

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Одеська морська академія»

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Разінкін Роман Олександрович

УДК 629.5

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# **РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ МОТОРНОГО МАСТИЛА**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

\_\_\_\_\_ Роман РАЗІНКІН

Науковий керівник:  
Чимшир Валентин Іванович,  
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2026

## АНОТАЦІЯ

Разінкін Р.О. Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2026.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми – забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів суден морського транспорту.

Підставою проведення наукових досліджень стали наступні **запити практики**:

- забезпечення регламентованого фірмою-виробником ресурсу експлуатації дизеля суден морського транспорту;
- забезпечення мащення контактних поверхонь основних вузлів дизелів, що виконують функції головних та допоміжних двигунів на судах морського транспорту;
- вдосконалення методики проведення діагностики експлуатаційних характеристик судових моторних мастил, що використовуються в системах циліндрового та циркуляційного мащення дизелів морських суден.

**Головне завдання наукового дослідження** полягає у вдосконаленні методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила.

Розв'язання головного завдання дисертаційного дослідження здійснено за рахунок розв'язання наступних **допоміжних завдань**:

- 1) визначення якісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів;

2) визначення кількісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів;

3) аналіз зміни ресурсозберігаючих показників судових дизелів за різних умов їхньої експлуатації.

У результаті розв'язання головного та допоміжних завдань сформульовано **наукове положення**: забезпечення ресурсу роботи судових дизелів досягається шляхом управління експлуатаційними характеристиками судових моторних мастил, що використовуються в їхніх системах циліндрового та циркуляційного мащення (а саме, градієнтом зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкістю зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі).

**Наукова новизна** роботи полягає в тому, що ресурсозберігаюча експлуатація дизелів суден морського транспорту забезпечується діагностикою та керованим впливом на експлуатаційні характеристики моторних мастил систем мащення: циліндрової для двотактних дизелів або циркуляційної для чотиритактних, що полягає в управлінні градієнтом швидкості зміни загального лужного числа моторного мастила та швидкістю зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі.

Наукове положення обґрунтовано **науковими результатами**.

**Вперше:**

- запропоновано якісним критерієм моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів, визначати градієнт зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила;

- запропоновано кількісним критерієм моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів, визначати швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі;

- визначені критичні значення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі, запобігання яких забезпечує ресурсозберігаючу експлуатацію дизелів суден морського транспорту.

**Удосконалено:**

- технологію визначення часових рядів під час діагностування експлуатаційних характеристик моторних мастил систем циліндрового та циркуляційного мащення дизелів суден морського транспорту;

- технологію проведення спектрографічних досліджень складових моторного мастила, що характеризують знос контактних поверхонь судових дизелів та забруднення моторного мастила;

**Отримала подальший розвиток:**

- технологія визначення загального лужного числа та концентрації металевих домішок у моторних мастилах, що використовуються в системах циліндрового та циркуляційного мащення дизелів суден морського транспорту.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в наступному:

- моніторинг моторного мастила шляхом визначення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі призводить до встановлення необхідної подачі моторного мастила в циліндр дизеля (щодо системи циліндрового мащення) та до виконання своєчасного поповнення обсягу моторного мастила (щодо системи циркуляційного мащення); обидві дії сприяють забезпеченню ресурсозберігаючої експлуатації дизелів суден морського транспорту;

- проведення мобільної спектрографії моторного мастила та визначення складових, що характеризують знос контактних поверхонь та забруднення моторного мастила продуктами згоряння палива, забезпечує прискорене отримання інформації щодо стану деталей дизеля, а також перебігу робочого циклу в циліндрі, що сприяє своєчасному прийняттю рішень стосовно забезпечення процесів згоряння, мащення та охолодження;

- контроль та управління термодинамічними процесами мащення та охолодження деталей дизеля під час зміни елементного складу палива сприяє підтриманню ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів, що

виявляється в зменшенні зносу їхніх основних контактних вузлів: циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників.

### **Результати дисертаційного дослідження впроваджені:**

- технологія визначення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкості зміни концентрації металевих домішок в моторному мастилі – на дизелі 6S50ME-C9.7 MAN-B&W, а також на суднових дизелях 6DE-18 Daihatsu Diesel, що використовувались як головний та допоміжні на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 63580 тонн (при цьому було досягнуте 2,5...6,8 % зниження витрат моторного мастила системи циліндрового мащення дизелів та 4,8...8,3 % зниження витрат моторного мастила системи циркуляційного мащення дизелів);

- технологія визначення часових рядів під час діагностування експлуатаційних характеристик моторних мастил систем циліндрового мащення – на судновому дизелі 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та систем циркуляційного мащення – на суднових дизелях 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo (при цьому було забезпечено зменшення зносу контактних поверхонь дизеля, що підтверджувалось зниженням концентрації металевих домішок у пробах моторного мастила, які відбирались з підпоршневого простору та картеру дизелів);

- послідовність проведення мобільного спектрографічного аналізу моторного мастила системи циркуляційного мащення – на суднових дизелях 6R26 Wartsila (що прискорило прийняття рішень з управління режимами мащення та сприяло 4,6...9,3 % зниженню витрат моторного мастила та покращенню технічного стану контактних поверхонь дизеля);

- в освітньому процесі Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», а саме:

послідовність проведення експериментальних досліджень з визначення основних показників робочого циклу дизеля – під час викладання освітнього компонента «Суднові двигуни внутрішнього згорання»;

алгоритм діагностики технічного стану контактних поверхонь судових дизелів за аналізом експлуатаційних показників моторного мастила систем циліндрового та циркуляційного мащення – під час викладання освітнього компонента «Технічне обслуговування, діагностика та ремонт судових технічних засобів»;

алгоритм управління подачею мастила системи циліндрового мащення та алгоритм поповнення обсягу мастила циркуляційної системи мащення – під час викладання освітнього компонента «Технологія використання робочих речовин».

**Ключові слова:** вкладиш підшипника, діагностування, експлуатаційні показники, експлуатація, ефективність, загальне лужне число, знос, методика, металеві домішки, морський транспорт, моторне мастило, надійність, підшипники ковзання, поршень, поршневе кільце, регулювання, ремонт, ресурс, ресурсозбереження, система мащення, судовий дизель, транспорт, управління, циліндрова група.

### **Список опублікованих праць за темою дисертації**

Статті в наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії:

1. Разнікін Р.О. Діагностування технічного стану судових дизелів за аналізом моторної оливи // Розвиток транспорту. – 2025. – Вип. 4(27). – С. 82-93. <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.06>.
2. Разнікін Р.О. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів шляхом діагностування моторного мастила // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 3(44). – С. 241-255. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.43.24](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.43.24).
3. Чимшир В.І., Разнікін Р.О. Аналіз показників системи діагностування моторного мастила судових довгоходових дизелів // Суднові енергетичні

установки: науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 94-106. DOI: 10.31653/51.2025.94-106.

4. Сагін С.В., Куропятник О.А., Разінкін Р.О. Визначення впливу системи рециркуляції випускних газів на експлуатаційні показники роботи суднового малообертового дизеля // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 49. – С. 124-136. doi: DOI: 10.31653/smf49.2024.124-136.

5. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – С. 157-171. doi: 10.31653/smf47.2023.157-171.

Статті в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science:

6. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13(3). – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.

7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

Розділ у колективній монографії:

8. Разінкін Р.О. Імітаційна модель накопичення продуктів зносу у відпрацьованій циліндровій оливі // Колективна монографія «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», за редакцією В. Чимшир. – Ізмаїл: ДІ НУ «ОМА», 2020 – Київ: Міленіум, 2020.

– С. 182-193. ISBN 978-966-8063-81-6. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf>.

#### Статті у збірках матеріалів наукових конференцій

9. Разінкін Р.О. Використання імітаційного статистичного аналізу даних під час діагностування технічного стану дизелів суден морського транспорту // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 19-20 березня 2026 р., НУОМА. – С. 69-75.

10. Разінкін Р.О. Забезпечення ефективності експлуатації циркуляційних систем мащення судових чотиритактних дизелів // Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», ДІ НУОМА – 2025, 5-6 грудня 2025 р. Ізмаїл. – С. 210-213.

11. Разінкін Р.О. Діагностування стану циліндрової групи та підшипників ковзання судових дизелів за аналізом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Збірка матеріалів VI міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2025, 5 грудня 2025 р. – Київ: Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, 2025. – С. 43-46.

12. Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Забезпечення експлуатаційних показників моторних мастил судових дизелів // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2025)», 03–04 грудня 2025 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. – С. 264-268.

13. Разінкін Р.О. Підвищення ефективності процесу мащення підшипникових вузлів судових дизелів // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2025)», 03–04 грудня 2025 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. – С. 242-244.

14. Разінкін Р.О. Огляд способів підвищення надійності втулок циліндрів судових дизелів // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУОМА, 2025. – С.179-183 <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEEEA-2025.26.11.25.pdf>.

15. Разінкін Р.О. Контроль технічного стану циліндрової групи судових малообертових дизелів // V науково-технічна конференція молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», 26.11.2025 – Одеса: НУОМА, 2025. – С.46-48. <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/IandTMIWT-2025.26.11.25.pdf>.

16. Разінкін Р.О., Шумейко М.С. Перспективи використання аміаку як палива для морського транспорту // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУОМА, 6-7 грудня 2024 р. – С. 163-165. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14560948>.

17. Razinkin R. Utilising of methanol as marine fuel // Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2023 р. – С. 185-187. [https://drive.google.com/file/d/1NObPGGddzTIE1ytFS0hRD5z6\\_q\\_FeyQO/view](https://drive.google.com/file/d/1NObPGGddzTIE1ytFS0hRD5z6_q_FeyQO/view).

18. Разінкін Р.О. Аналіз впливу низькосірчаного палива на систему лубрикації СДВЗ та превентивні заходи зі зменшення зносу деталей ЦПГ // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 21 квітня 2023 року. – С. 70-73. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/zbyrnyk210423.pdf>.

19. Разінкін Р.О. Вплив на показники роботи СДВЗ в умовах підвищених зовнішніх збурень // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів

транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2022 р. – С. 106-109. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/conf20122022.pdf>.

20. Разінкін Р.О. Особливості експлуатації двохтактних малооборотних ДВЗ на ULSFO (<0.1% S) // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 28 червня 2021 року. – С. 71-73.

21. Лихогляд К.А., Разінкін Р.О., Журавльов С.В. Альтернативні види палива. Метанол та диметилловий ефір у якості заміників палива для ДВЗ // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 3-4 грудня 2020 р. – С. 253-256. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/12/tezy041220.pdf>.

22. Razinkin R. Analysis of the possibility for the development of four-cycle engines man for the cruise fleet // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 6-7 грудня 2018 р. – С. 191-193. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2018/12/mnpk9.pdf>.

23. Разінкін Р.О., Найдьонов А.І. Ресурсозберігаюча експлуатація судових дизелів на основі трибомоніторингу моторного мастила // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку морської галузі, безпека судноплавства, підготовка моряків у відповідності до національних і міжнародних вимог», 25 травня 2018 р. – Маріуполь: АМІ НУ «ОМА». – С. 229-232.

24. Разінкін Р.О. Ресурсозберігаюча експлуатація судових дизелів на основі трибомоніторингу моторного мастила // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 7 грудня 2017 р. – С. 196-199. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2018/12/mnpk8.pdf>.

З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, автору належать особисто:

[3] – розробка та погодження технології проведення експериментів, проведення експериментальних досліджень, обробка результатів експерименту та корегування технології проведення експерименту;

[4] – проведення інформаційного пошуку, обробка результатів експерименту, розробка рекомендацій щодо подальших досліджень;

[5] – проведення інформаційного пошуку, розробка та погодження технології проведення експериментів, обробка результатів експерименту;

[12] – проведення інформаційного пошуку, розробка та погодження технології проведення експериментів, виконання експериментальних досліджень та аналіз їхніх результатів;

[6], [7] – проведення інформаційного пошуку, розробка рекомендації щодо модернізації суднової паливної системи, організація проведення експериментальних досліджень, погодження технології проведення досліджень з наглядовими організаціями, обробка та аналіз результатів експерименту;

[16] – проведення інформаційного та патентного пошуку;

[21] – теоретичний аналіз можливості використання в суднових дизелях палив різного складу, розробка рекомендацій щодо переналаштування паливної апаратури високого тиску під час зміни сортів палива;

[23] – контроль та регулювання показників роботи суднового дизеля, проведення трибомоніторингу моторного мастила, обробка результатів випробувань, розробка рекомендацій щодо подальших досліджень.

## ANNOTATION

Razinkin R.O. Development of a methodology for resource-saving operation of marine diesel engines based on a motor lubricant diagnostic system.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.22.20 “Maintenance and Repair of Transport Means”. National University “Odessa Maritime Academy” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2026.

The dissertation research addresses a scientific and applied problem: the development of a methodology for resource-saving operation of marine diesel engines based on a motor lubricant diagnostic system.

This research responds to contemporary **practical demands**, including:

- ensuring the manufacturer-specified service life of marine diesel engines;
- ensuring lubrication of the contact surfaces of the main components of diesel engines that perform the functions of main and auxiliary engines on marine vessels;
- improving the methodology for diagnosing the operational characteristics of marine motor lubricants used in cylinder and circulating lubrication systems of diesel engines of marine vessels.

The main task of the scientific research is to improve the methodology for resource-saving operation of marine diesel engines based on the engine lubricant diagnostic system.

The principal objective is to refine the methodology for resource-saving operation of marine diesel engines via an engine lubricant diagnostic system. This was achieved by addressing the following **subsidiary tasks**:

- 1) identifying the qualitative criterion of motor lubricant indicative of resource-saving operation in marine diesel engines;
- 2) identifying the quantitative criterion of motor lubricant indicative of resource-saving operation in marine diesel engines;

3) analyzing variations in resource-saving indicators under diverse operating conditions.

Resolution of these tasks yielded the core **scientific proposition**: the service life of marine diesel engines is ensured through control of operational characteristics in cylinder and circulating lubrication system oils – specifically, the gradient of the total base number (TBN) rate of change and the rate of change in metal impurity concentrations.

The **scientific novelty** of the work lies in the fact that the resource-saving operation of marine diesel engines is ensured by diagnostics and controlled influence on the motor oil of their lubrication systems (cylinder for two-stroke diesel engines or circulating for four-stroke), which is manifested in controlling the gradient of the rate of change of the total alkaline number of motor oil and the rate of change of the concentration of metal impurities in motor oil.

The scientific position has been substantiated by the **scientific results**.

Resource-saving operation of marine diesel engines is achieved via diagnostics and targeted management of lubrication system oils (cylinder systems in two-stroke engines; circulating systems in four-stroke engines), manifested in control of the TBN gradient and metal impurity concentration rates. This position is substantiated by the following **original contributions**:

- proposal of the TBN gradient as the qualitative criterion for motor oil resource-saving performance;
- proposal of the metal impurity concentration rate of change as the quantitative criterion;
- determination of critical thresholds for the TBN gradient and metal impurity concentration rate, whose prevention sustains resource-saving operation in marine transport diesel engines.

**The work refined:**

- the methodology for constructing and analysing time series during the diagnostics of engine oils operational characteristics in the cylinder and circulating lubrication systems of marine diesel engines;

- the methodology for performing spectrographic analysis of engine oil constituents that characterise wear of the contact surfaces of marine diesel engines and engine oil contamination.

**It advanced:**

- technologies for measuring TBN and metal impurity concentrations in cylinder and circulating lubrication oils.

**The practical significance** of the obtained results lies in the following:

- monitoring engine oil by determining the rate of change in the total base number of the engine oil and the rate of change in the concentration of metal contaminants in the engine oil helps establish the required supply of engine oil to the diesel cylinder (for the cylinder lubrication system) and to the timely replenishment of engine oil volume (for the circulation lubrication system); both actions contribute to ensuring resource-efficient operation of marine diesel engines;

- conducting mobile spectrographic analysis of engine oil and identifying its components that characterize wear of contact surfaces and contamination of engine oil by combustion products makes it possible to rapidly assess the technical condition of engine parts and the progression of the working cycle in the cylinders, thereby facilitating timely decisions on the management of combustion, lubrication, and cooling processes;

- monitoring and controlling the thermodynamic processes of lubrication and cooling of engine parts during changes in the elemental composition of fuel supports resource saving operation of ship diesel engines, as evidenced by reduced wear of their main contact nodes: cylinder liners, piston rings and bearing shells.

The results of the dissertation research **were implemented:**

- technology for determining TBN gradient and metal impurity concentration rates – on marine diesel engines 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W Yichang Marine Diesel Engine Co. Ltd., as well as on marine diesel engines 6DE-18 Daihatsu Diesel, which were used as main and auxiliary on Bulk Carrier class vessels with a deadweight of 63580 tons (at the same time, a 2.5–6.8 % reduction

in the consumption of engine oil in the cylinder lubrication system of diesel engines and a 4.8–8.3 % reduction in the consumption of engine oil in the circulating lubrication system of diesel engines was achieved);

- time-series diagnostic technology for oil operational characteristics – applied to 9K80ME MAN-Diesel&Turbo and 6L27/38 MAN Diesel&Turbo engines, (reducing contact surface wear verified by lowered metal impurities in under piston space and crankcase samples);

- mobile spectrographic analysis protocol for circulating lubrication oil – applied to 6R26 Wärtsilä engines, accelerating lubrication management decisions and achieving 4.6–9.3 % oil consumption reduction alongside improved contact surface condition.

- in the educational process of the Danube Institute of the National University “Odessa Maritime Academy”, namely: experimental study protocols for diesel engine cycle indicators in the “Marine Internal Combustion Engines” course; diagnostic algorithms for engine contact surfaces based on oil indicators in the “Maintenance, Diagnostics, and Repair of Ship Technical Equipment” course; cylinder lubrication control and circulating oil replenishment algorithms in the “Technology of Working Substances” course.

**Key words:** adjustment, bearing liner, control, cylinder group, diagnostics, efficiency, lubrication system, marine diesel, marine transport, metal impurities, methodology, motor oil, operation, performance indicators, piston ring, piston, plain bearings, reliability, repair, resource saving, resource, total base number, transport, wear.

### **List of published works on the topic of the dissertation**

Articles in scientific professional publications of Ukraine included in the list scientific professional publications of Ukraine, which may publish the results of dissertations for the degree of Doctor of Sciences, Candidate of Sciences and

Doctor of Philosophy

1. Разінікін Р.О. Діагностування технічного стану суднових дизелів за аналізом моторної оливи // Розвиток транспорту. – 2025. – Вип. 4(27). – С. 82-93. <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.06>.

2. Разінікін Р.О. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів шляхом діагностування моторного мастила // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 3(44). – С. 241-255. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.43.24](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.43.24).

3. Чимшир В.І., Разінікін Р.О. Аналіз показників системи діагностування моторного мастила суднових довгоходових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 94-106. DOI: 10.31653/51.2025.94-106.

4. Сагін С.В., Куропятник О.А., Разінікін Р.О. Визначення впливу системи рециркуляції випускних газів на експлуатаційні показники роботи суднового малообертового дизеля // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 49. – С. 124-136. doi: DOI: 10.31653/smf49.2024.124-136.

5. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінікін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – С. 157-171. doi: 10.31653/smf47.2023.157-171.

Articles in foreign publications included in the international scientometric databases Scopus and Web of Science:

6. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13(3). – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.

7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel // Journal of Marine

Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440.  
<https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

Chapter in the collective monograph:

8. Разінкін Р.О. Імітаційна модель накопичення продуктів зносу у відпрацьованій циліндровій оливі // Колективна монографія «Сучасні підходи до вискоефективного використання засобів транспорту», за редакцією В.Чимшир. – Ізмаїл: ДІ НУ «ОМА», 2020 – Київ: Міленіум, 2020. – С. 182-193. ISBN 978-966-8063-81-6. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf>.

Articles in collections of materials of scientific conferences

9. Разінкін Р.О. Використання імітаційного статистичного аналізу даних під час діагностування технічного стану дизелів суден морського транспорту // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 19-20 березня 2026 р., НУОМА. – С. 69-75.

10. Разінкін Р.О. Забезпечення ефективності експлуатації циркуляційних систем мащення судових чотиритактних дизелів // Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до вискоефективного використання засобів транспорту», ДІ НУОМА – 2025, 5-6 грудня 2025 р. Ізмаїл. – С. 210-213.

11. Разінкін Р.О. Діагностування стану циліндрової групи та підшипників ковзання судових дизелів за аналізом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Збірка матеріалів VI міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2025, 5 грудня 2025 р. – Київ: Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, 2025. – С. 43-46.

12. Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Забезпечення експлуатаційних показників моторних мастил судових дизелів // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI

– 2025)», 03–04 грудня 2025 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. – С. 264-268.

13. Разінкін Р.О. Підвищення ефективності процесу мащення підшипникових вузлів судових дизелів // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2025)», 03–04 грудня 2025 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. – С. 242-244.

14. Разінкін Р.О. Огляд способів підвищення надійності втулок циліндрів судових дизелів // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУОМА, 2025. – С.179-183  
<http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEEEA-2025.26.11.25.pdf>.

15. Разінкін Р.О. Контроль технічного стану циліндрової групи судових малообертових дизелів // V науково-технічна конференція молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», 26.11.2025 – Одеса: НУОМА, 2025. – С.46-48.  
<http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/IandTMIWT-2025.26.11.25.pdf>.

16. Разінкін Р.О., Шумейко М.С. Перспективи використання аміаку як палива для морського транспорту // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до вискоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУОМА, 6-7 грудня 2024 р. – С. 163-165. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14560948>.

17. Razinkin R. Utilising of methanol as marine fuel // Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до вискоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2023 р. – С. 185-187. [https://drive.google.com/file/d/1NObPGGddzTIE1ytFS0hRD5z6\\_q\\_FeyQO/view](https://drive.google.com/file/d/1NObPGGddzTIE1ytFS0hRD5z6_q_FeyQO/view).

18. Разінкін Р.О. Аналіз впливу низькосірчаного палива на систему лубрикації СДВЗ та превентивні заходи зі зменшення зносу деталей ЦПГ // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні

підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 21 квітня 2023 року. – С. 70-73. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/zbyrnyk210423.pdf>.

19. Разінкін Р.О. Вплив на показники роботи СДВЗ в умовах підвищених зовнішніх збурень // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2022 р. – С. 106-109. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/conf20122022.pdf>.

20. Разінкін Р.О. Особливості експлуатації двохтактних малооборотних ДВЗ на ULSFO (<0.1% S) // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 28 червня 2021 року. – С. 71-73.

21. Лихогляд К.А., Разінкін Р.О., Журавльов С.В. Альтернативні види палива. Метанол та диметилловий ефір у якості заміників палива для ДВЗ // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 3-4 грудня 2020 р. – С. 253-256. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/12/tezy041220.pdf>.

22. Razinkin R. Analysis of the possibility for the development of four-cycle engines man for the cruise fleet // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 6-7 грудня 2018 р. – С. 191-193. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2018/12/mnpk9.pdf>.

23. Разінкін Р.О., Найдъонов А.І. Ресурсозберігаюча експлуатація судових дизелів на основі трибомоніторингу моторного мастила // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку морської галузі, безпека судноплавства, підготовка моряків у відповідності

до національних і міжнародних вимог», 25 травня 2018 р. – Маріуполь: АМІ НУ «ОМА». – С. 229-232.

24. Разінкін Р.О. Ресурсозберігаюча експлуатація судових дизелів на основі трибомоніторингу моторного мастила // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 7 грудня 2017 р. – 196-199. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2018/12/mnpk8.pdf>.

