological Studies, EIPPCB. 2006. July.

191. Magaril E. Reducing gasoline loss from evaporation by the introduction of a Surface-active fuel additive. *WIT Transactions on The Built Environment*. Vol. 146. 2015. WIT Press, doi:10.2495/UT150181

## ДОДАТКИ

«УЗГОДЖЕНО»

Проректор з навчальної роботи

 Анатолій ПОЛУХІН  
«10» грудня 2022 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор НАУ

 Максим ЛУЦЬКИЙ  
«10» грудня 2022 р.

## АКТ

упровадження виконаної науково-дослідної та  
дослідно-конструкторської роботи у навчальний процес  
Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписались, декан факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій доктор технічних наук, професор Матвєєва І.В., завідувач кафедри хімії і хімічної технології, кандидат хімічних наук, доцент Кустовська А. Д., кандидат технічних наук, доцент Єфименко В.В., аспірантка кафедри хімії і хімічної технології Калмикова Н.Г., склали цей акт про те, що результати наукових випробувань за темою: «Динаміка показників якості олиव у процесі експлуатації гелікоптерів Airbus Helicopters H-145» використовуються в навчальному процесі на кафедрі хімії і хімічної технології факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Національного авіаційного університету при викладанні дисциплін «Контроль та управління якістю продукції в галузі», «Аналіз нафтопродуктів» та «Технології виробництва та використання палив, змащувальних матеріалів, спеціальних рідин для автомобільної, авіаційної та ракетної техніки».

Назва наукового дослідження, що впроваджується	Форма впровадження	Результати впровадження
Зміна показників якості палив та олив у процесі експлуатації	Лекції, лабораторні роботи	Дозволяє поглибити наукове пізнання сутності процесів, які впливають на зміну показників якості палив та олив у реальних умовах експлуатації

Декан факультету екологічної безпеки,  
інженерії та технологій д.т.н, професор

 Ірина МАТВЄЄВА

Зав. кафедри хімії і хімічної  
технології, к.х.н., доцент

 Антоніна КУСТОВСЬКА

К.т.н., доцент кафедри хімії і  
хімічної технології

 Валерій СФИМЕНКО

Аспірантка кафедри хімії і хімічної технології

 Наталія КАЛМИКОВА