Of the scientific works published in co-authorship, the author personally owns:

[3] – developing and agreeing on the technology of conducting experiments, conducting experimental research, processing experimental results and adjusting the technology of conducting experiments;

[4] – conducting information search, processing experimental results, developing recommendations for further research;

[5] – conducting information search, developing and agreeing on the technology of conducting experiments, processing experimental results;

[6], [7] – conducting information search, developing recommendations for the modernization of the ship's fuel system, organizing experimental research, agreeing on the technology of conducting research with supervisory organizations, processing and analyzing experimental results;

[12] – conducting information searches, developing and agreeing on experimental technology, conducting experimental studies and analyzing their results;

[16] – conducting information and patent searches;

[21] – theoretical analysis of the possibility of using fuels of different compositions in ship's diesel engines, developing recommendations for the reconfiguration of high-pressure fuel equipment when changing fuel grades;

[23] – monitoring and regulating the performance of a ship's diesel engine, conducting tribomonitoring of engine oil, processing test results, developing recommendations for further research.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ .....	24
ВСТУП .....	25
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАВДАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ .....	35
1.1. Огляд конструкційних особливостей та експлуатаційних характеристик дизелів суден морського транспорту .....	35
1.2. Аналіз призначення та функціональних особливостей систем, що забезпечують збереження ресурсу суднових дизелів .....	41
1.3. Аналіз способів та технологій, що забезпечують ресурсозберігаючу експлуатацію суднових дизелів .....	50
1.4. Аналіз функціональних та експлуатаційних характеристик моторних мастил, що забезпечують процес мащення дизелів суден морського транспорту .....	65
1.5. Аналіз основних причин, що впливають на зміну ресурсу технічної експлуатації дизелів суден морського транспорту .....	70
1.6. Висновки за розділом 1 та постановка завдання дослідження .....	75
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ...	76
2.1. Вибір теми дисертаційного дослідження та визначення наукових завдань дослідження .....	76
2.2. Використання системного підходу під час розв’язання науково- прикладних завдань із забезпечення ефективності експлуатації суден морського транспорту .....	80
2.3. Організація та проведення експериментальних досліджень .....	87
2.4. Висновки за розділом 2 .....	90

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ МАЩЕННЯ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ МІЖ КОНТАКТНИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ .....	91
3.1. Математичне моделювання зміни технічного стану контактних поверхонь дизелів суден морського транспорту під час отримання корисної роботи .....	91
3.2. Аналіз основних дефектів та пошкоджень суднових дизелів, що впливають на його ресурсні показники та ті, що пов'язані з експлуатацією його систем мащення .....	108
3.3. Діагностування зміни технічного стану двохтактних дизелів морських суден за аналізом експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в їхніх системах циліндрового мащення..	112
3.3.1. Експериментальне визначення ресурсних показників суднових дизелів 6S50ME-C9.7 MAN-B&W морських суден класу Bulk Carrier ..	112
3.3.2. Експериментальне визначення ресурсних показників суднових дизелів 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та 5L35MC MAN-B&W морських суден класу Container Ship та класу General Cargo .....	124
3.4. Діагностування зміни технічного стану чотиритактних дизелів морських суден за аналізом експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в системах циркуляційного мащення ....	130
3.4.1. Експериментальне визначення ресурсних показників суднових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel морських суден класу Bulk Carrier .....	130
3.4.2. Експериментальне визначення ресурсних показників суднових дизелів 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo та 5H17/28 Hyundai Heavy Industries морських суден класу Container Ship та класу General Cargo ...	138
3.5. Висновки за розділом 3 .....	145
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЗМІНИ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА РІЗНИХ УМОВ ЇХНЬОЇ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ .....	147

4.1. Аналіз зміни технічного стану моторного мастила під час його експлуатації в системах мащення судових дизелів .....	148
4.2. Зміна технічного стану моторного мастила та ресурсних показників судових дизелів за різних термодинамічних умов їхньої експлуатації..	157
4.3. Зміна технічного стану моторного мастила та ресурсних показників судових дизелів під час використання палива різного елементарного складу .....	171
4.4. Висновки за розділом 4 .....	182
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ МОТОРНОГО МАСТИЛА .....</b>	<b>184</b>
5.1. Використання імітаційного статистичного аналізу даних під час діагностування технічного стану суден морського транспорту .....	184
5.2. Прогнозування залишкового ресурсу експлуатації судових дизелів за моніторингом часових рядів значень контрольованих параметрів .....	195
5.3. Управління експлуатаційними характеристиками моторних мастил систем циліндрового та циркуляційного мащення судових дизелів	207
5.4. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів шляхом діагностики та управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила .....	216
5.5. Мобільне діагностування моторного мастила систем мащення судових дизелів як метод забезпечення їхньої ресурсозберігаючої експлуатації .....	221
5.4. Висновки за розділом 5 .....	226
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>228</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>232</b>
<b>ДОДАТОК .....</b>	<b>257</b>

## ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВМТ	–	верхня мертва точка
ВОД	–	високообертвий дизель
ВТВ	–	високотемпературні відкладення
ГТН	–	газотурбонагнітач
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ККД	–	коефіцієнтом корисної дії
МОД	–	малообертвий дизель
НМТ	–	нижня мертва точка
НТВ	–	низькотемпературні відкладення
ПАП	–	поверхнево-активна присадка
ПАР	–	поверхнево-активна речовина
СЕУ	–	суднова енергетична установка
СОД	–	середньо обертвий дизель
ЦПГ	–	циліндро-поршнева група
SAE	–	Society of Automotive Engineers
TBN	–	Total Base Number

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Експлуатація суден морського та внутрішнього водного транспорту нерозривно пов'язана з забезпеченням надійності роботи суднової енергетичної установки та, насамперед, судових дизелів – головного, що забезпечує рух судна, та допоміжних, завдяки яким механічна енергія, що генерується двигуном внутрішнього згорання, перетворюється на електричну та далі забезпечує роботу судових машин, механізмів та іншого обладнання. З надійністю та ефективністю роботи судових дизелів також визначає живучість судна, його морехідні якості та ходові характеристики. Разом з забезпеченням надійності судових дизелів виникає завдання забезпечення їхньої ресурсозберігаючої експлуатації. При цьому під ресурсозбереженням розуміють не лише зниження витрат палива та мастила, а також зменшення незворотних витрат енергії та збільшення тривалості знаходження судових дизелів у належному технічному стані. Через це контроль та діагностування технічного стану судових дизелів (як головного, також і допоміжних), систем, що забезпечують їхню надійну експлуатацію, та робочих речовин, які використовуються під час їхньої експлуатації, є актуальним завданням, розв'язання якого забезпечується представниками суднової машинної команди та гарантується рівнем їхньої професійної кваліфікації. Автономність плавання морських суден накладає додаткові вимоги до забезпечення ресурсу судових дизелів та іншого судового обладнання, що суттєво відрізняє умови експлуатації засобів морського транспорту від інших, в першу чергу залізничного та автомобільного.

Ресурсозберігаюча експлуатація судових дизелів залежить від багатьох факторів, визначальним з яких є забезпечення процесу мащення їхніх основних контактних вузлів – поршневих кілець та втулки циліндра, а також вкладишів рамових та мотильових підшипників та колінчатого вала. Погіршення процесу мащення, тривала та навіть короткочасна для деяких

експлуатаційних режимів відсутність моторного мастила між вказаними контактними вузлами може бути причиною аварійної зупинки дизелів та пов'язаними з цим втратою ходу судном та неможливістю управління його рухом. Попередження негативних випадків, пов'язаних з критичним погіршенням якості процесу мащення контактних вузлів дизеля, можливе шляхом діагностування та управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила, подача якого до циліндропоршневої групи та підшипників ковзання судових дизелів здійснюється системами циліндрового або циркуляційного мащення. Викладене підтверджує **актуальність** нерозв'язаної науково-прикладної проблеми зі забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів суден морського транспорту.

Підставою проведення наукових досліджень стали наступні **запити практики**:

- забезпечення регламентованого фірмою-виробником ресурсу експлуатації дизеля суден морського транспорту;
- забезпечення мащення контактних поверхонь основних вузлів дизелів, що виконують функції головних та допоміжних двигунів на судах морського транспорту;
- вдосконалення методики проведення діагностики експлуатаційних характеристик судових моторних мастил, що використовуються в системах циліндрового та циркуляційного мащення дизелів морських суден.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Актуальність проведення дослідження зумовлена вимогами та рекомендаціями положень Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердженням операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках (Постанова КМУ від 27.12.2024 р. № 1550).

Дослідження виконувались у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» «Розробка концепції безпечної експлуатації судових систем та обладнання» № ДР 0118U007602 (2018–2021 рр.), «Аналіз і розробка методів

та підходів до підвищення ефективності управління та експлуатації судовими системами та комплексами» № ДР 0123U101514 (2023–2026 рр.), у яких автор дисертації брав участь, виконуючі окремі розділи.

**Мета дослідження** Метою дослідження є забезпечення ресурсу роботи судових дизелів протягом всього гарантованого терміну їх експлуатації.

**Основною науковою гіпотезою дослідження** є теза, що забезпечення ресурсу роботи судових дизелів досягається шляхом діагностування та подальшого управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила систем циліндрового та циркуляційного мащення, якими є градієнт швидкості зміни загального лужного числа та швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі.

**Головне завдання наукового дослідження** полягає у вдосконаленні методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила.

Для розв'язання головного завдання дослідження розв'язані наступні **допоміжні завдання**:

- 1) визначення якісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів;
- 2) визначення кількісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів;
- 3) аналіз зміни ресурсозберігаючих показників судових дизелів за різних умов їхньої експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – процес експлуатації дизелів суден морського транспорту.

**Предмет дослідження** – процес мащення циліндропоршневої групи та підшипників ковзання дизелів суден морського транспорту.

Під час дослідження як теоретичні використовувались наступні методи: аналіз, синтез, моделювання, абстрагування, дедукції та індукції; як емпіричні – спостереження, експеримент, вимірювання, порівняння, опис.

**Наукова новизна** роботи полягає в тому, що ресурсозберігаюча експлуатація дизелів суден морського транспорту забезпечується діагностикою та керованим впливом на експлуатаційні характеристики моторних мастил систем мащення: циліндрової для двотактних дизелів або циркуляційної для чотиритактних, що полягає в управлінні градієнтом швидкості зміни загального лужного числа моторного мастила та швидкістю зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі.

У результаті розв'язання головного та допоміжних завдань дослідження сформульовано **наукове положення**: забезпечення ресурсу роботи суднових дизелів досягається шляхом управління експлуатаційними характеристиками суднових моторних мастил, що використовуються у їхніх системах циліндрового та циркуляційного мащення (а саме, градієнтом зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкістю зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі).

Наукове положення обґрунтовано **науковими результатами**.

#### **Вперше:**

- запропоновано якісним критерієм моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію суднових дизелів, визначати градієнт зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила;

- запропоновано кількісним критерієм моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію суднових дизелів, визначати швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі;

- визначено критичні значення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі, запобігання яких забезпечує ресурсозберігаючу експлуатацію дизелів суден морського транспорту.

#### **Удосконалено:**

- технологію визначення часових рядів під час діагностування експлуатаційних характеристик моторних мастил систем циліндрового та циркуляційного мащення дизелів суден морського транспорту;

- технологію проведення спектрографічних досліджень складових моторного мастила, що характеризують знос контактних поверхонь судових дизелів та забруднення моторного мастила;

**Отримала подальший розвиток:**

- технологія визначення загального лужного числа та концентрації металевих домішок у моторних мастилах, що використовуються в системах циліндрового та циркуляційного мащення дизелів суден морського транспорту.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в наступному:

- моніторинг моторного мастила шляхом визначення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилi призводить до встановлення необхідної подачі моторного мастила в циліндр дизеля (щодо системи циліндрового мащення) та до виконання своєчасного поповнення обсягу моторного мастила (щодо системи циркуляційного мащення); обидві дії сприяють забезпеченню ресурсозберігаючої експлуатації дизелів суден морського транспорту;

- проведення мобільної спектрографії моторного мастила та визначення складових, що характеризують знос контактних поверхонь та забруднення моторного мастила продуктами згоряння палива, забезпечує прискорене отримання інформації щодо стану деталей дизеля, а також перебігу робочого циклу в циліндрах; що сприяє своєчасному прийняттю рішень стосовно забезпечення процесів згоряння, мащення та охолодження;

- контроль та управління термодинамічними процесами мащення та охолодження деталей дизеля під час зміни елементного складу палива сприяє підтриманню ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів, що виявляється в зменшенні зносу їхніх основних контактних вузлів: циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників.

**Результати дисертаційного дослідження впроваджені:**

- технологія визначення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкості зміни концентрації металевих домішок в моторному мастилі – на суднових дизелях 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W Yichang Marine Diesel Engine Co.Ltd., а також на суднових дизелях 6DE-18 Daihatsu Diesel, що використовувались як головні та допоміжні на судах класу Bulk Carrier дедвейтом 63580 тонн, 63750 тонн, 64700 тонн (при цьому було досягнуто 2,5...6,8 % зниження витрати моторного мастила системи циліндрового мащення дизелів та 4,8...8,3 % зниження витрати моторного мастила системи циркуляційного мащення дизелів);

- технологія визначення часових рядів під час діагностування експлуатаційних характеристик моторних мастил систем циліндрового мащення – на судовому дизелі 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та систем циркуляційного мащення – на суднових дизелях 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo (при цьому було забезпечено зменшення зносу контактних поверхонь дизеля, що підтверджувалось зниженням концентрації металевих домішок у пробах моторного мастила, які відбирались з підпоршневого простору та картеру дизелів);

- послідовність проведення мобільного спектрографічного аналізу моторного мастила системи циркуляційного мащення – на суднових дизелях 6R26 Wartsila (що прискорило прийняття рішень зі управління режимами мащення та сприяло 4,6...9,3 % зниженню витрати моторного мастила та покращенню технічного стану контактних поверхонь дизеля);

- в освітньому процесі Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», а саме:

- послідовність проведення експериментальних досліджень з визначення основних показників робочого циклу дизеля – під час викладання освітнього компонента «Суднові двигуни внутрішнього згорання»;

- алгоритм діагностики технічного стану контактних поверхонь суднових дизелів за аналізом експлуатаційних показників моторного мастила систем

циліндрового та циркуляційного мащення – під час викладання освітнього компонента «Технічне обслуговування, діагностика та ремонт суднових технічних засобів»;

алгоритм управління подачею мастила системи циліндрового мащення та алгоритм поповнення обсягу мастила циркуляційної системи мащення – під час викладання освітнього компонента «Технологія використання робочих речовин».

**Особистий внесок здобувача** полягає у:

- виконанні інформаційного пошуку та аналізі літературних джерел із розв’язання завдання ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів;

- визначенні основних складових та розробці технологічної карти наукового дослідження

- розробки математичної моделі процесів, що характеризують взаємодію контактних поверхонь під час отримання корисної роботи в суднових дизелях та перетворення цієї роботи на рух суден морського транспорту;

- проведенні експериментальних досліджень на судах морського транспорту;

- розробці рекомендації щодо вдосконалення експлуатації систем мащення дизелів морських суден;

- розробці методики діагностування технічного стану дизелів суден морського транспорту за аналізом моторного мастила, що використовується в їхніх системах циліндрового та циркуляційного мащення.

Роботи [52], [63], [94], [142], [147], [152], [153], [160], [161], [162], [163], [168], [172], [176], [177] виконані автором самостійно.

У роботах, що опубліковані в співавторстві з іншими науковцями, здобувачеві належать особисто: [44] – проведення інформаційного пошуку, обробка результатів експерименту, розробка рекомендацій щодо подальших досліджень; [51] – теоретичний аналіз можливості використання в суднових дизелях палив різного складу, розробка рекомендацій щодо переналаштування паливної апаратури високого тиску під час зміни сортів палива; [60] –

розробка та погодження технології проведення експериментів, проведення експериментальних досліджень, обробка результатів експерименту та корегування технології проведення експерименту; [73] – проведення інформаційного пошуку, розробка та погодження технології проведення експериментів, обробка результатів експерименту; [83] – проведення інформаційного та патентного пошуку; [137] – проведення інформаційного пошуку, розробка та погодження технології проведення експериментів, виконання експериментальних досліджень та аналіз їхніх результатів; [140], [141] – проведення інформаційного пошуку, розробка рекомендації щодо модернізації суднової паливної системи, організація проведення експериментальних досліджень, погодження технології проведення досліджень з наглядовими організаціями, обробка та аналіз результатів експерименту; [175] – контроль та регулювання показників роботи суднового дизеля, проведення трибомоніторингу моторного мастила, обробка результатів випробувань, розробка рекомендацій щодо подальших досліджень.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати доповідались та обговорювались під час особистої участі на міжнародних та Всеукраїнських наукових конференцій, зокрема:

VIII-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 7 грудня 2017 р.;

Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції розвитку морської галузі, безпека судноплавства, підготовка моряків відповідно до національних і міжнародних вимог», 25 травня 2018 р., Маріуполь: АМІ НУ «ОМА»;

IX-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 6-7 грудня 2018 р.;

XI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 3-4 грудня 2020 р.;

V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 28 червня 2021 р.;

XIII-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2022 р.;

VII-й Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 21 квітня 2023 р.;

XIV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2023 р.;

XV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУОМА, 6-7 грудня 2024 р.;

V-й науково-технічній конференції молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», 26.11.2025, Одеса, НУОМА;

XV-й міжнародній науково-технічній конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025 р., Одеса, НУОМА;

V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2025)», 03–04 грудня 2025 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

VI-й міжнародній науково-практичній конференції: Дніпровські читання-2025, 5 грудня 2025 р., Київ, Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету;

XVI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», 5-6 грудня 2025 р. Ізмаїл, ДІ НУОМА;

Міжнародній науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 19-20 березня 2026 р., Одеса, НУОМА.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 24 наукові праці, з яких 5 – у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових фахових видань України (категорії Б), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії; одна – як розділ у колективній монографії; 2 – в іноземних виданнях, які відносяться до квартилю Q2 та входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 16 – у збірках доповідей Міжнародних наукових та науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку (в якому надано акти впровадження результатів дослідження). Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 263 сторінки, зокрема: основний текст 165 сторінок з анотацією на 19 сторінках, перелік використаних джерел із 235 найменуваннями на 26 сторінках, додаток на 8 сторінках, 45 рисунків, 29 таблиць.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

### 1.1. Огляд конструкційних особливостей та експлуатаційних характеристик дизелів суден морського транспорту

Морський транспорт є невід'ємною складовою економіки будь-якої країни. Навіть країни, що не мають доступу до відкритого моря, володіють певною кількістю та типів суден, які забезпечують морські та океанські перевезення та постачають до цих країн ті чи інші товари, продукцію та енергетичні ресурси. Необхідність збільшення товарообігу, що забезпечується морськими транспортними перевезеннями, призводить до збільшення дедвейту (щодо балкерів, танкерів та універсальних суден), вантажомісткості (щодо суден, призначених для перевезення скрапленого нафтового та природного газу), контейнерній місткості (для суден-контейнеровозів та суден з вертикальним типом завантаження), кількості автомобілів або іншої колісної техніки (для суден-автомобілевозів та суден з горизонтальним типом завантаження) [1-3]. Необхідність підвищення ефективності морських перевезень та швидкості доставки вантажів призводить до збільшення потужності головної (що забезпечує рух судна) та допоміжної (що підтримує функціонування судових систем, механізмів та обладнання) енергетичних установок.

Основною складовою енергетичних установок сучасних суден морського та внутрішнього водного транспорту є теплові двигуни. Саме вони забезпечують перетворення потенційної енергії палива (у більшості випадків рідкого, в окремих – газового) на теплову або кінетичну та далі на корисну роботу. Найбільш поширеним джерелом теплової енергії є парові котли, насичена чи перегріта пара яких використовується для роботи допоміжного обладнання, підігріву палива, мастила або вантажу (на судах, призначених

для перевезення сирої нафти та нафтопродуктів), а також для внутрішньо суднових потреб [4-6]. Основним джерелом кінетичної енергії на судах морського та внутрішнього водного транспорту є двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), які через прізвище свого засновника іменуються дизелі. Кінетична енергія, що генерується в дизелях, перетворюється на обертальний рух його колінчатого вала та далі забезпечує обертання ротора електричного генератора (у разі, коли дизель виконує функції допоміжного двигуна), або обертання гребного гвинта (у разі, коли дизель виконує функції головного двигуна).

Суднові дизелі на сьогодні відносяться до найбільш розповсюджених типів теплових двигунів, що виконують функції головної та допоміжної суднової енергетичної установки (СЕУ). Майже всі транспортні судна морського та внутрішнього водного транспорту комплектуються цим типом теплових двигунів. Існують лише поодинокі приклади використання як головних двигунів газових турбін (газотурбінних установок) або комплексу паровий котел – парова турбіна (паротурбінна установка). Превалююче використання дизельних енергетичних установок зумовлене їхнім більшим (у порівнянні з паротурбінними та газотурбінними) коефіцієнтом корисної дії (ККД) та меншою питомою витратою палива [7-9]. Сучасні суднові дизелі характеризуються значеннями ефективного ККД в діапазоні 50...53 % та питомою ефективною витратою палива 165...170 г/(кВт·год) [10-12]. Побідні значення недосяжні для інших типів СЕУ.

Корисна потужність як головної, також і допоміжної енергетичної установки, що складається з дизелів, характеризується їхньою індикаторною потужністю – такою, яка виникає в результаті згоряння палива та розширення продуктів згоряння безпосередньо в його циліндрі.

Відповідно до рівнянь «прямої потужності»

$$N_i = \frac{V_s z i n}{60 \cdot 10^{-3}} p_i; \quad (1.1)$$

де  $V_s = \frac{\pi D^2}{4} S$  – повний об’єм циліндра, м<sup>3</sup> ( $D$  – діаметр циліндра, м,  $S$  – хід поршня, м);

$z$  – коефіцієнт тактності;

$i$  – кількість циліндрів;

$n$  – частота обертання колінчатого вала, об/хв;

$p_i$  – середній індикаторний тиск, МПа [13-15];

та «загальної потужності»

$$N_i = \frac{V_s \cdot z \cdot i \cdot n}{60 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{Q_H^p}{G_0 R_s} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \frac{p_s}{T_s} \eta_H; \quad (1.2)$$

де  $Q_H^p$  – нижча теплотворна здатність палива, кДж/кг;

$G_0$  – теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг палива, кг повітря/кг палива;

$R_s$  – універсальна газова стала, кДж/(кг·К);

$\eta_i$  – індикаторний коефіцієнт корисної дії;

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;

$p_s, T_s$  – тиск, МПа, та температура, К, повітря у продувному ресивері;

$\eta_H$  – коефіцієнт наповнення [16-18];

що більше за інші характеризують залежність індикаторної потужності дизеля від його конструкційних та експлуатаційних показників, впливає, що найбільш ефективними способами збільшення значення індикаторної потужності є збільшення об’єму циліндра  $V_s$ , підвищення частоти обертання вала  $n$  та збільшення ступеню наддуву  $p_s$ . При цьому необхідно враховувати неминучі втрати енергії, що виникають на лінії передачі потужності головний двигун – гребний вал – гвинт або допоміжний двигун – проміжний вал – електричний генератор, саме через них визначається ефективна потужність дизеля

$$N_e = N_i - N_m;$$

або

$$N_e = N_i \eta_m;$$

де  $N_m$  – потужність механічних втрат, МПа;

$\eta_m$  – механічний коефіцієнт корисної дії [19-21].

Збільшення об'єму циліндра  $V_s$  досягається через підвищення ходу поршня  $S$ . При цьому підвищується відношення  $S/D$ , яке визначає ступінь довгодоності дизеля. Тенденції розвитку дизелебудування майже всіх провідних фірм та концернів, що постачають дизелі на судна морського транспорту, свідчать про збільшення цього відношення від однієї моделі до іншої [22, 23]. Наприклад, для однакових за діаметром циліндрів дизелів концерну MAN-B&W:

K90ME –  $D=0,9$ ,  $S=2,3$ ,  $S/D=2,56$ ;

L90ME –  $D=0,9$ ,  $S=2,916$ ,  $S/D=3,24$ ;

S90ME –  $D=0,9$ ,  $S=3,188$ ,  $S/D=3,54$ ;

G90ME –  $D=0,9$ ,  $S=3,26$ ,  $S/D=3,62$  [24, 25].

Підвищений хід поршня сприяє збільшенню ступеня стиснення – показника, що прямопропорційно впливає на термічний ККД дизеля, а також на температуру наприкінці процесу стиснення. Перше призводить до підвищення теплової ефективності робочого циклу, друге – поширює діапазон використання важких палив, а саме, сприяє використанню палив зі зниженою температурою самозаймання. Також збільшення ходу поршня  $S$  призводить до прямопропорційного збільшення крутного моменту на валу дизеля за однаковим для різних дизелів значенням дотичної сили  $p_d$

$$M_{кр} = p_d \frac{S}{2}.$$

Це сприяє можливості збільшення діаметра гребного гвинта та дає змогу до підвищення тягових зусиль гвинта. У комплексі дій це призводить до збільшення швидкості руху судна.

Рівняння (1.1), (1.2) також зумовлюють прагнення до збільшення номінальної частоти обертання колінчатого вала дизелів для кожного з окремих розмірів циліндра дизеля (його діаметра та ходу поршня). Наприклад, для дизелів концерну MAN-B&W, моделі яких наведені вище, з можливого експлуатаційного діапазону

для K90ME –  $n=86\dots98$  об/хв;

для L90ME –  $n=80\dots92$  об/хв;

для S90ME –  $n=74\dots86$  об/хв;

для G90ME –  $n=70\dots82$  об/хв [26, 27]

як найбільш ефективні рекомендуються такі, що відповідають максимально можливій частоті обертання.

Ще одним показником, який прямопропорційно призводить до збільшення ефективної потужності дизеля та на вдосконалення якого присвячені конструкційні вдосконалення та технологічні розробки виробників дизелів, є тиск наддуву  $p_k$ . Для сучасних двотактних дизелів тиск наддувного повітря  $p_k$  (тиск після повітряного компресора газотурбонагнітача) досягає значень 0,32...0,35 МПа, а іноді перевищує ці значення; для чотиритактних дизелів це значення може складати 0,4...0,45 МПа. Одночасно з цим сучасний розвиток дизелебудування передбачає дизелі з двоступеневим наддувом. У цих випадках значення  $p_k$  досягає 0,6...0,65 МПа, при цьому можливі варіанти компоновки систем двохступеневого наддуву, які забезпечує тиск наддувного повітря  $p_k=0,7\dots0,8$  МПа [28, 29].

Конструкційна вдосконаленість сучасних судових дизелів також пов'язана із забезпеченням мінімального рівня незворотних втрат енергії. Перш за все це зводиться до зменшення потужності механічних втрат  $N_m$  та підвищення механічного ККД  $\eta_m$ .

Для сучасних двотактних малооборотних дизелів (МОД) значення механічного ККД на режимах максимального експлуатаційного навантаження може досягати 94,0...94,5 %. Для чотиритактних середньооборотних дизелів (СОД) – 90...91 %, високооборотних дизелів (ВОД) – 87...89 % (що пов'язано з додатковими «насосними» ходами в циклі цих дизелів). На режимах часткового навантаження (що відповідають меншою за номінальною частоті обертання колінчатого вала для двотактних МОД та меншою потужністю споживачів енергії для чотиритактних СОД та ВОД) значення механічного ККД знижуються, що призводить до зменшення корисної роботи та, відповідно, зменшенню економічності їхньої роботи.

До сучасних технологій, що сприяють зменшенню механічних втрат, належать використання наноструктурованих матеріалів, які у вигляді твердотільних порошкових компонентів або тонкоплівкових покриттів наносяться на поверхні втулок циліндра, поршня, вкладишів підшипників та колінчатого вала, а також додавання поверхнево-активних речовин (ПАР) [30-32] та спеціальних поверхнево-активних присадок (ПАП) [33-35] до моторного мастила.

Збільшення механічних втрат є однією з причин погіршення технічного стану трибосполучень дизелів поршневі кільця – втулка циліндра та вкладиш підшипника – колінчатий вал. Саме через надмірне або стрибкоподібне збільшення механічних втрат можливо діагностувати порушення цілісності або пошкодження поверхонь цих елементів дизеля. Поступове або стрибкоподібне (що є більш небезпечним) погіршення технічного стану вказаних трибосполучень дизелів суден морського транспорту є основною причиною зниження їхнього ресурсу. Ознаками цього негативного явища стають зменшення тиску наприкінці стиснення та зниження через це індикаторного тиску в циліндрі та ефективної потужності на вихідному валу дизеля; збільшення зносу деталей дизеля та підвищення утворення нагарів на їхніх поверхнях; підвищення вібраційних навантажень на деталі дизеля та збільшення їхнього температурного навантаження [36-38].

## 1.2. Аналіз призначення та функціональних особливостей систем, що забезпечують збереження ресурсу суднових дизелів

Ефективність експлуатації суден морського транспорту визначається не лише виконанням транспортної роботи з перевезення вантажів та отримання через це прибутку, а також технічним станом, тривалою безперервною та надійною роботою СЕУ – головної та допоміжної, основним енергетичним елементом яких є двигуни внутрішнього згорання. Надійність роботи суднових ДВЗ є багатопараметричним поняттям та залежить від організації робочого циклу в циліндрах дизеля, забезпеченню режимів мащення та охолодження, підтримання мінімального рівня механічних втрат та інших процесів та показників [39, 40]. З метою підвищення безпеки мореплавства Міжнародна морська організація послідовно посилює вимоги до надійності всієї СЕУ та суднових дизелів зокрема, а також до збереження їхнього ресурсу відповідно до термінів, що запропоновані фірмами виробниками та гарантовані ними за умов виконання всіх рекомендації з експлуатації. Забезпечення надійності та збереження ресурсу суднових ДВЗ є актуальним завданням, розв'язанню якого присвячено багато наукових розробок та технологічних рішень.

До основних систем, що підтримують необхідну тривалість гарантованого фірмою виробником ресурсу дизеля, відносяться наступні:

- паливна – високого та низького тиску [41, 42];
- мащення, яке залежно від типу дизеля може поділятися на циліндрове та циркуляційне, чи бути загальним – циркуляційним [43, 44];
- охолодження прісною водою [45, 46].

Паливна система низького тиску забезпечує перекачування палива між всіма її складовими – від танків прийому палива, відстійних чи витратних цистерн до паливної апаратури високого тиску. При цьому паливо піддається зовнішній дії теплових потоків, механічних та динамічних навантажень, а в

деяких випадках – хімічній дії інших речовин. Це призводить до зміни первинних фізичних та динамічних характеристик палива та гарантує його подальше безпечне використання в паливній системі високого тиску. Основними експлуатаційними характеристиками, на підтримання яких спрямована дія паливної системи низького тиску, які впливають на зміну ресурсу дизелів є в'язкість, однорідність, суцільність потоку та вміст у паливі механічних домішок.

Приклад паливної системи СЕУ наведено на рис. 1.1. Основні елементи системи, що вказані на схемі, зрозумілі, тому їхнє призначення та функціонування не потребують додаткового пояснення.

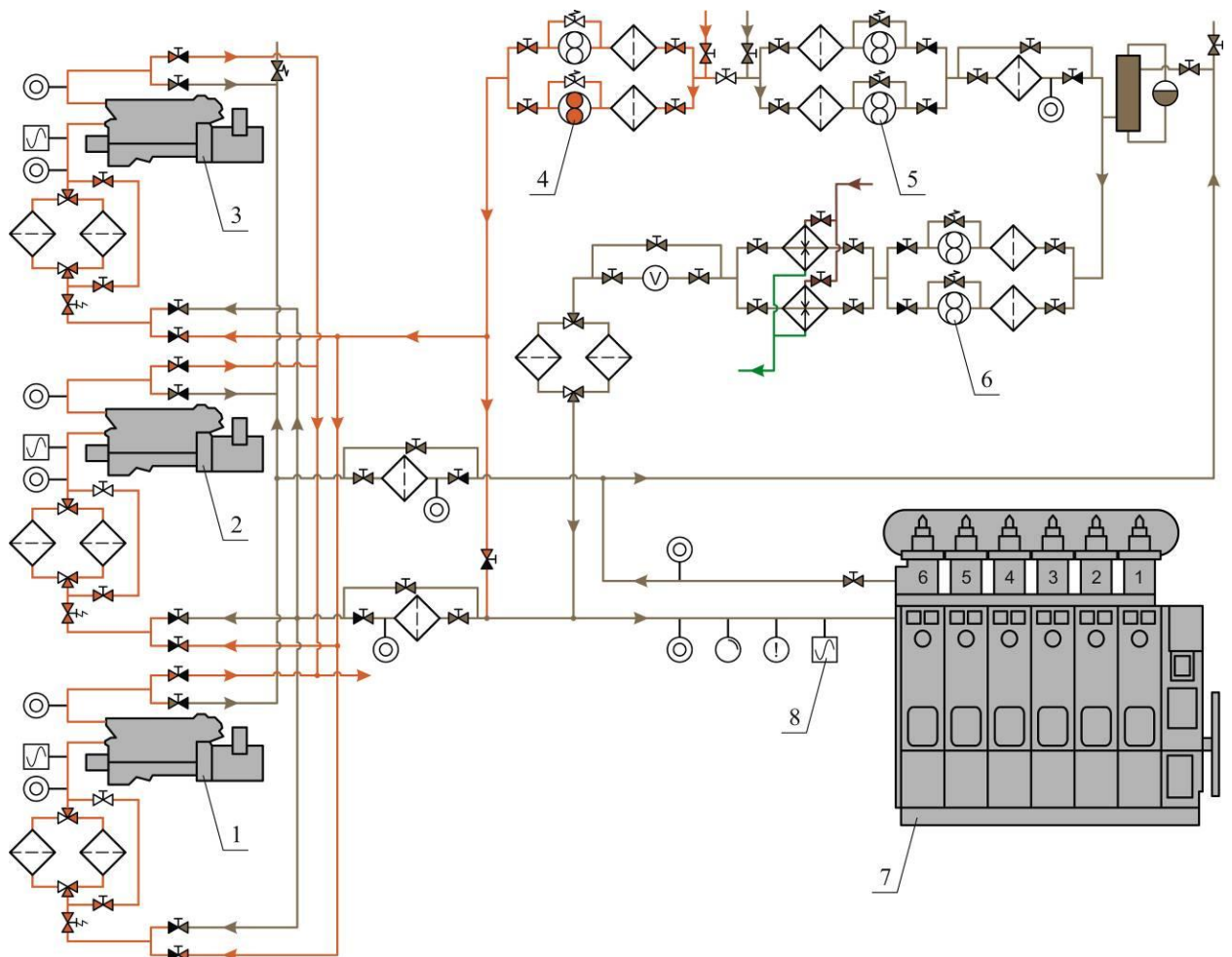


Рис. 1.1. Принципова схема паливної системи СЕУ:

- 1, 2, 3 – допоміжні двигуни; 4 – паливні насоси, що підкачують паливо низької в'язкості; 5 – паливні насоси, що підкачують паливо високої в'язкості; 6 – бустерні паливні насоси; 7 – головний двигун

Відхилення в значенні в'язкості палива від рекомендованого діапазону в більшій бік збільшує гідродинамічний опір у системі та може стати причиною зменшення циклової подачі палива в циліндр дизеля. Разом з підвищенням гідродинамічного опору також підвищуються втрати енергії на роботу паливних насосів як у системі низького тиску, також і у системі високого тиску. Останнє, через взаємозв'язок цього обладнання з колінчатим валом дизеля, призводить до збільшення механічних втрат та, відповідно, до зменшення ефективної потужності дизеля [47, 48].

Однорідність палива є характеристикою, що впливає на сталу роботу паливних насосів, як таких, що забезпечують рух палива серед елементів системи, також і тих, що забезпечують подачу паливу до форсунок дизеля (у випадку дизелів з розподільним валом) або до загального паливного трубопроводу високого тиску (у випадку дизелів з електронним управлінням паливоподачею та випуском газів). Використання палива зі зніженим рівнем однорідності або використання паливних сумішей, які можуть складати шари палива з різною густиною, призводить до виникнення коливальних процесів в динамічних параметрах паливної апаратури (частоти обертання та тиску) та відхилень у значеннях в'язкості та густини палива.

Суцільність паливного потоку також характеризує сталу роботу паливної апаратури. Порушення суцільності паливного потоку може виникати через зміну аеродинамічних характеристик палива – потраплянню до нього повітря чи газів (що можуть утворюватися в паливі під час зміни його фізико-хімічних характеристик). Впорскування несучільного потоку палива в циліндр дизеля призводить до зміни його циклової подачі, порушенню подачі палива, погіршенню самозаймання та горіння палива, виникненню зайвого догорання палива. Основним негативним підсумком цих явищ стає збільшення неврівноваженості дизеля та підвищення ударних навантажень на поршневу групу та підшипники руху дизеля.

Через постійні або періодичні контакти з повітрям (що відбуваються під час бункерування, збереження палива в танках запасу, знаходження палива у

відстійних та витратних цистернах) та металевими механізмами, приладами, обладнанням та апаратурою паливної системи до обсягу палива неминуче потрапляють органічні та неорганічні механічні домішки, які також можуть бути результатом тертя палива. Тверді речовини негативно впливають на технічний стан всіх елементів паливної системи низького тиску та через це сприяють зниженню ресурсу всієї дизельної енергетичної установки.

Паливна система високого тиску забезпечує впорскування в циліндр дизеля дозованої порції палива. Вплив на ресурс суднового дизеля ця система здійснює через якість розпилювання палива. Несвоєчасне впорскування палива, погіршення функціонування розпилювачів форсунок, зміни кута розпилювання палива призводять до підвищення динамічних навантажень на поршень, крейцкопф або шатун та далі на підшипники колінчатого вала; а також до збільшення температурних навантажень на кришку циліндра, верхню частину циліндрової втулки та голівку поршня циліндра [49, 50]. Потрапляння механічних домішок у прецизійні пари паливної апаратури високого тиску (у зазор між плунжером та втулкою паливного насоса високого тиску або між розпилювачем та корпусом форсунки) з часом призводить до погіршення їхнього технічного стану та зниження ресурсу дизеля.

Система охолодження прісної водою забезпечує відведення зайвої теплоти від кришки та втулки циліндра та попереджає перевищення температурних градієнтів, які в них виникають. Порушення режимів охолодження призводить до збільшення лінійних розширень цих деталей дизеля, що негативно впливає на ресурсні показники дизеля. Прісною водою забезпечується охолодження циліндрових втулок, кришок циліндра та сідел клапанів. Як правило система охолодження прісною водою відноситься до високотемпературної системи (High temperature water – HT-water) [51, 52].

Приклад системи охолодження прісною водою наведено на рис. 1.2. Основні елементи системи, що вказані на схемі, зрозумілі, тому їх призначення та функціонування не потребують додаткового пояснення.

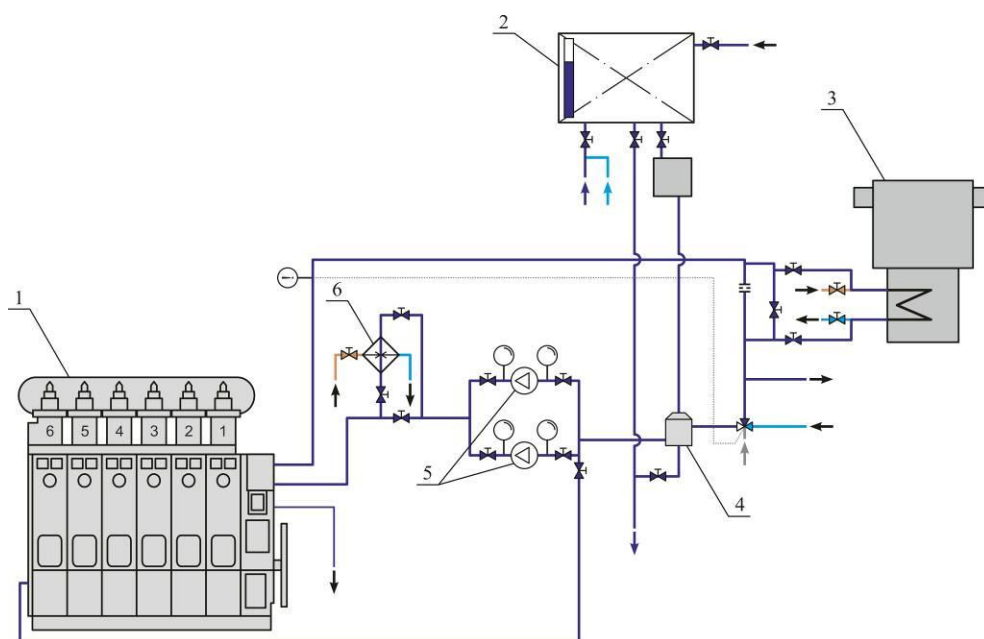


Рис. 1.2. Система охолодження прісною водою головного двигуна:

1 – головний двигун; 2 – розширювальна цистерна; 3 – водоопріснювальна установка; 4 – змішувач; 5 – насоси прісної води; 6 – водонагрівач

Однією з систем, що впливає на надійність суднових ДВЗ, є система мащення, яка забезпечує подачу мастила до контактних вузлів (насамперед до з трибосполучень поршневі кільця – циліндрова втулка та колінчатий вал – вкладиш підшипника), а також їх охолодження та видалення продуктів зносу [53, 54].

У більшості досліджень ефективність роботи систем мащення та пов'язана з нею надійність роботи дизеля оцінюється за значеннями тиску та температури мастила, що подається до контактних вузлів. Підтримання цих параметрів є, безумовно, вкрай важливим та обов'язковим. При цьому не меншою важливістю характеризується система охолодження дизеля. Її параметри впливають на термодинамічні характеристики робочого процесу та через це є визначальними під час взаємодії комплексу паливо – продукти згоряння – мастило – деталі дизеля (циліндрова втулка та поршневі кільця). Рекомендації фірм-виробників дизелів характеризуються досить широким діапазоном температури прісної води, що використовується для охолодження циліндрової групи суднових дизелів. При цьому найбільш раціональні

значення з цього діапазону можуть бути визначені лише експериментальним шляхом. Як критерій, що визначає ці значення, доцільніше за все приймати характеристики моторного мастила, що забезпечує мащення циліндрової групи дизеля [55, 56]

Приклад системи охолодження прісною водою наведено на рис. 1.3. Основні елементи системи, що вказані на схемі, зрозумілі, тому їх призначення та функціонування не потребують додаткового пояснення.

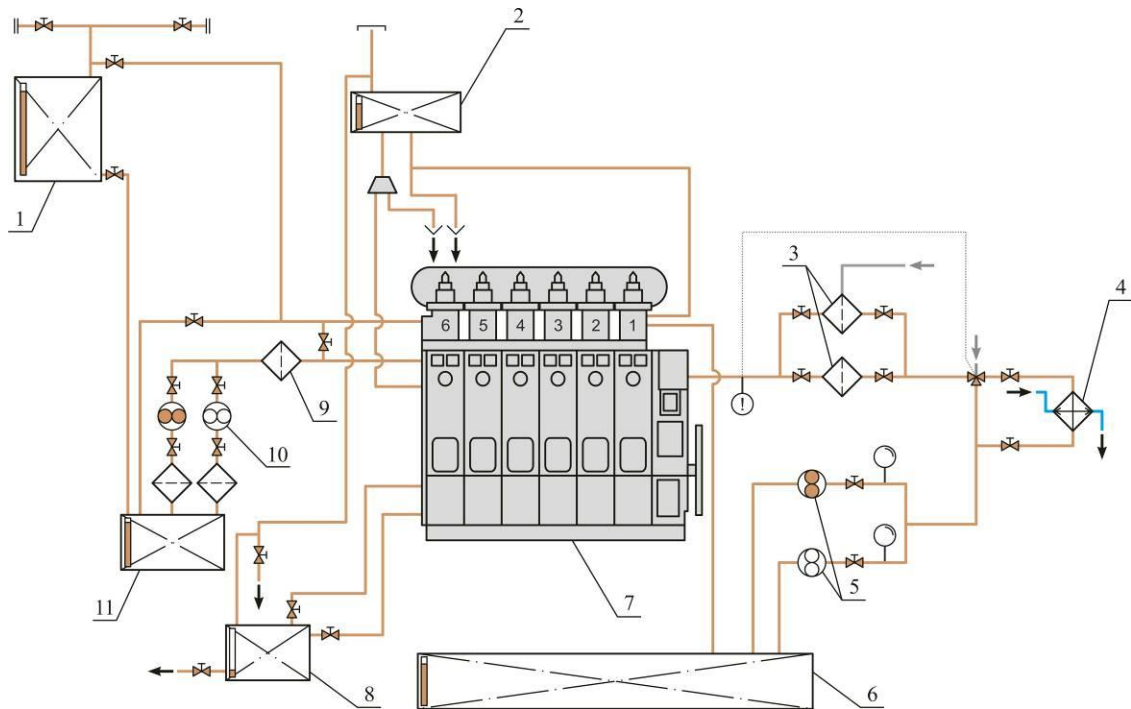


Рис. 1.3. Система мащення суднового дизеля:

- 1 – цистерна запасу циліндрового мастила; 2 – цистерна системи гравітаційного мащення ГТН; 3 – фільтри циркуляційного мастила; 4 – охолоджувач мастила;  
 5 – циркуляційні мастильні насоси; 6 – цистерна циркуляційного мастила;  
 7 – головний двигун; 8 – цистерна збору мастила з підпоршневого простору;  
 9 – фільтр циліндрового мастила; 10 – насос системи циліндрового мащення;  
 11 – витратна цистерна циркуляційного мастила

Надійна експлуатація суднових дизелів пов'язана з багатьма факторами, одним з яких є забезпечення ефективності роботи системи мащення. Функціональним призначенням цієї системи є мащення та охолодження контактних поверхонь дизеля (насамперед трибосполучень циліндрова

втулка – поршневі кільця та колінчатий вал – вкладиш підшипника ковзання), а також видалення продуктів зносу та нагароутворення з зони тертя. Експлуатаційні характеристики моторного мастила, що використовується в системах мащення відображають перебіг робочого циклу в циліндрі дизеля, а також стан його основних вузлів, мащення яких воно забезпечує [55, 56].

Експлуатація суднових дизелів нерозривно пов'язана із завданням забезпечення якісного мащення елементів циліндрової групи [57, 58]. Відхилення подачі циліндрового мастила від його оптимального значення призводить до збільшення рівня контактних взаємодій між поршневими кільцями та циліндровою втулкою або зменшення рухливості поршневих кілець. Обидва фактори призводять до збільшення зносу кілець та втулки циліндра, пошкодження дзеркала втулки, руйнування та порушення компресійної дії кілець та деяких інших негативних факторів.

Однією з комплексних систем, що забезпечують контроль та діагностику стану циліндрових втулок та поршневих кілець сучасних суднових двигунів, є система MAPEX (Monitoring & maintenance, Performance, Enhancement with Expert knowledge), розроблена корпорацією Wärtsilä-Sulzer [59]. Блок-схему системи MAPEX наведено на рис. 1.4.

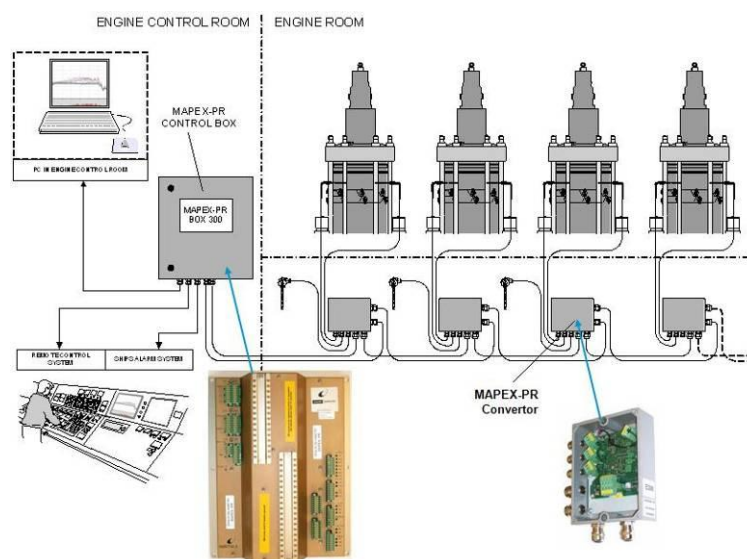


Рис. 1.4. Блок-схема системи MAPEX

Система MAPEX призначена лише для моніторингу параметрів роботи системи циліндрового змащування та сигналізації у разі їхнього критичного відхилення. Система MAPEX не чинить керуючого впливу на дизель і забезпечує лише дозовану подачу циліндрового мастила залежно від частоти обертання та потужності дизеля, а також залежно від вмісту сірки в паливі.

Система MAPEX виконує такі функції:

- спостереження за стабільністю мастильної плівки циліндрових втулок;
- активація сигналізації у разі місцевого перегріву втулки;
- спостереження за температурою охолоджувальної води та сигналізація у разі виходу контрольованих параметрів із встановлених режимів;
- інформування у разі виходу з ладу однієї чи кількох форсунок циліндрової системи мащення, що забезпечують подачу мастила на дзеркало циліндрової втулки;
- спостереження за температурою надувного повітря та сигналізація у разі виходу її значення із встановлених режимів.

Усі сигналізації виходять на монітор і зберігаються на жорсткому диску комп'ютера з можливістю перегляду в потрібний час.

Однією із проблем, пов'язаних із забезпеченням постійного контролю технічного стану елементів циліндропоршневої групи, є необхідність проведення їхнього візуального контролю [60, 61]. Для сучасних малообертових дизелів з великою кількістю обладнання, що встановлюється поблизу циліндрового блоку та на кришці циліндра, ця процедура може досягати десятка годин, що особливо відчутно для суден, що виконують контейнерні перевезення та суден, що працюють в акваторіях інтенсивного судноплавства [62, 63]. Система моніторингу MAPEX дозволяє стежити за станом циліндрових втулок та поршневих кілець без візуальних інспекцій циліндропоршневої групи. Приклад візуалізації контролю показників стану циліндрових втулок дизеля 9RT-flex96С показано на рис. 1.5.

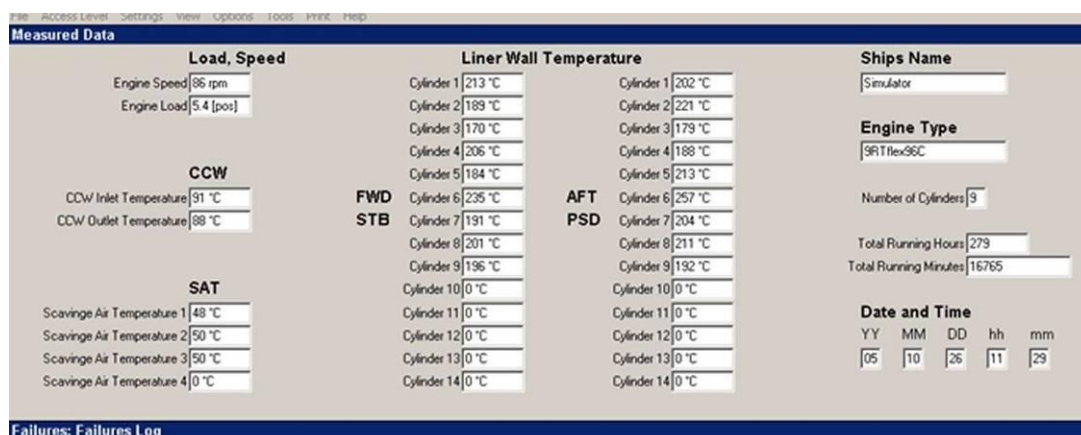


Рис. 1.5. Приклад сигналізації у системі MAPEX

Специфічні умови експлуатації суднових дизелів (зміна погодних умов, складний трафік руху, режими експлуатації за малими і дуже малими навантаженнями з наступним переходом на режими номінальної та максимально допустимої потужності) не дозволяють ідеально прогнозувати процеси, що перебігають під час мащення циліндрової групи суднових дизелів та які описані в функціональному призначенні системи MAPEX. При цьому під час використання системи MAPEX забезпечується зменшення часу на візуальні інспекції циліндропоршневої групи. Це сприяє забезпеченню раціональної подачі мастила на дзеркало циліндрової втулки, підтримці необхідних режимів охолодження втулок циліндрів, своєчасній заміні форсунок циліндрової системи мащення. Результатом наведених чинників є підвищення надійності роботи суднових дизелів, зниження трудовитрат з їхнього обслуговування, зменшення експлуатаційних витрат судновласника. Завдяки аналізу стану циліндрових втулок система MAPEX дозволяє виконувати своєчасне виявлення неполадок у роботі системи циліндрового мащення та проведення технологічних операцій щодо їхнього усунення.

Існують також інші системи (Unimarine Cylinder Scrape-Down Oil Analysis, Shell Analex Alert, Signum onboard test kit of ExxonMobil), які дозволяють виконувати діагностику технічного стану трибосполучень суднових дизелів та забезпечувати контроль експлуатаційних показників моторних мастил, що використовуються в системах циліндрового та циркуляційного мащення [64, 65].

### 1.3. Аналіз способів та технологій, що забезпечують ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів

Причини відмов ДВЗ обумовлюються наявністю одночасно кількох різних вихідних дефектів: конструкційних, виробничих чи експлуатаційних. Близько 30 % відмов виникають внаслідок експлуатаційних причин, 70 % припадає на конструкційні та виробничі дефекти. З усіх наведених вище 50 % становлять відмови циліндрпоршневої групи (ЦПГ), близько 25 % – відмови підшипників ковзання. Також велика кількість відмов припадає на деталі газотурбонагнітача (ГТН) дизеля [66, 67].

Розвиток сучасного судового дизелебудування характеризується збільшенням циліндрової потужності за рахунок форсування двигуна з одночасним прагненням підвищити надійність, економічність та екологічну безпеку за умовою зростаючої інтенсивності експлуатації. Зростання циліндрової потужності внаслідок форсування двигуна призводить до пропорційного підвищення механічної та температурної напруги в деталях ЦПГ, у тому числі й у втулці циліндра. Циліндрпоршнева група двигуна внутрішнього згоряння здійснює термодинамічний круговий процес перетворення теплоти на механічну роботу.

Експлуатація ДВЗ на важких сортах палива (до складу яких, на жаль, разом із вуглеводневими компонентами входять металеві домішки та неорганічні сполуки в більшому відсотковому вмісті порівняно з легкими паливами) призводить до зниження довговічності насамперед деталей ЦПГ. Це пов'язано з підвищеними зносами внаслідок зростання швидкостей абразивного та корозійного видів зношування, що виникає у разі потрапляння металевих домішок та неорганічних сполук у вузькі зазори між поршневими кільцями та кепами поршня, у яких вони знаходяться, а також між поршневими кільцями та циліндровою втулкою [68, 69].

На процес зношування поверхонь тертя втулок циліндрів впливає велика кількість факторів, що залежать від типу двигуна (дво- або чотиритактний), конструктивних особливостей, величин деформації як втулок, також і сполучених деталей (блоку циліндрів, поршня, поршневих кілець), ступеня форсування, застосовуваних палива та моторного мастила, а також дотримання правил технічної експлуатації. У сучасних двигунів максимальний тиск згоряння досягає 15...18 МПа і температура робочої поверхні втулки в зоні верхньої мертвої точки (ВМТ) першого компресійного кільця досягає 350...380 °С. Таким чином, технічний прогрес у галузі дизелебудування, спрямований на збільшення циліндрової потужності сучасних двигунів, неминуче пов'язаний із зростанням питомого тиску тертя та теплової напруженості деталей ЦПГ, що неминуче призводить до погіршення умов тертя та інтенсифікації зношування робочих поверхонь втулок циліндрів.

Зношування робочої поверхні втулки є наслідком процесу тертя поршня і кілець об її стінку. Під час усунення інших причин відмов (тріщини, кавітаційне зношування поверхні та ін.) ресурс втулок циліндрів визначається їхньою зносостійкістю. Найбільшої величини зношування втулок досягає в районах верхнього поршневого кільця (як у двотактних, також й чотиритактних дизелів) і випускних вікон (у двотактних дизелів).

Умови роботи робочої поверхні втулки характеризуються реверсивним тертям, високою тепловою й механічною напруженістю при дії абразивного та агресивного середовищ, мастильному голодуванні, що сприяють розриву захисних плівок, які розділяють поверхні тертя, тому втулки зношуються в основному через адгезійне руйнування. Залежно від властивостей матеріалу та умов тертя цей вид зношування може протікати на субмікро-, мікро- та макро- рівнях з різною інтенсивністю, досягаючи в екстремальному випадку катастрофічної форми – задиру.

Надзвичайно несприятливі умови створюються в місцях реверсування поршня, особливо біля камери згоряння, де висока температура поверхонь

тертя поєднується з найбільшим питомим тиском і найменшою товщиною масляної плівки. Під час наближення поршня до ВМТ за короткий час температура мастильної плівки зростає до 350...400 °С. При цьому йде інтенсивне випаровування мастила та зменшення товщини плівки. Також слід зазначити, що збільшення вмісту сірки в паливі з 0,1 % до 0,5 % призводить до зростання зносу втулок циліндрів внаслідок посилення газової та кислотної корозії та абразивного зношування. У формуванні мастильної плівки велику роль відіграє швидкість переміщення деталей щодо один одного, форма та матеріал кілець, а також їхня конструкція. Вочевидь, що найважчі умови роботи плівки виникають у високотемпературній зоні поблизу ВМТ, де в період зміни напрямку руху поршня може мати місце тертя як за умовою граничного мащення, також і сухого мащення (без наявності мастила між поверхнями) [70, 71]. Подібні явища для двотактних дизелів спостерігаються також поблизу нижньої мертвої точки (НМТ) – у нижній частини циліндрової втулки, на площу якої поршневыми кільцями зсувається мінімальна кількість моторного мастила.

Представимо ЦПГ як систему спільно діючих елементів (що складається з поршня, поршневих кілець та циліндрової втулки) для самостійного виконання заданих функцій. Надійність ЦПГ оцінимо по ймовірності безвідмовної роботи моделі системи із послідовно з'єднаних елементів (рис. 1.6), у якій відмова будь-якого з елементів викликає відмову системи та двигуна. Відмови елементів приймаються незалежно один від одного.

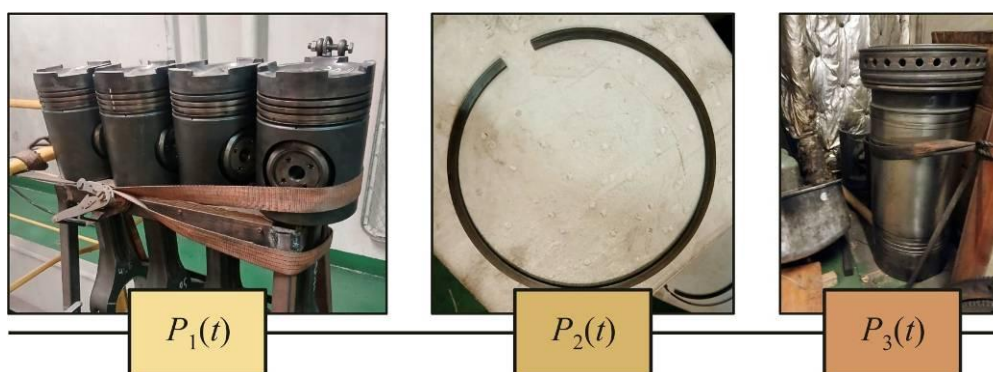


Рис. 1.6. Елементи системи ЦПГ (фото отримані під час інспекції дизеля 6DE-18 Daihatsu Diesel)

Імовірність спільного прояву безвідмовної роботи елементів ЦПГ як незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t);$$

де  $P_1(t)$  – імовірність безвідмовної роботи поршня під час експлуатації;

$P_2(t)$  – імовірність безвідмовної роботи кілець під час експлуатації;

$P_3(t)$  – імовірність безвідмовної роботи втулки під час експлуатації [72].

Подібна схема для трибосполучення колінчатий вал – вкладиш підшипника може бути представлена у вигляді рис. 1.7.



Рис. 1.7. Елементи системи колінчатий вал – вкладиш підшипника (фото отримані під час інспекції дизеля 6DE-18 Daihatsu Diesel)

У цьому випадку ймовірність спільного прояву безвідмовної роботи елементів трибосполучення колінчатий вал – вкладиш підшипника як незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи цих елементів:

$$P(t) = P_4(t)P_5(t);$$

де  $P_4(t)$  – імовірність безвідмовної роботи колінчатого вала під час експлуатації;

$P_5(t)$  – імовірність безвідмовної роботи вкладиша підшипника під час експлуатації [73].

Працездатність ЦПГ оцінюється за три періоди роботи двигуна. Період приробки – відмови під час випробування виробу на початку експлуатації; після ремонту з'являється відбраковування за конструкційними дефектами, технологічними та виробничими. Період нормальної експлуатації – характеризується раптовими відмовами з постійною інтенсивністю. Період інтенсивного зносу – з'являються відмови зростаючої інтенсивності, що викликаються старінням елементів. Усі відмови рівноцінні з тієї позиції, що вони призводять до неможливості виконання дизелем заданих функцій, при цьому їхній вплив на процес експлуатації двигуна різний. Відмова дизеля, що призводить до неможливості використання його за призначенням на даному судні до усунення його поза судном, – найважчий вид відмови. За напрацюваннями до появи повних відмов визначається ресурс дизеля до капітального ремонту. Найскладнішими видами відмов, що усуваються, в процесі експлуатації двигуна є відмови деталей ЦПГ [74, 75]. На рис. 1.8 проілюстровано криву інтенсивності відмов ЦПГ залежно від часу експлуатації.

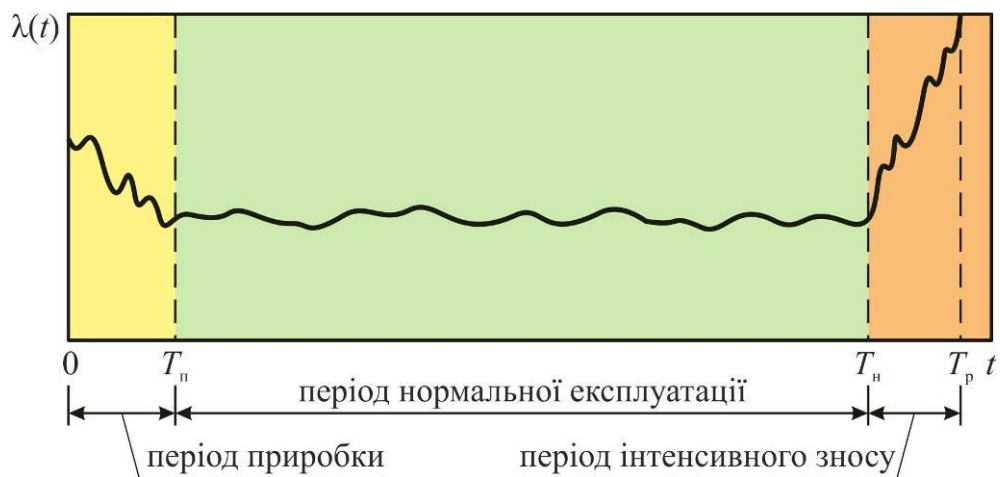


Рис. 1.8. Інтенсивність відмов ЦПГ залежно від часу експлуатації

Розрахункова формула для визначення показників безвідмовності:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t},$$

де  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$  – сумарна інтенсивність відмов у режимах роботи;

$t$  – розрахунковий час роботи (нормативне напрацювання).

Середній час безвідмовної роботи:

$$T_p = \frac{1}{\lambda}.$$

Будь-яка відмова є наслідком дефектів, допущених під час проектування, виготовлення або експлуатації деталі, що відмовила, і призводить до аварії двигуна.

Втулка циліндра зазнає значної механічної та теплової напруги. Під час роботи двигуна на її стінки діють сила тиску газів, нормальна сила тиску поршня та сила тертя, що виникає під час руху поршня. Втулка нагрівається гарячими газами. Перепад температур по обидва боки стінки створює температурні напруги в стінці, причому гарячі волокна внутрішньої поверхні відчувають напругу стискування, холодні волокна з боку охолодження – напруга розтягування. До матеріалу втулок висуваються вимоги: висока міцність, зносостійкість, непроникність для газів та води, стійкість проти корозії, кавітації, хороша оброблюваність. Для виготовлення втулок використовуються леговані чавуни. Для зменшення зношування чавунні втулки іноді покривають шаром пористого хрому [76].

Причинами утворення тріщин у верхній частині втулок можуть бути великі температурні напруги у випадку різкого охолодження перегрітого двигуна, місцевий перегрів втулки внаслідок великого відкладення накипу на зовнішній поверхні втулки в зонах охолодження, корозійні руйнування у вигляді глибоких свищів з боку порожнини охолодження, задир у разі заклинювання поршня.

Обрив опорного пояса втулки найчастіше відбувається як результат надмірного або нерівномірного затягування шпильок кріплення кришки, а також у випадку невдалої конструкції її бурта.

Зношування втулок відбувається нерівномірно: найбільший знос спостерігається – у верхній частині, тому втулка набуває конусності. У

тронкових двигунах бічна сила тиску поршня викликає еліптичність. Підвищене зношування верхньої частини втулки пояснюється високим тиском верхнього поршневого кільця і несприятливими умовами мащення, а також інтенсивними температурними процесами під час згоряння палива.

Корозія зовнішніх поверхонь втулок відбувається як наслідок окислення металу під впливом хлоридів, розчинених у прісній воді кисню, і внаслідок електрохімічних процесів, викликаних хімічною неоднорідністю металу втулки.

Найнебезпечніший дефект втулки – утворення тріщин у районі верхнього посадкового бурта. Через це дефект замінюють до 40 % циліндрових втулок [77].

Заміри зношування деталей ЦПГ проводяться під час проведення перших перевірок (які за часовим інтервалом відповідають закінченню гарантійних термінів), поточних та капітальних ремонтів. На підставі даних, отриманих під час вимірів, розраховується фактична швидкість зношування:

$$v_{\phi} = \omega t_p;$$

де  $\omega$  – фактичний знос, мкм;

$t$  – відпрацьований час, тис. год.

Залишковий ресурс розраховується за однією з формул

$$t_1 = \frac{\omega_n - \omega}{v_{\phi}} \text{ у випадку, коли } v_{\phi} > v_n;$$

$$t_1 = \frac{s_n - s}{v_{\phi}} \text{ у випадку, коли } v_{\phi} > v_n;$$

де  $\omega_n$  – граничний знос, мкм;

$s_n$  – граничний зазор;

$v_{\phi}$  – фактична швидкість, мкм/тис. год;

$v_n$  – нормативна швидкість зношування, мкм/тис. год.

## Швидкість утворення зазору

$$V_{\phi} = \frac{s_{\phi} - s_{\text{м}}}{t};$$

де  $s_{\phi}$  і  $s_{\text{м}}$  – фактичний та монтажний зазори, мкм.

До одного з поширених типів пошкоджень втулок циліндра відноситься кавітаційне зношування і викликані ним кавітаційно-ерозійні руйнування. Дані дефекти спостерігаються на ділянках зовнішньої поверхні, де проявляється вібраційний вплив ударів поршня під час зміни напрямку його руху. Причинами руйнування стінок втулки є процеси, що виникають у системі охолодження та всередині металу під впливом високочастотної вібрації. Процеси зношування втулок із чавунними поршнями відбуваються менш інтенсивно, ніж у втулок із алюмінієвими поршнями. Швидкість кавітаційного зношування може бути зменшена підвищенням жорсткості втулки. Збільшений зазор у нижньому посадковому поясі та недостатня жорсткість втулки призводять до зростання амплітуди коливань та сприяють виникненню тріщин під верхнім опорним буртом [78]. Підвищення жорсткості втулок внаслідок збільшення товщини стінок сприятливо впливає на виключення тріщин під буртами та сприяє зниженню корозійного зношування.

Ресурс експлуатації циліндрових втулок,  $T_p$ , тис. год, може бути визначений за виразом

$$T_p = \frac{s_1 - s_2}{V_{\text{max}}};$$

де  $s_1$  – початкова товщина стінок, мкм;

$s_2$  – гранично допустима в експлуатації залишкова товщина стінок втулки, мкм;

$V_{\text{max}}$  – максимально допустима швидкість зношування за 1000 годин експлуатації, мкм/тис. год.

Основними пошкодженнями таких складових ЦПГ як поршень та поршневі кільця (які також як і втулки циліндра впливають на ресурс ДВЗ) є задири, заклинювання, підвищений знос, а також теплові та динамічні навантаження, які призводять до їхнього руйнування.

Матеріалом для виготовлення поршнів суднових двигунів є сірі чавуни, високоміцні чавуни та алюмінієві ливарні сплави. Переваги алюмінієвих сплавів: менша густина  $\gamma=2700\text{...}2800 \text{ кг/м}^3$  дозволяє знизити масу поршня і, отже, сили інерції. Поршні з алюмінієвого сплаву є більш технологічними під час виготовлення. Недоліки алюмінієвих сплавів: нижчі механічні властивості, ніж у чавуні, що погіршуються під час нагрівання, висока вартість, менший опір зносу. Високий коефіцієнт лінійного розширення вимагає збільшення теплового зазору між поршнем та втулкою. Великий тепловий зазор у разі пуску холодного двигуна спричиняє зниження герметичності циліндрового простору і викликає появу ударів поршня по втулці в момент переходу поршня через мертві точки. Через великий коефіцієнт лінійного розширення (в 2...3 рази вище, ніж у чавуні) необхідно збільшити радіальний зазор між тронком поршня і циліндром майже в 2 рази в порівнянні з чавунними поршнями, що ускладнює пуск двигуна, викликає стуки у випадку роботи на малих навантаженнях і збільшує теплове навантаження верхніх поршневих кілець. До того ж зносу піддається тронк поршня (набуваючи еліптичність), поршневий палець, поршневі кільця. Причини зносу – абразивне та корозійне зношування.

Задири і заклинювання поршня – важка аварія, у результаті якої на поршні та втулці з'являються глибокі ризики, борозни, утворюються тріщини, відбувається відрив головки поршня та обрив шатунного болта. Причини: швидке навантаження непрогрітого двигуна, нерівномірне нагрівання деталей. Поршень нагрівається швидше, ніж втулка, тепловий проміжок між ними вибирається повністю і відбувається заклинювання поршня. Задири та заклинювання – основна причина відмов ЦПГ. Глибокі ризики на втулці та поршні, руйнування кільцевих канавок, поломка кілець,

злами мають статичний характер. Раптові навантаження: теплові, механічні, динамічні – створюють напругу, що значно перевищує запас міцності.

До зниження ресурсу ДВЗ також призводять перекіс руху поршня у втулці, який може виникати через неправильне центрування, а також через поламку поршневих кілець. Тріщини в головці поршня виникають через дефекти конструкцій або порушення правил обкатки дизеля. До перших відноситься ливарний брак: раковини, усадкові тріщини, залишкові напруги, хімічна неоднорідність поршня по висоті поршня і в радіальному напрямку, що впливає на фізичні та механічні властивості виливки, утворює перекіс поршня та заклинювання [79].

Поломка поршневих кілець відбувається у випадку недостатнього теплового зазору у канавці, у разі надмірного зносу кільця та втулки, коли кільця пружно деформуються і руйнуються від напруги втоми. Матеріал для виготовлення кілець: сірий чавун із підвищеним вмістом фосфору, присадками нікелю, хрому та молібдену. Твердість чавунних кілець вище циліндрової втулки, через те, що питома робота тертя кілець значно більша, ніж втулки. Крім того, кільця працюють у більш важких умовах. Залягання кілець у канавках викликає поламку кілець та задири.

У сучасному машинобудуванні використовується велика кількість методів підвищення зносостійкості поверхонь тертя. Найбільш поширеними технологічними методами підвищення зносостійкості та, відповідно, надійності втулок циліндрів є:

- створення нових матеріалів для виготовлення втулок;
- формування оптимальних параметрів макро- та мікроструктури поверхні методом хонінгування;
- лазерне загартування робочої поверхні;
- нанесення антифрикційних покриттів полум'яним напиленням та гальванічним хромуванням;
- формування зносостійких тонкоплівкових покриттів шляхом використання триботехнічних матеріалів;

- керування реологічними характеристиками мастильного матеріалу, що використовується в системах мащення циліндрів [80].

*Створення нових матеріалів.* Провідні дизелебудівні фірми постійно проводять інтенсивні дослідження щодо пошуку нових матеріалів для втулок циліндрів дизелів, спрямовані на підвищення механічних властивостей та зносостійкості чавуну (як основного компоненту, що входить до їхнього складу). Основна вимога до нових матеріалів – висока механічна міцність, яка дозволила б підвищити тиск у циліндрах дизеля для подальшого збільшення циліндрової потужності та зниження питомої витрати палива. Разом з тим нові матеріали повинні мати високу зносостійкість для забезпечення довговічної роботи дизелів на низькоякісному важкому паливі.

Довговічність втулок циліндрів залежить від температури на поверхні тертя в районі верхнього компресійного кільця, питомого тиску в парі «втулка – поршневе кільце», товщини мастила та її властивостей, антифрикційних властивостей матеріалу втулки та поршневого кільця та ін.

Суттєво підвищити твердість і зносостійкість робочої поверхні втулок циліндрів можна нанесенням зносостійких покриттів, загартуванням поверхні та формуванням металокерамічних покриттів шляхом застосування триботехнічних матеріалів, що вводяться у мастило [81, 82].

*Хонінгування верхньої поверхні втулки.* З метою підвищення довговічності пари тертя «втулка – поршневе кільце» застосовується метод формування зносостійкої поверхні втулок циліндрів ДВЗ шляхом керування мікрогеометрією поверхневих шарів деталей з використанням методу хонінгування.

Сформований таким способом мікрорельєф дозволяє стабільно утримувати мастило на стінках циліндрів, внаслідок чого утворюється достатня по товщині мастильна плівка, покращується мащення та охолодження навантажених деталей, мінімізуються втрати на тертя та швидкість зношування.

Слід зазначити, що після хонінгування іноді виконують наступне нанесення антифрикційного покриття для підвищення зносостійкості і зменшення коефіцієнта тертя [83, 84].

*Лазерне зміцнення робочої поверхні втулок циліндрів головних судових дизелів.* Останнім часом для підвищення твердості робочих поверхонь втулок циліндрів використовують потужні лазери. Вони дозволяють здійснювати локальне нагрівання ділянок внутрішньої поверхні втулки із заданою (регульованою) інтенсивністю, при цьому не потрібне примусове охолодження нагрітої ділянки. Таким чином, відбувається поверхневе загартування чавуну (як основного компонента, що входить у матеріали циліндрової втулки).

Напруги, що виникають у поверхневому шарі, підданому лазерному зміцненню, не повинні перевищувати допустиму межу, оскільки утворені при цьому крихкі ділянки можуть бути причиною виникнення тріщин. Для зменшення залишкової напруги, імовірності утворення тріщин і крихкого руйнування загартованих ділянок у втулці необхідне, щоб зміцнені ділянки чергувалися з неукріпленими. Загартування проводиться окремими невеликими ділянками як утворюючою циліндра, так і по гвинтовій лінії.

Процес лазерного зміцнення дедалі більше застосовується під час виготовлення втулок циліндрів середньообертових дизелів (через їх менший розмір). Низький коефіцієнт тертя і спеціальна конфігурація зміцнених зон робочої поверхні втулок циліндрів дозволяють використовувати поршні і кільця, що меншою мірою потребують мащення, що було встановлено при їхній експлуатації дизелебудівними фірмами. Завдяки високим трибологічним характеристикам та значному збільшенню ресурсу пари тертя додаткові капітальні витрати на зміцнені втулки циліндрів швидко окупаються [85, 86].

*Нанесення антифрикційних покриттів* на робочу поверхню втулок циліндрів судових дизелів найчастіше виконується гальванічним методом хромування та плазмовим напиленням. Під час вибору матеріалів, методів

відновлення та зміцнення втулок циліндрів слід мати на увазі наступне: збільшення коефіцієнта тертя в сполученні або підвищений знос будь-якої поверхні сполучення ЦПГ призводить до підвищеного зносу всіх інших деталей внаслідок утворення абразивних частинок та погіршення експлуатаційних умов (зміна мікро- та макрогеометрії сполучених поверхонь і т.і.) [87, 88].

Під час використання втулок циліндрів з хромовим покриттям не потрібне застосування спеціальних сортів мастила. Регулюванням пористості хромового покриття можуть бути оптимізовані параметри витрати мастила та інтенсивності зношування деталей ЦПГ. Знос втулок циліндрів, покритих хромом, так само як і звичайних втулок, залежить від різних експлуатаційних факторів: якості палива та його підготовки, організації процесу згоряння, регулювання системи охолодження, якості та кількості циліндрового мастила, використання головок поршнів з хромованими кільцевими канавками, підтримання правильної геометрії кромки і поршневого кільця. Знос циліндрових втулок та поршневих кілець після проведення процесу їхнього хромування істотно знижується, оскільки коефіцієнт тертя зменшується більш ніж вдвічі порівняно з вихідною парою тертя.

Хромування втулок циліндрів досі знаходить велике застосування під час виготовлення та відновлення деталей СОД. Термін служби втулок може бути збільшений удвічі. Одночасно з цим зменшується сумарна витрата мастила за рахунок тривалого збереження початкової геометрії контактних поверхонь сполучених деталей.

Однак даний метод відновлення та зміцнення втулок циліндрів не знайшов широкого застосування через високу собівартість процесу хромування, необхідність витрат на очищення стічних вод, а також відсутність технології нанесення хромових покриттів товщиною понад 0,4 мм.

*Відновлення та зміцнення втулок циліндрів дизелів плазмовим напиленням* також дозволяє підвищити довговічність втулок. Однак даний

метод не знайшов широкого застосування під час відновлення та зміцнення втулок циліндрів внаслідок низької адгезійної та когезійної міцності покриття та великої ймовірності руйнування покриття в разі роботи двигуна в екстремальних умовах [89].

*Формування зносостійких тонкоплівкових покриттів шляхом використання органо-неорганічних триботехнічних матеріалів.* На даний час велика група триботехнічних матеріалів застосовується для зміцнення поверхонь тертя шляхом модифікування й формування на сполучених поверхнях тонкоплівкових антифрикційних покриттів, які, як правило, перевершують зносостійкі покриття, отримані під час застосування традиційних технологічних методів зміцнення. При цьому втрати енергії на подолання тертя можуть суттєво знизитись, а зносостійкість сполучених деталей підвищитись у 2...4 рази. Найбільш широке застосування для модифікування знайшли мінерали шаруватої будови: серпентиніти, вермікуліт, тальк, слюди, глина, графіт тощо. Їхній позитивний ефект обумовлений здатністю цих матеріалів утворювати на поверхнях тертя тонкі плівки, що складаються з лускатих частинок, орієнтованих паралельно поверхні тертя. Ці плівки (або шари) розділяють тертьові поверхні, згладжують їх мікрорельєф, а у разі тертя без мастила переводять його в тертя внутрішнє, за яким зсув відбувається всередині шару частинок, що дозволяє зменшити ймовірність виникнення катастрофічних видів зношування в трибосполученнях (схоплювання, задир).

Недоліком методу використання органо-неорганічних триботехнічних матеріалів є наступні технологічні обмеження:

- для забезпечення працездатності пари тертя «втулка – поршневе кільце» необхідно постійно підтримувати певну концентрацію цих м'яких металів у мастилі;
- складність створення стійкої суспензії частинок цих металів у мастилі.

Найбільш перспективними триботехнічними матеріалами для присадок до моторних мастил і трибомодифікування під час ремонту деталей є органо-

неорганічні композиції, що містять у великій кількості Si, Al, Sn, Cr та ін. Модифікація поверхонь тертя здійснюється органо-неорганічними матеріалами фрикційним або ультразвуковим методом з постійним контролем технології та визначенням товщини та дисперсності нанесеного шару [90].

Наведені методи відносяться до таких, що використовуються на етапі виробництва втулок дизелів або під час їхнього ремонту чи поновлення. Під час експлуатації судових ДВЗ одним з найбільш ефективних методів зниження зносу циліндрових втулок та підвищення через це їхньої надійності є регулювання реологічних характеристик мастильних матеріалів. Перш за все до них відносяться додавання до моторного мастила спеціальних поверхнево-активних речовин та визначення оптимального дозування мастила на дзеркало циліндрової втулки (для циліндрових систем мащення), а також оптимального періоду поновлення експлуатаційних характеристик моторного мастила (для циркуляційних систем мащення).

Усі існуючі методи зміцнення (за винятком використання триботехнічних матеріалів) вимагають наявності технологічного обладнання та значних матеріальних витрат. Для втулок циліндрів судових дизелів, що мають великі величини зношування, більшість методів відновлення нанесенням покриттів та поверхневого зміцнення пов'язані зі значною собівартістю технологічного процесу (гальванічні покриття) або недостатньої адгезійної міцності покриття та основного металу (методи напилення).

Для умов експлуатації судових дизелів протягом гарантованого фірмами-виробниками періоду міжремонтного періоду найбільш раціональним методом зменшення зносу циліндрових втулок та підвищення їх надійності є управління експлуатаційними характеристиками моторних мастил, що використовуються в системах мащення.

#### 1.4. Аналіз функціональних та експлуатаційних характеристик моторних мастил, що забезпечують процес мащення дизелів суден морського транспорту

Практично всі вузли тертя дизелів суден морського транспорту працюють зі мащенням, через це мастильні матеріали повинні володіти суворо заданими властивостями. Ці властивості визначаються величинами питомого та повного навантаження в зоні тертя; максимальною, середньою та об'ємною температурами в зоні контакту; кінематикою руху в зоні тертя; видом матеріалу контактуючих поверхонь; геометричним станом поверхонь; параметрами середовища, у якому здійснюється процес мащення.

Основною метою мащення зон тертя є забезпечення переважно рідинного тертя, під час якого (на відміну від змішаного, граничного та особливо сухого) спостерігаються найменші втрати енергії на тертя та гарантується контакт поверхонь з мінімальним, або з повною відсутністю їхнього зносу.

Знос різноманітних вузлів та деталей ДВЗ залежить від ряду факторів, які визначаються особливостями конструкції двигуна, умовами його експлуатації, технічним станом двигуна, якістю палива та мастила, що використовуються.

Знос збільшується:

- під час потрапляння абразивних частинок у систему мащення;
- під час підвищення вмісту сірки в паливі;
- під час зміни режимів охолодження деталей двигуна;
- під час накопичення в моторному мастилі води;
- під час підвищення хімічної активності мастила;
- під час збільшення витрат мастила на вигар [91, 92].

Особливе значення набуває знос, що виникає в момент пуску дизеля (пусковий знос). Цей тип зносу перебільшує знос, що виникає під час роботи

дизеля на сталих режимах. Пусковий знос залежить від в'язкості мастила – мастильні матеріали з малою в'язкістю забезпечують більш низький пусковий знос через краще потрапляння до вузлів тертя. Навпаки, під час роботи на сталих режимах перевагу мають мастила, що мають більшу в'язкість.

Для зменшення тертя та зношення різних вузлів та деталей дизеля використовуються мастила, що мають відповідні для цих умов в'язкісно-температурні властивості, які сприяють швидкому пуску дизеля та його надійної роботи в наступний період.

Для зниження тертя та зношення контактних поверхонь судових дизелів використовуються мастильні матеріали. За агрегатним станом вони можуть бути рідкими, пластичними, твердими та газоподібними. Найбільшого розповсюдження в судових дизелях набули рідкі мастильні матеріали (мастила) та пластичні мастильні матеріали (змазки). Мастила та змазки є конструкційним елементом вузла тертя, який багато в чому визначає його ресурс, а також довговічність, надійність та втрати енергії на тертя в трибосполученнях [93, 94].

Ефективність використання мастила у вузлі тертя судових дизелів залежить від багатьох факторів: умов його використання (температури, навантажень, швидкостей переміщення), режиму експлуатації дизеля (сталому, змінному, зупинки, розгону, реверсу), конструкційних особливостей вузла тертя (розміру, характеру руху поверхонь однієї відносно іншої, матеріалу виготовлення).

Як конструкційний матеріал вузла тертя судового дизеля мастило виконує наступні функції:

- зменшує тертя, що виникає між контактними поверхнями;
- знижує знос та попереджує пошкодження деталей;
- відводить теплоту від зони тертя;
- захищає поверхні тертя від корозійної дії зовнішнього середовища;
- забезпечує ущільнення зазорів між контактними поверхнями;

- видаляє з зони тертя продукти зносу, корозії та забруднення [95, 96].

Мастила поділяють за способом отримання та за призначенням.

За способом отримання визначають нафтові, синтетичні та рослинні мастила. У найбільших об'ємах використовуються мастила, що отримують шляхом переробки нафтової сировини (нафтові мастила). Синтетичні мастила, що отримують з вуглеводної або інших видів сировини, та рослинні мастила в судових дизелях використовують у поодиноких випадках.

Нафтові мастила, залежно від способу отримання, поділяють на дистилятні (які отримують через вакуумну перегонку важких фракцій нафти), остаточні (які отримують через вакуумну перегонку залишкових нафтових фракцій), компаундовані (які є сумішшю дистилятних та остаточних мастил).

Найбільш часто використовується класифікація мастил за їхнім призначенням. У теплових двигунах та допоміжному обладнанні СЕУ застосовуються наступні групи мастил: моторне, редукторне, турбінне, компресорне, гідравлічне.

Мастила для ДВЗ прийнято називати моторними мастилами. Цей тип мастильних матеріалів використовується для зменшення тертя, зниження зносу та попередження задиру поверхонь.

Умови роботи моторних мастил визначаються різноманітними робочими температурними та динамічними навантаженнями вузлів та деталей ДВЗ (наприклад, ЦПГ, підшипники ковзання, підшипники кочення, цепні, шестеренні чи редукторні передачі, механізми газорозподілу, розподільні або проміжні вали). Для полегшення підбору моторних мастил вони класифікуються за в'язкістю та рівнем експлуатаційних властивостей.

Класифікація масел за в'язкістю SAE (від Society of Automotive Engineers) є стандартом, який розроблений для оцінки в'язкісних характеристик моторних масел [97]. Відповідно до цього стандарту, моторні мастила, що використовують у судових дизелях, поділяють на чотири класи (таблиця 1.1.)

Таблиця 1.1

Класифікація суднових моторних мастил за в'язкістю, що прийнята SAE

Клас в'язкості	Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с (сСт), за 100°C	
	не менш	не більш
20	5,6	9,3
30	9,3	12,5
40	12,5	16,3
50	16,3	21,9

Рівень експлуатаційних властивостей моторних мастил вказується за класифікацією API (American Petroleum Institute), відповідно до якої моторні мастила поділяються за типом двигуна та умовами його роботи [98]. Стосовно суднових моторних мастил класифікація експлуатаційних властивостей моторних мастил за API наведена у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Класифікація експлуатаційних властивостей моторних мастил за API

Група	Рекомендовані умови використання
SA	Двигуни, що експлуатуються за надмірними навантаженнями та на паливі зі вмістом сірки до 0,1 %
SB	Двигуни без наддуву, що експлуатуються за підвищеними навантаженнями та на паливі з вмістом сірки до 0,5 %
SC	Двигуни з середнім ступенем наддуву, що експлуатуються за підвищеними навантаженнями та на паливі з вмістом сірки до 0,5 %
SD	Двигуни з високим ступенем наддуву, що експлуатуються за підвищеними навантаженнями та на паливі з вмістом сірки до 0,5 %

Проблема забезпечення якісного мащення деталей судових дизелів розв'язується з моменту їхнього широкого розповсюдження та використання на судах морського та внутрішнього водного транспорту. Найбільш гострою вона ставала під час впровадження в судових ДВЗ палива з підвищеним вмістом сірки (до 3,5 % за масою) та збільшення ступеня наддува (більш за 3,0...3,5). Саме за цих умов в циліндрових системах мащення судових двотактних дизелів використовувалось лубрикаторне мастило з підвищеним вмістом лужних речовин, а саме гідроксиду калію КОН. Загальне лужне число (Total Base Number – TBN) цих мастил досягало 70...100, що відповідало вмісту КОН в мастилі на рівні 70...100 мг КОН/г мастила. Поступове зниження вмісту сірки в паливі до 0,5 % та 0,1 % за масою (відповідно до вимог Annex VI MARPOL) сприяло зниженню TBN для моторних мастил, що використовуються в системах циліндрового / лубрикаторного мащення судових дизелів. Водночас з цим у судових чотиритактних дизелях почали використовуватися палива з підвищеною в'язкістю – такі, що відповідають значенням IFO180 та згодом IFO350. Це призвело до необхідності використання в циркуляційних системах мащення цих дизелів моторних мастил, класу SAE30 та SAE40 з відповідним вмістом КОН в мастилі 30 КОН/г мастила та 40 мг КОН/г мастила. При цьому у всіх випадках основним критерієм, що характеризує перебіг процесу мащення, визнавались вміст механічних домішок та зміна TBN мастила протягом часу [99, 100]. Також слід зазначити, що перебіг процесу мащення може бути оцінений за інтенсивністю (швидкістю) зміни цих величин. При цьому швидкість зміни вмісту механічних домішок у мастилі та зміна TBN мастила протягом часу як показники, за якими можливо виконувати діагностування технічного стану судових дизелів та їхніх контактних вузлів не є розповсюдженим методом, тому вимагає уваги та дослідження.

### 1.5. Аналіз основних причин, що впливають на зміну ресурсу технічної експлуатації дизелів суден морського транспорту

Дизелі суден морського транспорту відносяться до одних з найбільш надійних компонентів їхніх енергетичних установок. Суднобудівні верфі та компанії комплектують судна головними та допоміжними двигунами, термін технічної експлуатації яких збігається з терміном експлуатації судна. При цьому існують певні обмеження та умови, що стосуються правил технічної експлуатації судових дизелів, виконання яких забезпечує гарантований термін їхньої надійної роботи. До основних вимог належить моторних мастил відносяться підтримання їхньої в'язкості, загального лужного числа, вмісту механічних домішок та води.

Як зазначалось раніше, функціональним призначенням систем мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту є зниження теплових та механічних напружень між контактуючими поверхнями, а також видалення продуктів зносу, нагароутворення та інших забруднень із зони контакту. Саме потрапляння цих речовин до вузького зазору між контактними парами тертя призводить до погіршення їхньої геометрії, збільшення площі контакту та відповідного підвищення коефіцієнту тертя, температури та зносу поверхонь. Вказані послідовні характерні для всіх основних контактних вузлів судових дизелів та їхніх пар тертя: трибосполучень поршневе кільце – канавка поршня, поршневе кільце – втулка циліндра, вкладиш підшипника – колінчатий вал [101, 102].

Вивченню контактних взаємодій, що виникають під час експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, присвячено багато досліджень. Перш за все це пов'язано зі взаємозв'язком процесів мащення та тертя, з надійністю роботи всіх без винятку судових машин та механізмів. Зміна процесів мащення та тертя в трибологічних системах судових дизелів призводить до зміни (у більшості випадків підвищення)

градієнтів температури, а також підвищенню інтенсивності зношування та безпосередньому зносу контактних поверхонь [103-105].

Експериментально встановлено, що для матеріалів, що мають порівняно досконалі пружні властивості й в умовах, коли їхня температура істотно не змінюється, коефіцієнт тертя не залежить від швидкості. У цьому випадку досконала пружність виключає гістерезисні втрати та забезпечує незалежність від швидкості деформаційної компоненти коефіцієнта тертя. Водночас з цим, висока теплостійкість забезпечує незалежність адгезійної взаємодії. У випадку недосконалого пружного контактування зі зростанням швидкості коефіцієнт тертя переходить через максимум і може мати другий екстремум – мінімум. Максимум коефіцієнта тертя розміщений у зоні швидкостей, що забезпечують найбільші втрати гістерезу. За умови малих швидкостей деформації релаксаційні процеси звужують гістерезисну петлю, через це коефіцієнт тертя знижується. У разі великих швидкостей температура, що виникає в зоні контакту, зменшує адгезійну взаємодію й гістерезисні втрати через скорочення часу релаксації. Внаслідок цього знижується коефіцієнт тертя. Подальше підвищення швидкості ковзання призводить до нового підвищення температури матеріалів, що труться, зниження їхньої твердості, зростання впровадження й деформаційної компоненти сили тертя: коефіцієнт тертя знову може зростати. За порівняно високих тисків, коли під час малих швидкостей можливе суттєве підвищення температури в зоні контакту, зона максимуму коефіцієнта тертя може бути відсутньою [104].

УВ разі пластичного контакту швидкість ковзання може впливати на тертя через швидкість поширення пластичної деформації. Під час збільшення швидкості ковзання пластична деформація локалізується в меншому приповерхневому обсязі та коефіцієнт тертя знижується.

Внаслідок підвищення температури під час зростання швидкості ковзання змінюються міцність та характер адгезійних зв'язків у мастильному матеріалі, який подається до зони тертя. Зі збільшенням температури

змінюється міцність, товщина та природа захисної контактної плівки мастильного матеріалу. У зоні малих швидкостей достатня захисна мастильна плівка не встигає утворюватися й передеформування перетворюється на мікрорізання, що відповідає зростаючій складовій залежності коефіцієнт тертя – швидкість. При подальшому підвищенні швидкості (отже, температури) зниження адгезійної міцності фрикційних зв'язків призводить до зменшення висоти нерівностей і вигладжування поверхні тертя. Внаслідок цього зі зростанням швидкості ковзання шорсткість переходить через максимум, відповідно впливаючи на коефіцієнт тертя. За малих значень швидкості ковзання її вплив чинника, що змінює міцність матеріалу, незначний [105].

Складний комплекс процесів, що перебігають на фрикційному контакті, призводить до складної та неоднозначної залежності коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування від швидкості ковзання, яка по суті є їхньою залежністю від температури. Великий вплив на тертя й знос здійснює градієнт механічних властивостей і конструкція фрикційного з'єднання. Роль конструкції фрикційного з'єднання під час тертя настільки велика, що конструктивні параметри вузла тертя (площа тертя, взаємне перекриття, форма й розміри контактуючих елементів, жорсткість конструкції та інші) виділяються в число основних визначальних факторів поряд з параметрами режиму тертя й властивостями матеріалів, що труться. Вплив конструктивних параметрів вузла тертя на фрикційні характеристики опосередкований і виявляється головним чином через зміну площі фактичного контакту, вплив на утворення й вміст продуктів зносу між поверхнями, що труться, а також через тепловий режим, дію середовища, що оточує вузол тертя. Інтенсивність зношування зі збільшенням номінальної площі поверхні за незмінних інших факторів, що впливають на тертя, має тенденцію до збільшення.

Експериментально встановлено та теоретично обґрунтовано, що зі зменшенням загальної конструктивної жорсткості контакту елементів пари

тертя коефіцієнт тертя зростає внаслідок збільшення площі фактичного дотику. Реальним засобом зниження жорсткості є розбиття загальної площі тертя на окремі елементи, що самостійно навантажуються [106].

Численні дослідження доводять, що в умовах тертя, коли можливе суттєве підвищення температури, вплив зміни конструкції та розмірів фрикційного з'єднання на тертя й знос виявляється через тепловий режим і градієнт механічних властивостей, що виникає внаслідок нагрівання елементом пари тертя.

Конструктивні макрогеометричні параметри фрикційного з'єднання впливають на всі основні характеристики теплового режиму тертя: розподіл теплових потоків, поверхневу температуру, температурний градієнт і об'ємний розподіл температури в тілах, що труться. Через ефективний коефіцієнт тертя конструкція впливає на загальну генерацію теплоти, а через жорсткість елементів, що труться – на рівномірність генерації теплоти й межах номінальної площі контакту. Маса елементів, що труться, теплопоглинаючий об'єм, розміри поверхні тертя й тепловіддаючої поверхні є факторами, що визначають розподіл теплоти і тілах, що труться, поверхневу температуру й інші характеристики температурного поля [107].

Важливою конструктивною характеристикою вузла тертя є коефіцієнт взаємного перекриття. Він являє собою відношення площ тертя елементів, що труться. Великий вплив цього показника на тертя пояснюється тим, що від його значення суттєво залежать тепловий режим, напружений стан і можливість проникнення навколишнього середовища на поверхню тертя, утримання або видалення продуктів зносу. Неповне взаємне перекриття забезпечує можливість тепловіддачі відкритих ділянок поверхні тертя; при повному перекритті вся теплота йде в глиб тіл, що труться. Тому зі зменшенням взаємного перекриття є тенденція до зниження середньої поверхневої температури та зростання температурного градієнта. Тобто менше взаємне перекриття за умову постійного тиску забезпечує більш легкий тепловий режим тертя (температуру й градієнт температури).

Практика підтверджує, що для багатьох важконавантажених фрикційних пристроїв зменшення коефіцієнта взаємного перекриття призводить до підвищення коефіцієнта тертя та більшої стабільності у разі зміни температури. Зміна взаємного перекриття може суттєво впливати на напружений стан тіл, що труться, і виникнення окисних плівок.

Навколишнє середовище під час тертя розглядається як фактор, що впливає на розвиток фізико-хімічних явищ у зоні тертя і, отже, на тертя та зношування.

Встановлено, що форма та розміри вузла тертя, коефіцієнт взаємного перекриття є факторами, що впливають на надходження мастильного матеріалу до зони фрикційного контакту. Для цього пропонується метод моделювання фізико-хімічних явищ, що залежать від дії навколишнього середовища під час тертя різних антифрикційних та фрикційних матеріалів; критерії моделювання та масштабні коефіцієнти переходу, що отримані з умов подібності процесів тертя, зношування та теплоутворення [108, 109].

При цьому складання математичних моделей більш характерно для прогнозування стану контактних поверхонь та поведінки мастильного матеріалу під час проектування та початкових етапів експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Збільшення тривалості експлуатації дизелів призводить до виникнення в трибологічних системах внутрішніх факторів, які не можливо запрограмувати або змоделювати на етапі проектування. Також важливим чинником, що зумовлює певну обмеженість математичних моделей процесів мащення, стану мастильного матеріалу та утворення продуктів зносу, є випадковість процесів тертя.

Це зумовлює пошук додаткових шляхів визначення технічного стану контактних поверхонь судових дизелів та діагностування його ресурсних показників.

## 1.6. Висновки за розділом 3 та постановка завдання дослідження

Як результат інформаційного пошуку та аналізу літературних джерел з розв'язання завдання із забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів, що виконано в 1-му розділі визначимо наступне.

1. Судна морського транспорту посідають домінуюче положення під час забезпечення міжнародних перевезень між країнами та континентами. Рух суден та функціонування внутрішньосудових систем неможливий без використання судових дизелів, однією з систем, що забезпечує їхню роботу та через це сприяє надійності морських суден та своєчасному виконанню ними транспортних завдань, є система мащення.

2. Через важливість функціональних завдань, що покладені та які виконуються системами мащення (циліндровою та циркуляційною), саме вони забезпечують ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів.

3. Погіршення умов мащення основних контактних вузлів дизелів суден морського транспорту, поступова або стрибкоподібна зміна в негативний бік функціональних характеристик моторного мастила призводять до виникнення критичних та надкритичних динамічних та теплових навантажень основних деталей дизеля, що сприяє зменшенню їхнього ресурсу.

4. Особливості експлуатації суден морського транспорту та, відповідно, дизелів, що виконують на суднах функції головних та допоміжних двигунів, не дозволяють проведення візуальних інспекцій стану внутрішніх контактних поверхонь дизелів (втулки циліндра, поршневі кільця, колінчатого вала, вкладишів підшипників). Через це основним способом діагностування їхнього технічного стану та підтримання їхнього ресурсу є діагностування експлуатаційних характеристик моторного мастила.

5. З урахуванням викладеного, як завдання дослідження обрано розробку методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Вибір теми дисертаційного дослідження та визначення наукових завдань дослідження

Дослідження, що проводяться в Національному університеті «Одеська морська академія» за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом, також і за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту, базуються на теоретичних розробках відомих українських науковців д-ра техн. наук, професора Володимира Голікова, д-ра техн. наук, професора Анатолія Мальцева, д-ра техн. наук, професора Олега Онищенка, які розробили та впровадили власну методологію проведення наукових досліджень [110]. Відповідно до їхніх методологічних розробок, науково-прикладні дослідження, що пов'язані з морським транспортом, повинні виконуватися за філософським методом сходження від «загального» через «часткове» до «особистого». Саме цей стратегічний підхід забезпечує усунення всіх малозначних факторів, що впливають на науковий результат, та обов'язковий розгляд усіх внутрішніх змін та зовнішніх збурень, які утворюють вирішальну дію на розв'язання завдань дослідження.

З урахуванням спрямованості наукових досліджень, що проводяться в НУОМА, на підставі аналізу тенденцій розвитку суден морського транспорту, враховуючи запити практики щодо забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів морських суден, завдяки аналізу сучасних нерозв'язаних науково-прикладних завдань із забезпечення ефективної експлуатації морських суден, була обрана **тема наукового дослідження** – «Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила».

Вибору теми наукового дослідження також сприяли наступні постулати:

- експлуатація суден морського транспорту нерозривно пов'язана з експлуатацією суднових дизелів, що виконують функції головних,

допоміжних або аварійних двигунів, які встановлюються на судах будь-якого дедвейту та призначення;

- експлуатаційна надійність та ресурсозберігаюча експлуатація дизелів суден морського транспорту неможлива забезпечення мащення контактних поверхонь їхніх основних вузлів, за допомогою яких потенційна енергія палива перетворюється на кінетичну енергію кривошипно-шатунного механізму та пов'язаного з ним споживача цієї енергії – електричного генератора або гвинта;

- якість процесу мащення оцінюється експлуатаційними характеристиками моторного мастила шляхом використання систем контролю, регулювання та діагностування.

Обрана тема дисертаційного дослідження визначена його **мету** – забезпечення ресурсу роботи судових дизелів протягом усього гарантованого терміну їхньої експлуатації.

Науковою **гіпотезою**, доведення якої забезпечить досягнення мети дослідження визначена теза про забезпечення ресурсу роботи судових дизелів, що досягається шляхом діагностування та подальшого управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила систем циліндрового та циркуляційного мащення, якими є градієнт швидкості зміни загального лужного числа та швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі.

Як **головне завдання** дисертаційного дослідження визначено вдосконалені методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила.

Складність головного завдання змушує виконати його декомпозицію на три допоміжних завдання:

- 1) визначення якісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів;

- 2) визначення кількісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів;

3) аналіз зміни ресурсозберігаючих показників суднових дизелів за різних умов їхньої експлуатації.

Синтез розв'язання цих завдань сприятиме знайденню рішення головного завдання, визначення його наукового результату та формулювання наукового положення дисертаційного дослідження.

Актуальність проведення дослідження зумовлена вимогами та рекомендаціями положень Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках (Постанова КМУ від 27.12.2024 р. № 1550), зокрема виконанням завдань за такими стратегічними цілями: відновлення та розвиток конкурентоспроможної та ефективної транспортної системи, інтегрованої до транс'європейської транспортної мережі, відповідно до політики та стандартів ЄС; безпечний, людиноцентричний, екологічний та енергоефективний транспорт з курсом на декарбонізацію; досягнення інституційної спроможності, розвиток людського капіталу та забезпечення ефективного управління в галузі транспорту [111].

Дослідження виконувались у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Дунайського інституту НУОМА «Розробка концепції безпечної експлуатації суднових систем та обладнання» № ДР 0118U007602 (2018–2021 рр.), «Аналіз і розробка методів та підходів до підвищення ефективності управління та експлуатації судновими системами та комплексами» № ДР 0123U101514 (2023–2026 рр.), у яких автор дисертації брав участь, виконуючи окремі розділи.

Як **об'єкт дослідження** визначено процес експлуатації дизелів суден морського транспорту.

Як **предмет дослідження** прийнято процес мащення циліндро-поршневої групи та підшипників ковзання дизелів суден морського транспорту.

Розв'язання завдань, визначених та виконаних в дослідженні, є продовженням теоретичних та практичних досліджень д-ра фіз.-мат. наук,

професора Козицького С.В., д-ра техн. наук, професора Сагіна С.В., к-та техн. наук, доцента Заблоцького Ю.В., к-та фіз.-мат. наук Кіріяна С.В., д-ра філософії Кривого М.О., д-ра філософії Столярика Т.О., що були присвячені визначенню шляхів забезпечення енергетичної ефективності суден морського транспорту, підвищенню ефективності експлуатації судових дизелів та їхніх систем мащення, підтриманню та поновленню експлуатаційних характеристик моторних мастил, що використовуються для забезпечення функціонування судових дизелів [112-115].

Основне формулювання теми дослідження логічно випливає з формулювання одного завдання чи деякої сукупності пов'язаних нерозв'язаних завдань. При цьому важливою є наукова чіткість формулювань головного завдання та допоміжних завдань, що не допускає неоднозначності тлумачення понять. Надзвичайно важливим є формулювання необхідних результатів досліджень та результатів етапів досліджень. Особливо важливими є формулювання необхідних результатів, що дозволяють кількісно оцінювати властивості процесів, характеристики об'єкта та його взаємодії з іншими об'єктами.

Актуальність теми – визначається її цінністю на даний момент для прогресу науки та техніки. Новизна теми визначається відсутністю її розробки у минулому та нині (відсутність паралельного розв'язання іншими науковцями).

Основними етапами науково-дослідної роботи є:

- 1) розробка техніко-економічного обґрунтування необхідності теоретичних та експериментальних досліджень;
- 2) формулювання теми;
- 3) формулювання мети та завдань дослідження;
- 4) інформаційний пошук;
- 5) моделювання;
- 6) аналіз та оформлення результатів наукового дослідження;
- 7) використання результатів та визначення ефективності.

## 2.2. Використання системного підходу під час розв'язання науково-прикладних завдань із забезпечення ефективності експлуатації суден морського транспорту

Розв'язання науково-прикладних завдань із забезпечення ефективності експлуатації суден морського транспорту виявляється як комплексна система теоретичних знань та практичних досліджень.

Методологія наукових досліджень тісно пов'язана з філософським визначенням низки процесів, явище та дій. Як філософське поняття методологія визначається сукупністю способів та прийомів дослідження, що застосовуються в тій чи іншій сфері людської діяльності. Методологія наукової діяльності – сукупність методів, прийомів, що застосовуються в наукових дослідженнях. З філософської точки зору, знання – ідеальне відтворення в мовній формі узагальнених уявлень про закономірні зв'язки об'єктивного світу. Процес руху від незнання до знання називають пізнанням. Пізнання включає два рівні: чуттєвий і раціональний. Чуттєве пізнання формує емпіричне знання, одержане у вигляді відчуттів, сприйняття, уявлення та уяви. Раціональне пізнання дозволяє розкрити закономірності явищ та процесів в реальному світі. У філософському словнику думкою називають дію розуму. Мислення – це розумова, пізнавальна діяльність людини, результатом якої є думка. Мислення активно і включає у собі увагу, сприйняття виникнення асоціацій, освіту понять. Теоретичне понятійне мислення – вид мислення, під час реалізації якого людина виконує дії на думці, користуючись поняттями і виконуючи досліди. Теоретичне образне мислення – вид мислення, під час реалізації якого людина використовує створені уявою образи. Теоретичне понятійне мислення притаманно досліджень технічних засобів, теоретичне образне – для працівників літератури й мистецтв. Наочно-дійсне мислення – розумова діяльність,

спрямовану наступну перетворювальну діяльність із матеріальними об'єктами [116].

Однією з форм мислення, що найбільш ефективно застосовується при вирішенні науково-прикладних завдань, є абстрактне. Абстракція – відволікання в процесі мислення від несуттєвого з виділення істотних закономірних ознак. Форми мислення, у яких відбиваються найбільш загальні, істотні та необхідні властивості, називають поняттями, є основним матеріалом мислення. Крім понять, формами абстрактного мислення є:

- судження – думка, що відбиває наявність чи відсутність будь-якої ознаки предмета;
- висновок – розумові дії, в результаті яких з одних суджень виводяться нові судження.

Мінімум необхідних властивостей забезпечує високий ступінь абстракції. Врахування великої кількості факторів, деталей знижує ступінь абстракції. Відобразити все, що відбувається, неможливо. Ступінь абстракції щодо технічних засобів зазвичай визначений сформульованою гіпотезою.

Під час реалізації дослідження використовують два прийоми – поділ або декомпозиція та об'єднання (комплексний підхід). Обґрунтована декомпозиція об'єкта дослідження на елементи веде до спрощення дослідження. Наукове знання має два рівні: теоретичне та емпіричне. Науковим методом є сукупність основних способів отримання нових знань та методів, вирішення завдань у будь-якій науці. Емпіричний матеріал отримують, спостерігаючи об'єкт безпосередньо та усвідомлюючи його властивості, і за допомогою приладів. Теоретичний об'єкт є абстрактна модель реального об'єкта, виражена спеціальною мовою – науковими термінами, знаками штучної мови.

Емпіричний рівень пізнання характеризується наявністю спостереження, опису, порівняння, виміру, експериментів. Теоретичний рівень дослідження містить формалізацію, моделювання, ідеалізацію, а також формулювання гіпотез та аксіом. Через війну формуються закони, теорії.

Цілями теоретичних досліджень є отримання знань про зв'язки між досліджуваним об'єктом та навколишнім середовищем, виявлення закономірностей та їх формалізація, пояснення та обговорення результатів емпіричного дослідження, передбачення фактів. Наукова теорія є системою абстрактних понять і тверджень, що ідеалізовано відображає дійсність.

Транспортні засоби – об'єкти, здатні транспортувати (переміщати в просторі) матеріальні об'єкти. Але транспортні засоби можуть мати різні важливі властивості – здатність здійснювати транспортні операції в різних середовищах. Таким чином, утворюються підкласи транспортних засобів – водний, наземний, повітряний транспорт.

Основні етапи наукового пізнання можна подати в наступній послідовності:

- виникнення ідей;
- формування понять, суджень;
- висування гіпотез;
- проведення наукових досліджень;
- узагальнення наукових фактів;
- доказ правильності гіпотез та суджень.

Основними завданнями наукового дослідження є:

1) збирання, опис, аналіз, узагальнення та пояснення фактів, явищ, процесів;

2) виявлення законів природи, суспільства, мислення;

3) систематизація отриманих знань;

4) прогнозування подій, явищ, процесів;

5) встановлення напрямів та форм практичного використання отриманих знань.

Метод наукового дослідження – це спосіб пізнання об'єктивної реальності. Спосіб є певною послідовністю дій, прийомів, операцій. Методи наукових пошуків класифікують відповідно до галузей науки: математичні, біологічні, технічні, економічні та ін.

Залежно від рівня пізнання виділяють методи емпіричного, теоретичного та метафізичного рівнів. Методи емпіричного рівня – це спостереження, опис, порівняння, рахунок, експеримент, моделювання та ін. Вимірюванням називають процес визначення чисельного значення величини шляхом порівняння з еталоном.

До методів теоретичного рівня відносять аксіоматичний, гіпотетичний (гіпотетико-дедуктивний), формалізацію, абстрагування, аналіз, синтез, індукцію, аналогію та ін.

Методами метатеоретичного рівня є діалектичний, метафізичний метод системного аналізу.

Метафізичний метод полягає в розкладанні об'єкта, що досліджується на частини та досконального вивчення кожної з цих частин. Відповідно до структурного (системно-структурного) методу об'єкт розглядають і вивчають як цілісну сукупність (систему) взаємозалежних та взаємно необхідних елементів. Вивчають функціональні призначення елементів, їх впливом геть властивості системи.

Одним із основних методів в сучасних наукових дослідженнях є моделювання – використання матеріальних та ідеальних моделей. В інженерних дослідженнях використовують чотири види моделей: фізичні, натурні, дескриптивні, математичні.

Під час фізичного моделювання фізика явищ у моделі така ж, як в об'єкті, що моделюється. Математичні описи явищ та процесів в моделі та об'єкті однакові. За допомогою фізичних моделей вивчають вплив параметрів на властивості процесів [117].

Натурні моделі являють собою об'єкти, що змінюються, з можливостями зміни параметрів. Вони дозволяють найбільш повно досліджувати процеси, що протікають в об'єкті, що моделюється в реальних умовах.

Математична модель є ідеальною і є наближеним описом об'єкта за допомогою математичних символів (мовою математики). Все, що дано за умовою, є аксіомами – виразами, що не потребують доказів. Наслідки,

одержані з умов – теореми. Математичні моделі використовують для моделювання явищ, що важко піддаються вивченню на фізичних моделях. Математичне моделювання потребує менше витрат, ніж фізичне.

Дескриптивні (описові, текстові) моделі дозволяють описати суть об'єкта. Їх складання передуює вибору виду моделі об'єкта, а також використовується в документах, що містять плани досліджень, їх перебіг – результати та інтерпретації. Для вибору виду моделі опис об'єкта, процесів в ньому та його властивостей спрощують, виділивши найбільш важливе, що характеризує об'єкт у частині поставлених завдань дослідження.

Фізичні та економічні процеси досліджують математичними методами, які групують таким чином:

- аналітичні методи, що використовують елементарну математику, диференціальне, інтегральне, варіаційне обчислення та інші розділи вищої математики. Ці методи дають змогу досліджувати кількісні залежності функцій від аргументів. Широко застосовуються графічні моделі: графіки, схеми взаємозв'язків, графи;

- методи, що ґрунтуються на використанні теорії подібності, розмірностей та зазвичай використовують у ході своєї реалізації результати експериментів. Під час реалізації цих методів використовується та виробляється велика кількість інформації;

- комп'ютерне моделювання ґрунтується на застосуванні обчислювальних засобів для розрахунків, що дозволяють оцінити значення характеристик об'єктів, процесів, виконувати прогнозування. Використовують моделі математичного аналізу.

Будь-яка модель повинна бути адекватною, що відповідає реальному об'єкту щодо властивостей, що моделюються. Модель має бути несуперечливою, правильно відображати закони природи, причинно-наслідкові зв'язки.

Застосування математичних моделей вимагає достатньо точного завдання вихідної інформації (значення параметрів об'єкта, характеристик

впливу, крайових та граничних умов) для отримання достовірних результатів. Реальні вихідні дані є абсолютно точними. Модель має бути робастною (стійкою до змін вихідних даних) – малі зміни вихідних даних повинні призводити до прийнятних змін рішень. Критерії адекватності математичних моделей – логічні та кількісні. Мета математичного моделювання полягає не тільки у виконанні розрахунків, також обов'язково в аналізі та інтерпретації результатів.

Системний підхід до наукового дослідження передбачає послідовне встановлення та розв'язання наступних етапів:

- визначення запитів практики;
- формулювання теми та встановлення мети;
- висування гіпотези;
- визначення головного завдання та його декомпозиція на допоміжні завдання;
- розв'язання допоміжних завдань та формулювання наукових результатів;
- синтез результатів допоміжних завдань, розв'язання за їхньої допомоги головного завдання та формулювання наукового результату;
- визначення наукової значимості та практичної цінності;
- формулювання наукового положення.

Використання системного підходу до розв'язання науково-прикладних завдань сприяло розробці замкненого циклу наукового дослідження, який узагальнений як технологічна карта наукового дослідження, що наведена на рис. 2.1.

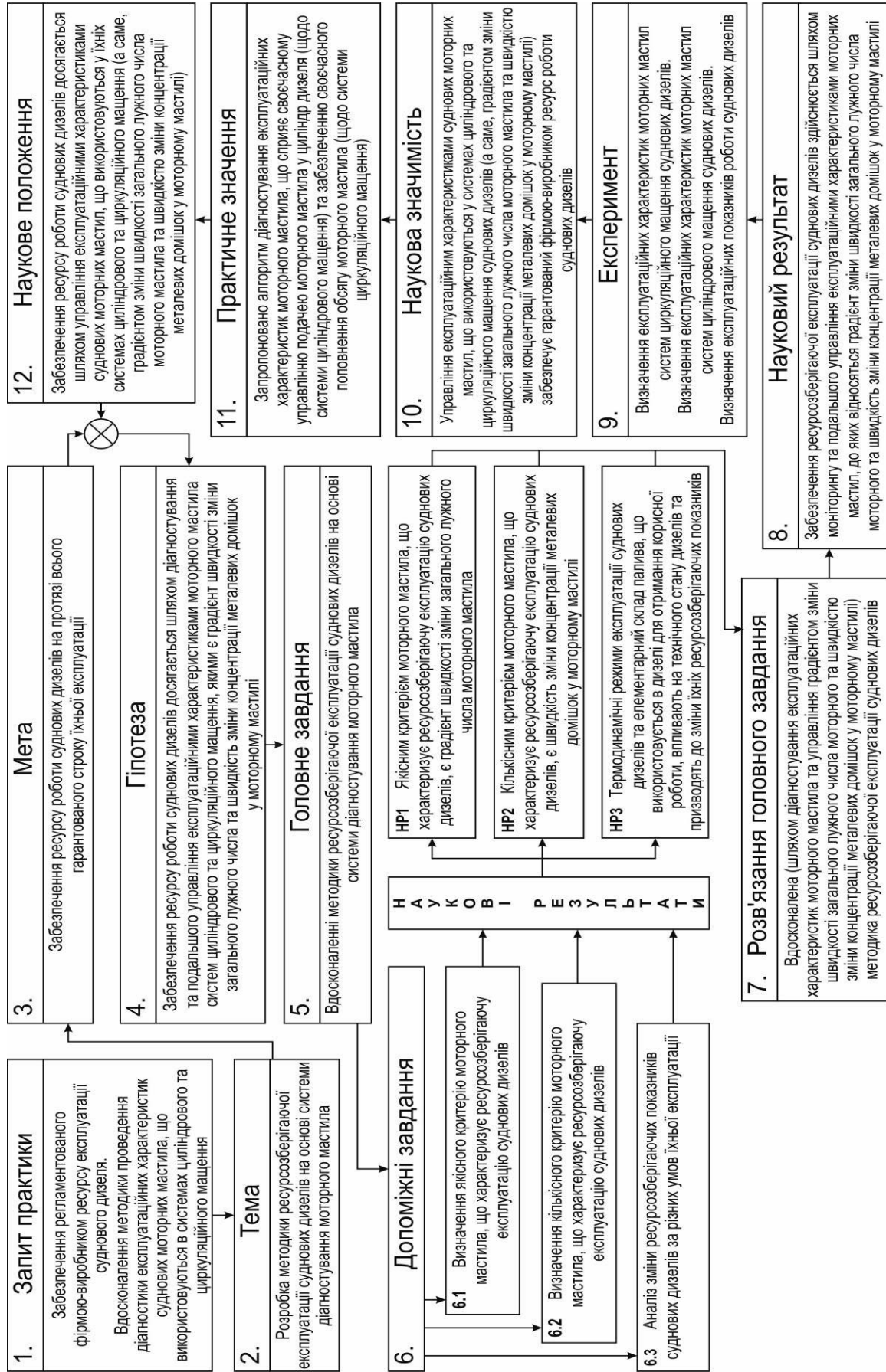


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

### 2.3. Організація та проведення експериментальних досліджень

Експеримент – найважливіша сфера людської діяльності, в якій піддається перевірці істинність гіпотез, що висуваються, або виявляється закономірність. У дослідницькій роботі термін «експеримент» використовують для позначення наступних дій: формулювання цілей; наукова постановка досвіду; цілеспрямоване спостереження; відтворення об'єкта пізнання; перевірка пророцтв при повторенні умов. Основною частиною експерименту є виявлення властивостей об'єкта, що досліджується.

Експерименти розрізняються за способом формування умов – природних чи штучних. За цілями експерименти ділять на контролюючі, пошукові, перетворюючі, констатуючі. Щодо організації проведення – на лабораторні, виробничі, натурні (на реальному об'єкті в реальних умовах).

Пасивний експеримент виконують шляхом вимірювань обраних показників без штучного втручання у функціонування об'єкта. Активний експеримент проводять із створенням контрольованих зовнішніх впливів на об'єкт. За кількістю факторів, що варіюються він може бути однофакторним і багатофакторним.

Цілі проведення експериментальних досліджень:

- виявлення раніше невідомих властивостей;
- перевірка правильності теоретичних побудов;
- демонстрація явища.

Основні етапи експериментальних досліджень:

- розробка гіпотези, яка підлягає перевірці;
- формулювання цілей та завдань;
- розробка програм експериментальних робіт;
- визначення параметрів, що варіюються, та їх рівнів;
- розробка методик проведення експериментів – сукупності чисельних та фізичних операцій, їх послідовності;

- забезпечення умов проведення експериментів;
- технологічне забезпечення (обладнання, установки, речовини тощо);
- метрологічне забезпечення;
- забезпечення обробки даних;
- підготовка персоналу.

Основні види експериментів:

- вибірковий експеримент, що дозволяє виділити групи найбільш суттєвих факторів;
- експеримент для дисперсійного аналізу, що дозволяє досліджувати об'єкти з кількісними (якісними) факторами;
- регресійні експерименти, що дозволяють отримати регресійні моделі;
- експерименти екстремального дослідження об'єкта, що дозволяють визначити умови (значення факторів), за яких спостерігається максимум або мінімум функції мети;
- експерименти щодо вивчення динамічних процесів.

Мінімальна кількість значень кожного фактора визначається кількістю властивостей функції регресії, які мають бути відображені. Планування експерименту – це дії з визначення кількості експериментів, послідовності та умов проведення, необхідні розв'язання поставлених завдань із необхідною точністю.

Планування експерименту здійснюється з метою:

- мінімізації загальної кількості дослідів;
- одночасного варіювання всіма змінними, від яких залежать характеристики процесу;
- використання математичного апарату;
- вибору чіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтоване рішення після кожної серії дослідів.

Особливо важливе значення має правильність методики проведення експериментів – сукупності розумових та фізичних операцій у певній часовій та просторовій послідовності. Висунуті гіпотези визначають чинники, що

варіюють. Межі змін значень факторів та їх вимірів містяться в методиці. Кожен експеримент повинен мати план (програму), який включає: ціль та завдання; вибір факторів, що варіюють; обґрунтування обсягу експерименту, числа дослідів; порядок реалізації дослідів, послідовність зміни факторів; кроки зміни факторів чи послідовність їхніх числових значень; вимоги до вимірювальних засобів, обладнання, їх перелік та кількість; схеми; способи обробки інформації про результати дослідів та їхніх аналіз.

Результати експериментів мають відповідати трьом статистичним вимогам:

- ефективність оцінок, що визначається дисперсією відхилень;
- спроможність оцінок, що визначається обсягами вибірок вимірюваних величин;
- стабільність оцінок, що практично зводиться до відсутності систематичних помилок.

Під час проведення дисертаційного дослідження експерименти виконувались на морських судах різного дедвейту та призначення:

- суднах класу Bulk Carrier дедвейтом 63580 тонн, 63750 тонн, 64700 тонн з головними двигунами 6S50ME MAN-B&W.
- судні класу Container Ship з головним двигуном 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та допоміжними двигунами 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo;
- судні класу General Cargo з головним двигуном 5L35MC MAN-B&W та допоміжними двигунами 5H17/28 Hyundai Heavy Industries;
- універсальному судні водотоннажністю 37200 тонн з допоміжними двигунами . 6DK-20e фірми Daihatsu Diesel;
- універсальному судні з двигунами 6R26 Wartsila.

Під час досліджень використовувалось лише ліцензійне обладнання, погоджене з відділом технічного менеджменту фірм, яким належали судна.

Частина експериментального аналізу виконувалась у берегових дослідницьких лабораторіях.

## 2.4. Висновки за розділом 2

Як результат досліджень, що виконані в розділі 2, визначимо наступне.

1. З урахуванням галузі наукових знань «транспорт» та наукової спеціальності «експлуатація та ремонт засобів транспорту», на підставі аналізу способів та технологій, що забезпечують ресурсозберігаючу експлуатацію суднових дизелів сформульована тема наукового дослідження – «Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила» та визначена мета дослідження – забезпечення ресурсу роботи суднових дизелів протягом всього гарантованого терміну їхньої експлуатації.

2. Як об'єкт дослідження визначено процес експлуатації дизелів суден морського транспорту.

Як предмет дослідження прийнято процес мащення циліндро-поршневої групи та підшипників ковзання дизелів суден морського транспорту.

4. Головним завданням дисертаційного дослідження визначено вдосконалення методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила.

Як допоміжні завдання обрані:

- визначення якісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію суднових дизелів;

- визначення кількісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію суднових дизелів;

- аналіз зміни ресурсозберігаючих показників суднових дизелів за різних умов їхньої експлуатації.

4. Використання філософського методу сходження від «загального» через «часткове» до «особистого» та системний підхід до методології наукових досліджень сприяли розробці технологічної карти наукового дослідження.

### РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ МАЩЕННЯ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ МІЖ КОНТАКТНИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

#### 3.1. Математичне моделювання зміни технічного стану контактних поверхонь дизелів суден морського транспорту під час отримання корисної роботи

Ресурс роботи дизелів суден морського транспорту нерозривно пов'язаний з виникненням контактних взаємодій та втрат енергії під час перетворення зворотно-поступального руху поршня в циліндрі дизеля на обертальний рух колінчатого валу. Рівень цих втрат визначається коефіцієнтами тертя у вказаних раніше трибологічних системах, контурним тиском між контактними елементами, а також шорсткістю цих поверхонь. Аналітичні вирази, що визначають ці показники, мають емпіричний характер та залежать від багатьох зовнішніх та внутрішніх факторів. При цьому головною складовою, що забезпечує зниження втрат енергії та відповідно сприяє забезпеченню ресурсу суднових дизелів, є процес мащення. Вміння управління цим процесом, а також керований вплив на експлуатаційні показники моторного мастила, які при цьому використовуються, відкриває додаткові можливості для забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів.

Сила тертя, що виникає між тілами, які труться, дорівнює сумі сил, що виникають під час взаємодії окремих мікронерівностей. Опір руху довільної мікронерівності залежить від фізико-хімічного стану поверхонь тертя, тіл, що взаємодіють, і напруженого деформованого стану в зоні контакту. Під час визначення сил і коефіцієнтів зовнішнього тертя розглядається взаємодія абсолютно жорсткого тіла з шорсткою поверхнею з менш жорстким твердим тілом, що має гладку поверхню.

Під навантаженням відбувається проникнення довільної мікронерівності  $h_i$  до іншої поверхні. Поверхні твердих тіл, що взаємодіють, покриті

плівками, які утворюються як результат фізичної адсорбції та хемосорбції. Поверхні зближуються на відстані, у яких у більшості випадків можливі міжмолекулярні, але на окремих ділянках і міжатомні взаємодії. У результаті цих взаємодій у зонах фактичного торкання між частинками (які складають поверхневі шари) виникають зв'язки, зокрема, можуть з'являтися водневі та координаційні зв'язки [118].

Під час ковзання жорстка мікронерівність деформуватиме матеріал поверхневих шарів менш жорсткого тіла. Як результат і виникатиме опір цьому деформуванню. Міжатомні та міжмолекулярні взаємодії, проміжні взаємодії, що призводять до утворення водневого та координаційного зв'язку, а також макроскопічна електрична взаємодія, обумовлена реологічними властивостями, викликають появу опору відносному ковзанню. Сила, яка зумовлена цими взаємодіями, є молекулярною складовою сили тертя  $T_m$ . Сила опору, обумовлена деформуванням матеріалу поверхневого шару мікронерівності, є деформаційною складовою сили тертя  $T_d$ . Молекулярна  $T_m$  і деформаційна  $T_d$  складові сили зовнішнього тертя взаємопов'язані і взаємно впливають один на одного, проте ними в більшості випадків можна знехтувати. Тоді сила тертя, що виникає під час ковзання окремої мікронерівності.

$$T_i = T_{mi} + T_{di}. \quad (3.1)$$

Таким чином, зовнішнє тертя має подвійну природу: з одного боку, воно обумовлено деформаціями матеріалу поверхневих шарів мікронерівностями, з іншого – взаємодіями між частинками, що становлять поверхневий шар твердих тіл. Такий характер взаємодії твердих тіл описується молекулярно-механічною чи адгезійно-деформаційною теорією тертя. Молекулярно-механічна теорія є більш загальною, оскільки пояснює зовнішнє тертя твердих тіл у ширшому діапазоні умов роботи рухомих сполучень. Адгезійно-деформаційна теорія є окремим випадком молекулярно-механічної. Молекулярна складова сили зовнішнього тертя

$$T_{mi} = \tau_n A_{ri}.$$

де  $\tau_n$  – дотична напруга;

$A_{ri}$  – фактична площа торкання.

Виходячи з будови поверхневих шарів реальних твердих тіл, можна вважати, що під час контактування цих тіл поверхні їх у зоні контакту розділені шаром сорбційних плівок. Сукупність цих плівок є «третім тілом». При ковзанні одного з тертьових тіл відбувається протягом третьому тілі, внаслідок в'язкості якого з'являються дотичні напруги  $\tau_n$ .

За законом Ньютона питома сила опору в'язкої течії

$$\tau_n = \eta \frac{dv}{dz},$$

де  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;

$dv/dz$  – градієнт швидкості [119].

За умовою незмінної швидкості ковзання вважатиметься градієнт швидкості постійним, тобто.

$$\tau_n = c_1 \eta. \quad (3.2)$$

де  $c_1$  – коефіцієнт пропорційності;

$\eta$  – динамічна в'язкість.

За Френкелем,

$$\eta = A(T_k) \exp \frac{w}{KT_k}, \quad (3.3)$$

де  $A(T_k)$  – деяка функція температури;

$w$  – енергія активації в'язкої течії рідини;

$K$  – постійна Больцмана.

Енергія активації в'язкої течії:

$$w = B + \gamma p - \alpha (T_k - T_{k_1}), \quad (3.4)$$

З (3.3) і (3.4) випливає, що зі збільшенням температури рідини  $\eta$  буде зменшуватися, а зі збільшенням тиску  $p$  – зростати. За умовою зовнішнього тертя в стаціонарних умовах сила тертя  $T = \text{const}$ , отже [120],

$$\eta = A(T_k) \exp \frac{B + \gamma p}{KT_k} \approx A(T_k) \exp \frac{B}{KT_k} \left( 1 + \frac{\gamma}{KT_k} p \right). \quad (3.5)$$

Тоді з (3.2) та (3.5) отримуємо:

$$\tau_n = A(T_k) c_1 \exp \frac{B}{KT} + A(T_k) c_1 \left( \exp \frac{B}{KT_k} \right) \frac{\gamma}{KT_k} p.$$

Дотична напруга  $\tau_n$  і фактична площа торкання  $A_r$  залежать від напруженого стану в зоні контакту мікронерівностей. Тому молекулярна  $T_m$  і деформаційна  $T_d$  складові сили зовнішнього тертя також будуть функціями напруженого стану в мікроконтактах [121].

Ненасичений пружний контакт має місце під час виникнення контурного тиску [122]. При цьому виді взаємодії

$$T = \int_0^{n_r} T_i dn_r; \quad (3.6)$$

$$T_{mi} = \tau_n \pi R h_i. \quad (3.7)$$

Величина  $\tau_n$  залежить від проникнення мікронерівності, оскільки середні нормальні напруги будуть в умовах пружних деформацій змінними.

Виникаюча під час ковзання довільної мікронерівності сила  $T_{mi}$  зумовлена тим, що мікронерівність деформує поверхневий шар матеріалу менш жорсткого тіла завтовшки, приблизно рівної впровадженню мікронерівності. Внаслідок недосконалої пружності матеріалу при деформуванні виникають втрати енергії, які залежать від об'єму, що деформується, і наведеного коефіцієнта гістерезисних втрат  $\alpha_{\text{еф}}$ . Коефіцієнт  $\alpha_{\text{еф}}$  залежить від напруженого стану в зоні контакту мікронерівності [120].

При пружному деформуванні поверхневого шару:

$$T_{di} = \frac{0,25\alpha_{\text{эф}} E h_i^2}{1 - \mu^2}. \quad (3.8)$$

З (3.6), (3.7) та (3.8) під час пружного ненасиченого контакту

$$T = \frac{A_c b \nu (\nu - 1) \varepsilon^\nu}{2\pi R R_{\text{max}}} \left[ \frac{\pi R R_{\text{max}}}{\nu (\nu - 1)} \tau_0 + \beta \frac{0,4\pi k_1 R^{1/2} R_{\text{max}}^{3/2} E \varepsilon^{1/2}}{1 - \mu^2} + \frac{0,5\alpha_{\text{эф}} E R_{\text{max}}^2 \varepsilon}{\nu (\nu^2 - 1) (1 - \mu^2)} \right]. \quad (3.9)$$

Найбільш широко використовується метод визначення  $T$  по заданому  $p_c$  (або зовнішньому навантаженню) та розрахунковому значенню  $f$ . У випадку пружного ненасиченого контакту, як впливає з (3.9), розрахункове значення коефіцієнта тертя  $f$  визначається за виразом

$$f = \frac{\int_0^\varepsilon T_i dn_r}{\int_0^\varepsilon N_i dn_r} = \frac{2,4\tau_0 (1 - \mu^2) R^{1/2}}{\nu (\nu - 1) k_1 E h^{1/2}} + \beta + \frac{0,4\alpha_{\text{эф}} h^{1/2}}{k_1 \nu (\nu^2 - 1) R^{1/2}}. \quad (3.10)$$

де  $b$  – ширина фрикційного контакту;

$h$  – висота мікронерівностей;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення;

$R$  – зовнішній радіус;

$\nu$  – кінематична в'язкість;

$\varepsilon$  – відносний (безрозмірний) знос поверхонь;

$n_r$  – кількість проведених вимірів;

$E$  – модуль пружності [122].

Наведені формули враховують основні параметри, які характеризують роботу рухомого сполучення: навантаження (через  $h$ ), фізико-хімічний стан поверхонь тертя ( $\tau_0$ ,  $\beta$ ), їх обробку ( $R$ ,  $k_1$ ), фізико-механічні властивості матеріалів ( $\alpha_{\text{эф}}$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ , ).

За умовою збільшення зближення між поверхнями тіл, що труться, молекулярна складова коефіцієнта зовнішнього тертя  $f_m$  зменшується, а деформаційна складова  $f_d$  зростає. Отже, за певних умов  $f$  проходить через

мінімум. Використовуючи поняття про мінімум функції, знайдемо мінімальне значення коефіцієнта зовнішнього тертя  $f_{\min}$  в зоні ненасиченого пружного контакту. Зближення для цього випадку

$$h = \frac{6\tau_0 R(1-\mu^2)(\nu+1)}{E\alpha_{\text{еф}}},$$

у випадку пружного ненасиченого контакту

$$f_{\min} = \frac{1,5\tau_0\alpha_{\text{еф}}(1-\mu^2)^{1/2}}{E^{1/2}} + \beta. \quad (3.11)$$

З (3.11) випливає, що  $f_{\min}$  залежить тільки від фізико-хімічного стану поверхонь тертя та фізико-механічних властивостей менш жорсткого з твердих тіл, що взаємодіють [121].

Для матеріалів, що володіють високим модулем пружності, в умовах застосування недостатньо гарного мастильного матеріалу  $f_d$  можна знехтувати порівняно з  $f_m$ . Складова  $f_m$  суттєво залежить від зміни фізико-хімічного стану поверхні тертя, тоді як  $f_d$  не залежить від цього. Тому там, де потрібні стабільні значення  $f$ , необхідно забезпечувати умови, за яких  $f_d$  становила б значну частину  $f$ .

У разі пружного насиченого контакту:

$$T = i = 1 \sum_{n_c} T_i. \quad (3.12)$$

У функції від відносного зносу  $T(\varepsilon)$  перетворюється на:

$$T(\varepsilon) = \frac{0,125\alpha_{\text{еф}}A_c b \varepsilon_H^{\nu-1} R_{\max} E}{\pi R \nu (1-\mu^2)} \left[ \nu \varepsilon - (\nu-1)\varepsilon_H \right]^2 +$$

$$+ \left\{ \tau_0 + \frac{0,42\beta E R_{\max}^{1/2} \left[ \nu \varepsilon - (\nu-1)\varepsilon_H \right]^{1/2}}{R^{1/2} \nu^{1/2} (1-\mu^2)} \right\} \frac{\left[ \nu \varepsilon - (\nu-1)\varepsilon_H \right] A_c}{2\nu}. \quad (3.13)$$

При цьому (3.13) неважко встановити залежність коефіцієнта тертя  $f$  за умовою пружного насиченого контакту [120]:

$$f \approx \frac{2,4\tau_0(1-\mu^2)R^{1/2}}{Eh^{1/2}} + \beta + 0,2\alpha_{\text{ef}} \left(\frac{h}{R}\right)^{1/2}. \quad (3.14)$$

У цьому випадку, як і при ненасиченому пружному контакті, коефіцієнт тертя  $f$  під час зміни проходить через мінімум. Значення  $f_{\text{min}}$ , знайдене на підставі (3.14), збігається з аналогічним значенням  $f_{\text{min}}$  при ненасиченому пружному контакті. Таким чином, рівень насиченості контакту не впливає на значення  $f_{\text{min}}$ . Середнє зближення між поверхнями тіл, що труться, при якому буде мати місце  $f_{\text{min}}$  при насиченому пружному контакті, визначається як

$$h_{\text{cp}} = \frac{12R\tau_0(1-\mu^2)}{\alpha_{\text{ef}}E}. \quad (3.15)$$

Використовуючи (3.15), отримаємо зближення між поверхнями тертя, відповідне  $f_{\text{min}}$ ,

$$h = \frac{24R\tau_0(1-\mu^2)}{\alpha_{\text{ef}}E} + 0,25.$$

Таким чином, під час пружних деформацій в зонах фактичного торкання мікронерівностей коефіцієнт зовнішнього тертя зі збільшенням зближення між поверхнями тертя тіл, що взаємодіють, у загальному випадку проходить через мінімум [122].

Під час пластичних деформацій в зонах контактів мікронерівностей середні нормальні напруги при ковзанні будуть постійні й дорівнюють твердості за Брінелем НВ. Тоді на підставі (3.7) і (3.12) можна записати, що молекулярна складова на одиничній мікронерівності

$$T_{Mi} = (\tau_0 + \beta \cdot \text{НВ}) \pi R h_i. \quad (3.16)$$

Деформаційна складова сили зовнішнього тертя  $T_d$  за таких деформаціях для одичної мікронерівності буде силою опору пластичної формозміни поверхні тертя ковзною мікронерівністю. З розгляду задачі теорії пластичності ковзання можна отримати складову  $T_{di}$ , що виникає на одичній мікронерівності, залежно від її проникнення [122]:

$$T_{di} = 1,68\text{HB}^{1/2}h_i^{3/2}. \quad (3.17)$$

З (3.1), (3.6), (3.16), (3.17) отримаємо в умовах пластичного насиченого контакту

$$T = \int_0^\varepsilon T_i dn_r = \frac{0,84A_c b v (v-1) R_{\max}^{1/2} \text{HB}}{\pi R^{1/2}} \times \left[ k_1 \varepsilon^{v+1} + \frac{\pi}{1,68} \left( \frac{R}{R_{\max}} \right)^{1/2} \left( \beta + \frac{\tau_0}{\text{HB}} \right) \frac{\varepsilon^v}{(v-1)v} \right]. \quad (3.17)$$

$$f = \frac{\tau_0}{\text{HB}} + \beta + 0,55v(v-1)k_1 \left( \frac{h}{R} \right)^{1/2} \approx f_M + 0,44 \left( \frac{h}{R} \right)^{1/2}. \quad (3.18)$$

Сила зовнішнього тертя, що відповідає цьому виду взаємодії, залежно від зближення між поверхнями тіл, що контактують, виражається наступним виразом:

$$T = \sum_{i=1}^{n_c} T_i \Delta n_r = 0,5A_c b \varepsilon_H^{v-1} [v\varepsilon - (v-1)\varepsilon_H] \times \left\{ f_M + \frac{0,54\text{HB}R_{\max}^{1/2}}{\varepsilon_H^{3/2} v^{1/2} R^{1/2}} [v\varepsilon - (v-1)\varepsilon_H]^{1/2} \right\}.$$

За цих умов коефіцієнт тертя [123]

$$f = f_M + \frac{0,54}{v^{1/2}} \left[ \frac{vh}{R} + \frac{(v-1)h_H}{R} \right]^{1/2} \approx f_M + \frac{0,38}{R^{1/2}} (2h - h_H)^{1/2}. \quad (3.19)$$

Тобто, у разі пластичних деформацій у зонах фактичного дотику при ненасиченому та насиченому контактах  $f$  зростає у випадку збільшення зближення між поверхнями тертя тіл, що взаємодіють [118].

Пластичні деформації виникають у зонах контактів мікронерівностей у разі взаємодії твердих тіл, які мають різні модулі пружності (наприклад, колінчатий вал з високим модулем пружності та вкладиш підшипника з

низьким модулем пружності). У загальному випадку для цих матеріалів коефіцієнт зовнішнього тертя залежно від зближення між поверхнями тертя проходить через мінімум. Така закономірність зміни коефіцієнта зовнішнього тертя, обумовлена тим, що зазвичай у цих матеріалів дуже невеликий коефіцієнт гістерезисних втрат  $\alpha_{\text{сф}}$ , і малі значення  $h/R$ , що відповідають реалізації пластичних деформацій у зонах фактичного дотику. Це призводить до того, що деформаційною складовою коефіцієнта тертя при пружних деформаціях у зонах фактичного дотику можна знехтувати.

Тоді, як впливає з (3.10) і (3.14), коефіцієнт зовнішнього тертя при пружних деформаціях в зонах фактичного дотику буде зменшуватися зі збільшенням зближення між поверхнями тертя, тоді як при пластичних деформаціях він зростатиме. Орієнтовно можна визначити зближення при  $f_{\text{min}}$  як середнє арифметичне між значеннями  $h$ , що обчислюються за виразом

$$\frac{h}{R} = 3,9(1 - \mu^2)^2 \left( \frac{\text{HB}}{E} \right)^2. \quad (3.20)$$

Значення коефіцієнта зовнішнього тертя, що практично збігається з мінімальним, отримаємо, підставляючи  $h/R$  з (3.20) у (3.18):

$$f_{\text{min}} = f_{\text{м}} + 0,9(1 - \mu^2)^2 \left( \frac{\text{HB}}{E} \right)^2.$$

У загальному випадку коефіцієнт зовнішнього тертя зі збільшенням зближення між поверхнями тертя спочатку зменшується, потім, проходячи через мінімум, зростає. Така закономірність зміни  $f$  для матеріалів, що володіють невисоким модулем пружності, обумовлена співвідношенням між молекулярною та деформаційною складовими коефіцієнта тертя, а для матеріалів з високим модулем пружності переходом пружних деформацій у зонах фактичного дотику до пластичних [123].

Використовуючи (3.19), можна визначити максимально можливий коефіцієнт зовнішнього тертя при пластичних деформаціях у зонах фактичного дотику:

$$f = f_m + 0,28 \left( \frac{R_{\max}}{R} \right)^{1/2} f_m + 0,3\Delta^{1/2}.$$

Під час зближення між поверхнями тертя  $h > h_b$  коефіцієнт тертя зменшуватиметься за рахунок зменшення молекулярної складової. При збільшенні зближення між поверхнями тіл, що взаємодіють

$$f = \frac{\tau_0}{\text{НВ} \left[ 4,9 \left( \frac{h}{R_{\max}} \right)^{1/2} - 0,5 \right]} + \beta + 0,3\Delta^{1/2}. \quad (3.21)$$

До параметрів, що визначають роботу трибосполучення, належать: конструкція вузла, прикладені зовнішні сили, умови змащування, матеріали деталей трибосполучення, вид обробки їхніх поверхонь, наявність або відсутність вібрацій, температура в зоні тертя. Коефіцієнт зовнішнього тертя обчислюється за (3.10). Зміна фізико-хімічного стану поверхонь (параметри  $\tau_0$  та  $\beta$ ) призводить до суттєвої зміни коефіцієнта зовнішнього тертя, причому  $f$  лінійно залежить від фрикційних параметрів [124].

Щоб визначити вплив інших параметрів трибосполучення на коефіцієнт зовнішнього тертя, підставимо в (3.10) зближення з

$$h = R \left[ \frac{5p_c(1-\mu^2)\Delta^v}{0,21\nu(\nu-1)k_1E} \right]^{\frac{2}{2\nu+1}}$$

тоді

$$f = \frac{2,4\tau_0}{p_c^{\frac{1}{2\nu+1}}} \left[ \frac{1-\mu^2}{\nu(\nu+1)k_1\Delta^{1/2}5^{1/2\nu}E} \right]^{\frac{2\nu}{2\nu+1}} + \beta + \frac{0,4\alpha_{\text{еф}}}{\nu^2-1} \left[ \frac{5p_c\Delta^v(1-\mu^2)}{(k_1\nu)^{2\nu+2}(\nu-1)E} \right]. \quad (3.22)$$

Збільшення модуля пружності менш жорсткого елементів трибосполучення призводить до зменшення коефіцієнта зовнішнього тертя.

Зменшення  $f$  у разі зростання  $E$  зумовлене падінням як молекулярної  $f_m$ , також і деформаційної  $f_d$  складових  $f$ . З (3.21) і (3.22) випливає, що більший вплив зміна модуля пружності менш жорсткого елемента трибосполучення надає молекулярну складову коефіцієнта зовнішнього тертя. Тому в тих вузлах, де  $f_m$  переважає  $f_d$ , підбираючи матеріал для менш жорсткого елемента, можна істотно змінювати коефіцієнт зовнішнього тертя.

Зміна контурного тиску, що є функцією прикладених зовнішніх сил та конструкції трибосполучення, призводить до зменшення молекулярної та збільшення деформаційної складових коефіцієнта зовнішнього тертя. Якщо переважає молекулярна складова, то при зростанні  $p_c f$  зменшуватиметься. У випадку переважанні деформаційної складової (за умов хорошого мащення) збільшення  $p_c$  призводить до зростання коефіцієнта зовнішнього тертя. Вочевидь, за певних умов, за деякого значення  $p_c$  коефіцієнт зовнішнього тертя матиме мінімум [122].

Контурний тиск, що відповідає  $f_{\min}$  (3.22),

$$p_c = \frac{0,2v(v-1)k_1}{\Delta^v} \left[ \frac{6\tau_0(v+1)(1-\mu^2)^{\frac{2v-1}{2v+1}}}{\alpha_{\text{эф}} E^{\frac{2v-1}{2v+1}}} \right]^{\frac{2v+1}{2}} \approx \frac{2,2 \cdot 10^2}{\Delta^2} \left[ \frac{\tau_0(1-\mu^2)^{3/5}}{\alpha_{\text{эф}} E^{3/5}} \right]^{5/2}. \quad (3.23)$$

Контурний тиск, що призводить до мінімальних значень коефіцієнта зовнішнього тертя, істотно залежить від умови змащування (параметр  $\tau_0$ ), шорсткості поверхонь тертя елементів, що взаємодіють ( $\Delta$ ) і фізико-механічних характеристик матеріалу менш жорсткого з цих елементів ( $\mu$ ,  $E$ ,  $\alpha_{\text{эф}}$ ). Значення  $\Delta$ , що відповідає мінімальному коефіцієнту зовнішнього тертя, (3.21) і (3.22) можна отримати у вигляді

$$\Delta = \left( \frac{0,2v(v-1)k_1}{p_c} \right)^{1/v} \cdot \left[ \frac{6\tau_0(v+1)(1-\mu^2)^{\frac{2v-1}{2v+1}}}{\alpha_{\text{эф}} E^{\frac{2v-1}{2v+1}}} \right]^{\frac{2v+1}{2}} \approx \frac{15\tau_0^{5/4}(1-\mu^2)^{3/4}}{p_c^{1/2} E^{3/4} \alpha_{\text{эф}}^{5/4}}.$$

У разі пружного насиченого контакту коефіцієнт тертя, що визначається в даному випадку з (3.14), прямо пропорційний фрикційним параметрам  $\tau_0$  і  $\beta$ . Вираз, що дозволяє визначити коефіцієнт зовнішнього тертя залежно від параметрів, що характеризують роботу трисполучення, для цього випадку має вигляд:

$$f = \frac{1,25\tau_0(1-\mu^2)^{2/3}}{p_c^{1/3}E^{2/3}\Delta^{1/3}} + \beta + 0,4\alpha_{\text{еф}} \left[ \frac{p_c\Delta(1-\mu^2)}{E} \right]^{1/3}. \quad (3.24)$$

Якщо порівняти (3.22) і (3.24), то можна відзначити, що в разі зміни контурного тиску коефіцієнт зовнішнього тертя буде інтенсивніше змінюватися при насиченому контакті, ніж при ненасиченому, і менш інтенсивно в залежності від модуля пружності матеріалу менш жорсткого зі взаємодіючих твердих тіл і комплексного параметра шорсткості поверхні тертя. Якщо при ненасиченому контакті молекулярна та деформаційна складові коефіцієнта тертя по-різному залежать від  $p_c$  і  $\Delta$ , то для насиченого контакту ці залежності  $p_c$  і  $\Delta$  входять до формули однаковою мірою.

У разі насиченого контакту залежності коефіцієнта тертя від контурного тиску й шорсткості поверхні жорсткішого з тіл, що взаємодіють, також носять екстремальний характер. Контурний тиск, що відповідає мінімуму коефіцієнта тертя; у даному випадку дорівнює [125]

$$p_c = \frac{0,2\tau_0^{3/2}(1-\mu^2)^{1/2}}{\alpha_{\text{еф}}^{3/2}E^{1/2}\nu^{3/2}\Delta} \approx \frac{6,4 \cdot 10^{-2}}{\Delta} \left( \frac{\tau_0}{\alpha_{\text{еф}}} \right)^{3/2} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{1/2}. \quad (3.25)$$

Контурний тиск, що призводить до мінімального коефіцієнта тертя, залежить від умов змащування ( $\tau_0$ ), шорсткості поверхні тертя жорсткішого з тіл, що взаємодіють ( $\Delta$ ), фізико-механічних характеристик матеріалу менш жорсткого тіла ( $\mu$ ,  $\alpha_{\text{еф}}$ ,  $E$ ).

Порівнюючи (3.23) і (3.25), не важко виявити, що в разі насиченого пружного контакту контурний тиск, що призводить до мінімального коефіцієнта тертя, буде меншим за однакових умов, ніж при ненасиченому контакті. Тому для певних умов роботи трибосполучення мінімальний коефіцієнт тертя матиме місце або за ненасиченого, або за насиченого контакту.

Комплексний параметр шорсткості поверхні  $\Delta$ , що відповідає мінімальному значенню коефіцієнта тертя в умовах насиченого контакту,

$$\Delta = \frac{5,7}{p_c} \left( \frac{\tau_0}{\alpha_{\text{еф}}} \right)^{3/2} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{1/2}.$$

Значення параметрів шорсткості поверхні тертя більш жорсткого з тіл, що взаємодіють, залежать від конструкції вузла тертя, діючих навантажень ( $p_c$ ), умов мащення ( $\tau_0$ ) і фізико-механічних характеристик матеріалу менш жорсткого зі взаємодіючих твердих тіл [120].

У разі пластичного ненасиченого контакту залежно від параметрів, що характеризують роботу трисполучення, витікає:

$$f = \frac{\tau_0}{\text{HB}} + \beta + 0,55\nu(\nu-1)k_1\Delta^{1/2} \left( \frac{p_c}{\text{HB}} \right)^{1/4}. \quad (3.26)$$

Як і у випадку пружних деформацій, у зонах фактичного торкання мікронерівностей  $f$  пропорційний фрикційним параметрам  $\tau_0$  і  $\beta$ , що залежать від умов змащення в трисполученні. Збільшення твердості матеріалу менш жорсткого елемента трибосполучення за незмінних умов викликає суттєве зменшення  $f$ . Причому інтенсивність зміни буде тим більшою, чим більшою буде молекулярна складова порівняно з деформаційною. При збільшенні контурного тиску та шорсткості поверхні жорсткішого елемента трибосполучення  $f$  в даному випадку зростає [122].

У разі використання матеріалів, здатних деформуватися в зонах фактичного торкання пластично,  $f$  під час зміни зближення між поверхнями тертя тіл, що взаємодіють, в широких межах проходить через мінімум. З (3.20) приблизно можна визначити контурні тиски, що призводять до мінімального коефіцієнта тертя

$$\frac{p_c}{\text{HB}} \approx \frac{7,5}{\Delta^2} \left[ \frac{(1-\mu^2)\text{HB}}{E} \right]^4.$$

Значення  $p_c$  переважно залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу менш жорсткого елемента трибоспряження ( $\text{HB}$ ,  $\mu$ ,  $E$ ) і параметрів шорсткості поверхні жорсткішого елемента [124].

Комплексний параметр шорсткості поверхні, що відповідає  $f_{\min}$ , у даному випадку

$$\Delta = 2,7 \frac{(1-\mu^2)^2 \text{HB}^{5/2}}{p_c^{1/2} E^2}.$$

Цей параметр залежить від конструкції вузла тертя й зовнішніх сил ( $p_c$ ), що діють, і найбільш істотно від фізико-механічних характеристик матеріалу менш жорсткого елемента вузла ( $\text{HB}$ ,  $\mu$ ,  $E$ ).

Пластичний насичений контакт реалізується за умови  $p_c > p_{\text{сн}}$

$$p_{\text{сн}} = \frac{\alpha_\tau \text{HB}}{(b^{1/\nu} \nu)^{1/\nu-1}} \approx 0,125 \alpha_\tau \text{HB}.$$

При такому виді взаємодії залежно від параметрів, що характеризують трибо сполучення

$$f = \frac{\tau_0}{\text{HB}} + \beta + 0,9 \Delta^{1/2} \left( \frac{p_c}{\text{HB}} \right)^{1/2}. \quad (3.27)$$

Коефіцієнт тертя пропорційний  $f \sim \tau_0$  і  $f \sim \beta$ . Він зростає зі збільшенням контурного тиску  $p_c$  і шорсткості поверхні більш жорсткого з елементів трибосполучення й значно зменшується зі збільшенням твердості матеріалу менш жорсткого елемента.

Розглянемо вплив температури, за якої експлуатується трибосполучення, не торкаючись питань теплової динаміки, тертя та зносу.

На даний момент прийнято розрізняти об'ємну  $\theta_{об}$  і поверхневу  $\theta_{пов}$  температури, за якими працює трибосполучення. Температура  $\theta_{об}$  характеризує нагрівання всієї деталі загалом,  $\theta_{пов}$  – нагрівання найтонших поверхневих шарів. Об'ємна температура обумовлена розігрівом поверхні за рахунок сил тертя в процесі експлуатації, технологічним розігрівом поверхні, нагріванням внаслідок впливу навколишнього середовища. Поверхнева температура обумовлена енергетичними втратами в поверхневому шарі твердих тіл, що взаємодіють, у разі зовнішнього тертя, що виникають у результаті деформування поверхневого шару й руйнування зв'язків при зовнішньому терті, що утворюються внаслідок міжатомних і міжмолекулярних взаємодій. Зазвичай поверхнева температура буває більшою за об'ємну.

Під час режимів тертя, що з великими навантаженнями й особливо з великими швидкостями ковзання, необхідно уточнювати значення  $\theta_{пов}$ . У цьому випадку треба розрізняти середню температуру поверхні тертя  $\theta^*$  номінального або контурного контакту та температурний спалах  $\theta_{сп}$  на фактичних плямах торкання [123]. За цих умов

$$\theta_{пов} = \theta_{max} = \theta^* + \theta_{сп}.$$

У разі температури понад 100 °С у зонах фактичного контакту мікронерівностей виникають, як правило, пластичні деформації. У випадку пластичних деформацій у зонах контактів мікронерівностей для визначення  $f$

використовують формули (3.26) при ненасиченому та (3.27) при насиченому контактах. Зміна температури по-різному позначається зміни  $f_m$  і  $f_{мд}$ .

Складова  $f_m$  залежить від дотичних напруг  $\tau_n$ , що є функцією механо-фізико-хімічних процесів, що відбуваються на межі розділу тіл, що взаємодіють у зонах фактичного дотику та нормальних напруг, що виникають у цих зонах. При деформаціях, що розглядаються, нормальні напруги в зонах торкання збігаються з твердістю по Брінелю деформованого матеріалу.

На зміну дотичних напруг впливає поверхнева температура

$$\tau_n = \tau_{n0} e^{-\gamma \Delta \theta_{пов}}; \quad (3.28)$$

де  $\tau_{n0}$  – значення дотичних напруг, визначене за стандартною температурою;

$\gamma$  – температурний коефіцієнт, який визначається зазвичай експериментально;

$\Delta \theta_{пов} = \theta_{пов} - \theta_{0пов}$ , де  $\theta_{0пов}$  – вихідна поверхнева температура.

Твердість матеріалу змінюється залежно від об'ємної температури

$$HB = HB_0 e^{-\alpha \Delta \theta_{об}}; \quad (3.29)$$

де  $HB_0$  – значення твердості, визначене за стандартної температури;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт;

$\Delta \theta_{об} = \theta_{об} - \theta_{0об}$ , де  $\theta_{0об}$  – вихідна об'ємна температура.

Зміна температури практично не впливає на параметр шорсткості поверхні  $\Delta$  й у більшості випадків на контурний тиск  $p_c$ . У цьому випадку коефіцієнт зовнішнього тертя в залежності від температури на підставі виразів (3.26) – (3.29) можна визначити так [122]:

$$f = f_{m0} e^{-(\xi\gamma - \alpha)\Delta\theta_{об}} + f_{д0} e^{\alpha\Delta\theta_{об}}; \quad (3.30)$$

$$\text{де } \xi = \frac{\Delta\theta_{\text{пов}}}{\Delta\theta_{\text{об}}} > 1.$$

З (3.30) випливає, що молекулярна складова коефіцієнта зовнішнього тертя зі збільшенням об'ємної температури деталей трибосполучення зменшується, тоді як деформаційна зростає. Тому в загальному випадку в разів зростання  $\theta_{\text{об}}$  коефіцієнт зовнішнього тертя проходить через мінімум.

Мінімальні значення коефіцієнта тертя  $f$ , що визначається за виразами (3.10) та (3.22), відповідають мінімальним контактним взаємодіям між поверхнями, що виявляється в зменшенні вмісту металевих домішок у пробах моторного мастила, яке відбирається з підпоршневого простору чи картеру дизеля.

Контурний тиск, що визначається за виразом (3.23) утворює різноспрямовану дію на різні контактні поверхні дизеля.

Зменшення контурного тиску в трибосполученні поршневі кільця – циліндрова втулка призводить до зниження ущільнюючої дії поршневих кілець. При цьому частина газів, що знаходиться в циліндрі, проникає від першого поршневого кільця до другого, та далі до третього та четвертого, та навіть до підпоршневого простору дизеля. Свідченням цього для двотактних дизелів з циліндровою системою мащення стає стрибкоподібне зменшення загального лужного числа мастила, для чотиритактних дизелів з циркуляційною системою мащення – збільшення в моторному мастилі речовин, що характеризують його забруднення.

Зменшення контурного тиску в трибосполученні вал – вкладиш підшипника свідчить про збільшення мастильного клину між цими поверхнями та роботі цього трибосполучення у режимі гідродинамічного тертя. Підтвердженням цього стає зменшення кількості металевих домішок у пробах мастила, що відбирається з кратеру дизеля.

### 3.2. Аналіз основних дефектів та пошкоджень суднових дизелів, що впливають на його ресурсні показники та ті, що пов'язані з експлуатацією його систем мащення

Під час експлуатації суднових дизелів, як головної складової енергетичної установки, виникають дефекти їхніх основних вузлів. Ліквідація деяких дефектів може бути пов'язана з частковою зміною потужності дизеля. До цього типу дефектів можна віднести пошкодження ГТН та паливної апаратури високого тиску (паливних насосів високого тиску – ПНВТ або форсунок). Під час критичних відхилень показників системи наддува дизеля від регламентованих значень або критичного пошкодження деталей газотурбонагнітача, експлуатація дизеля можлива за умови виведення ГТН з дії. Аналогічні технічні рішення приймають у разі критичного стану паливної апаратури високого тиску (одного, у деяких випадках більшої кількості паливних насосів високого тиску чи форсунок). Виведення з роботи ГТН, ПНВТ або форсунки (для багатопаливних дизелів можливо одночасне виведення до трьох одиниць вказаного обладнання) знижує ефективну потужність дизеля, але при цьому залишає мінімально можливий рівень надійності дизеля. Разом з цим, є група дефектів, під час виникнення яких надійна експлуатація дизелів не можлива. При цьому основну небезпеку представляють дефекти циліндрової групи та підшипників руху, а також критичні відхилення експлуатаційних показників системи мащення – насамперед зниження тиску моторного мастила та підвищення його температури. Також критичними можуть виявитися порушення суцільності та однорідності потоку моторного мастила між складовими системи мащення (наприклад, між лубрикаторами та штуцерами, що забезпечують впорскування мастила на дзеркало циліндрової втулки – для системи циліндрового мащення; та між фільтрами, насосами,

сепараторами та іншим обладнанням – для систем циркуляційного мащення) [126-128].

Типовими дефектами циліндрових втулок суднових дизелів є підвищений або нерівномірний знос та задири її поверхні. Через підвищені температурні напруги в поверхнях циліндрових втулок також можуть виникати тріщини, найбільш характерним місцем утворення яких є її верхня частина.

Основною причиною підвищеного зносу циліндрових втулок є розрив або порушення цілісності плівки мастила на відносно невеликій площі дзеркала циліндра, які виникають як результат окислення мастила в тонкому шарі. Крім цього, мастильна плівка піддається дії випускних газів та твердих продуктів неповного згоряння палива.

До основних можливих причин задирів, що виникають на поверхнях циліндрових втулок, відносять порушення режимів мащення, невідповідність структури металу поршневих кілець та втулки, зміна геометрії головки поршня, несправності паливної апаратури та пов'язані з цим порушення у впорскуванні палива в циліндр [129, 130].

Зі всіх деталей циліндрової групи аварійні пошкодження, дефекти та відмови поршнів є найбільш небезпечними через те, що в більшості випадків призводять до важких аварій всього двигуна. До характерних дефектів поршневої групи суднових дизелів відносяться: вигорання денця поршня та утворення тріщин, знос та пошкодження поршневих кілець, відкладення нагарів в поршневих канавках, на поверхні поршневих кілець та на головці поршня.

На інтенсивні зноси та поламки поршневих кілець припадає найбільша кількість несправностей циліндрової групи суднових дизелів. Працездатність верхнього поршневого кільця визначає напрацювання циліндра до чергового вскриття та освідчення. За умови гарного прилягання кільця до відповідної поршневої канавки під роботи дизеля нагрівання кільця є незначне. Його перегрів виникає під час прориву випускних газів крізь зазори, що виникають

у сполученнях кільця з поршнем та циліндровою втулкою. При цьому існують постійні зазори між головкою поршня та втулкою циліндра, у замку кільця, а також між кільцем та поршневою канавкою. Під найбільший знос піддають кромки поршневих кілець та зазор у замку кільця.

Підшипники в судових дизелях відносяться до найбільш відповідальних вузлів. Їхня несправність або дефекти призводять до раптової відмови всього двигуна. Під час експлуатації дизелів більшому навантаженню піддаються рамові підшипники, але більша кількість пошкоджень припадає на головні / крейцкопфні підшипники для двотактних двигунів та трибосполученню поршневий палець – верхня голівка шатуна для чотиритактних двигунів. Для цих з'єднань характерні такі дефекти як розтріскування шару антифрикційного матеріалу, відшаровування однієї поверхні антифрикційного матеріалу від іншої, вичавлювання антифрикційного матеріалу з трибосполучення. Вказані підшипникові вузли працюють у важких умовах, які додатково ускладнюються під час зміни зовнішніх збурень. Качувальний характер їхніх переміщень щодо цапфи на невеликий кут і малі окружні швидкості не дозволяють забезпечити гідродинамічні умови мащення. Крім того, у більшості судових дизелів сила тиску газів на поршень на всіх кутах повороту колінчатого валу залишається більшою ніж сили інерції, що ускладнює подачу мастила під шийку крейцкопфа або під поршневий палець. Особливо важкі умови під час роботи цих підшипникових вузлів виникають під час реверсу та пуску двигуна [131, 132].

До основних пошкоджень мотильових та рамових підшипників судових дизелів відносяться пошкодження антифрикційного шару їхніх тонкостінних вкладишів (розтріскування, відшаровування, вичавлювання), потрапляння та залишення в зазорі між вкладишем та валом дрібних металевих домішок та продуктів нагару, провертання вкладишів підшипників. Основною причиною цих дефектів стає порушення режимів мащення – раптовий або поступовий перехід від гідродинамічного тертя до граничного (під час якого контактні

поверхні поділені між собою кількома молекулярними шарами мастильного матеріалу) або сухого (у разі виникнення якого між поверхнями повністю відсутній шар мастила).

Деякі вказані дефекти також характерні колінчатому валу дизеля – найбільш відповідальному та найбільш дорогому елементу суднового дизеля. Також до несправностей колінчатого вала відносяться втомні тріщини, провертання шийок вала в місцях їхнього запресування, подряпини, натири або задири шийок. Втомні тріщини є найрозповсюдженішим та небезпечним видом пошкодження колінчатих валів. Більша частина поламки колінчатих валів відбувається як результат деформації фундаментних рам або нерівномірного зносу мотильових та рамових підшипників. Несправності, поламки або дефекти колінчатого вала призводять до аварійної зупинки дизеля, що стає причиною втрати ходу судна, тимчасового чи тривалого знеструмлення. Обидва явища сприяють виводу судна з експлуатації. Виникнення подібних аварійних випадків в районах інтенсивного судноплавства загрожує навігаційній безпеці. Додаткові природні перешкоди, що можуть виникнути та збігтися з ситуацією втрати руху та управління судном (наприклад, підвищені прибережні течії, поривчатий вітер, зміна ландшафту морського дна) завдають ще одну негативну дію та разом з відмовою головного двигуна та втратою маневреності судна можуть призвести до посадки судна на мілину або навалюванню судна на берегову лінію чи портові споруди [133, 134].

Виявлення цих дефектів не може бути здійснене візуальним шляхом. Єдиним варіантів їхнього визначення є виконання безперервного моніторингу або періодичного діагностування експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в системах циліндрового чи циркуляційного мащення.

3.3. Діагностування зміни технічного стану двотактних дизелів морських суден за аналізом експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в їхніх системах циліндрового мащення

3.3.1. Експериментальне визначення ресурсних показників судових дизелів 6S50ME-C9.7 MAN-B&W морських суден класу Bulk Carrier

Під час експлуатації моторного мастила (як будь-якої робочої речовини, що використовується в дизелях суден морського транспорту) здійснюються постійні зміни його експлуатаційних характеристик. На жаль, ці зміни здійснюються в негативний бік та характерні для моторних мастил як для циліндрових (лубрикаторних) так і для циркуляційних систем мащення.

У системах циліндрового (лубрикаторного) мащення двотактних дизелів морських суден основна увага під час контролю показників моторного мастила та подальшого діагностування за цими показниками технічного стану елементів дизеля (поршневих кілець та циліндрових втулок) приділяється загальному лужному числу (Total Base Number – TBN) та вмісту металевих домішок. При цьому аналізу піддається моторне мастило, що (після впорскування лубрикатором на дзеркало циліндрової втулки, мащення її поверхні та примусового перенесення поршневими кільцями з точок подачі до нижньої частини циліндрової втулки) потрапляє в підпоршневий простір дизеля [135, 136].

Значення TBN цього мастила характеризує його здатність до запобігання шкідливої дії сірчаної  $H_2SO_4$  та сірчистої кислот  $H_2SO_4$ , які утворюються в циліндрі дизеля під час згоряння палива. Обидві кислоти є небезпечними та призводять до виникнення сірчистої корозії поршневих кілець, циліндрової втулки, головки поршня, а також випускного клапана та елементів газовипускної системи – у тому числі лопаток газової турбіни газотурбонагнітача (ГТН). Залежно від рекомендацій фірми виробника дизеля аналіз мастила, що взяте з підпоршневого простору, виконується з

інтервалом 20...30 годин та контролюється для всіх циліндрів дизеля. Надмірне зменшення TBN порівняно з його початковим значенням свідчить про невідповідність кількості мастила, що подається на дзеркало циліндрової втулки, кількості палива, що впорскується в циліндр; або про невідповідність початкового TBN мастила відсотковому вмісту сірки в паливі. Також однією зі причин надмірного зниження TBN під час аналізу моторного мастила може бути неправильно визначені фази подачі палива, через яких найбільша кількість палива, що впорскується в циліндр, згоряє не в районі ВМТ, а на лінії розширення – тобто контактуючи з більшою площею дзеркала циліндрової втулки та, відповідно, з більшою кількістю мастила, що знаходиться на її поверхні. Визначення величини TBN моторного мастила можливо шляхом його аналізу в судновій діагностичній лабораторії, яка входить до вимірювального обладнання енергетичних установок морських суден [137, 138].

Вміст металевих домішок у моторному мастилі, що потрапляє до підпоршневого простору дизеля, характеризує режим мащення його ЦПГ. Надмірне збільшення вмісту металевих домішок у моторному мастилі свідчить про збільшення кількості контактних взаємодій між поршневими кільцями та втулкою циліндра, та можливого короткочасного або тривалого переходу з гідродинамічного режиму тертя до граничного або сухого. Граничний та, особливо, режим сухого тертя є небезпечними умовами експлуатації судових дизелів та зумовлює зменшення його ресурсу. Критичним наслідком цих режимів може стати поламка поршневих кілець та заклинювання поршня.

Експерименти з визначення зміни експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в системах циліндрового мащення, проводились на двох однотипних судових малообертових двотактних дизелях 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W Yichang Marine Diesel Engine Co. Ltd., що використовувались як головні на судах класу Bulk Carrier дедвейтом 63580 тонн, 63750 тонн, 64700 тонн [139].

Під час експлуатації суден у спеціальних екологічних районах контролю викидів оксидів сірки (Sulfur Emission Control Areas – SECAs) у дизелях використовувалось дистильтне паливо DMA10 або DMA20, вміст сірки в якому не перевищував 0,1 % за масою [140, 141]. Сірка, разом з вуглецем та воднем, відноситься до складових палива, які виділяють теплоту під час згоряння. Збільшення вмісту сірки у паливі призводить до підвищення температури у циліндрі дизеля та на підвищення сірчистого зносу деталей ЦПГ, що сприяє зниженню ресурсу роботи дизеля. Під час знаходження суден поза районів SECAs у дизелях використовувалось паливо класу IFO380 або IFO450 вміст сірки в якому складав 0,48...0,5 % сірки за масою. У системах циліндрового мащення дизелів використовувались мастила, основні характеристики яких наведені в таблиці 3.1. Характеристики всіх мастил відповідали таким, що рекомендуються фірмою MAN-B&W.

Таблиця 3.1

Основні характеристики моторних мастил під час проведення експериментів в системах циліндрового мащення суднових дизелів 6S50ME

Параметр	Марка моторного мастила		
	ММ № 1, Exxon Mobil Mobilgard 540	ММ № 2, Shell Rimula R4X 15W40	ММ № 3, Castroll Cyltech 40SX
Клас SAE	50	50	50
Густина за 15°C, кг/м <sup>3</sup>	919	950	918
В'язкість кінематична за 40°C, сСт	216	209	211
В'язкість кінематична за 100°C, сСт	20	18,5	19,5
Температура спалаху, °C	248	210	191
Температура застигання, °C	-21	-20	-9
Загальне лужне число (Total Base Number – TBN), мгКОН/г	40	40	40

Принципова схема системи циліндрового (лубрикаторного) мащення дизелів 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W наведена на рис. 3.1.

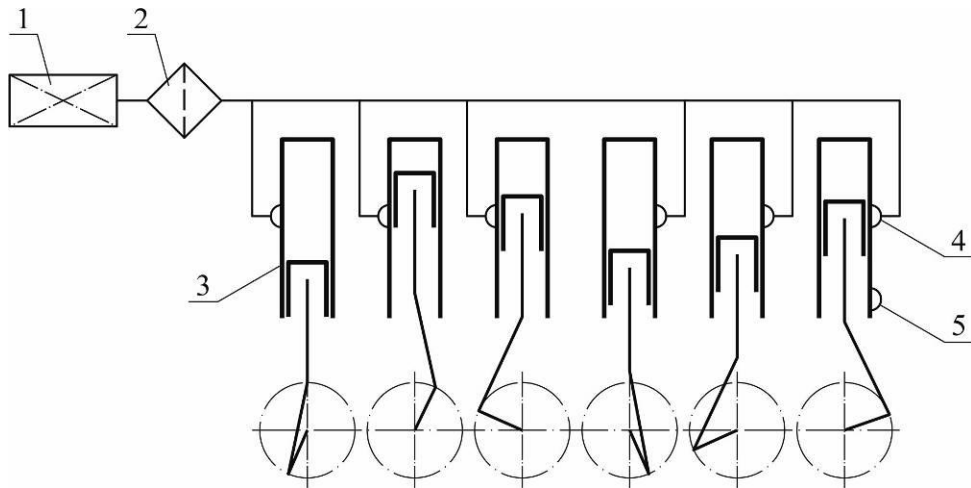


Рис. 3.1. Принципова схема системи циліндрового (лубрикаторного) мащення суднових дизелів 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W:

1 – витратна цистерна циліндрового мастила; 2 – фільтр грубого очищення;  
3 – дизель; 4 – лубрикатор; 5 – відбір проб мастила з підпоршневого простору

Технологія проведення експерименту була однаковою для всіх дизелів та передбачала відбір проб моторного мастила з підпоршневого простору та його подальший аналіз у судновій лабораторії з метою визначення значень TBN (у мгКОН/г мастила) та вмісту металевих домішок  $C_{Fe}$  (у ppm). При цьому визначення вмісту металевих домішок виконувалось феромагнітним методом. Серед металів, що входять до складу сплавів, з яких виготовляються деталі дизеля, феромагнітними властивостями відрізняються залізо Fe та нікель Ni, тому під позначенням  $C_{Fe}$  розуміється сума саме цих елементів, що потрапляють до моторного мастила в результаті контактних взаємодій деталей дизеля.

Відбір проб та їх аналіз виконувався через кожні 20 годин роботи дизелів лише під час безперервної роботи дизелів. Тривалість навігаційних переходів суден залежно від фрактового завдання коливалась в діапазоні 12...26 діб, на протязі яких близько 90 % від всього часового інтервалу судна знаходились поза SECAs у яких експлуатація дизелів виконувалась на паливі з вмістом сірки в діапазоні 0,48...0,5 %. Через набагато більший час експлуатації суден (та відповідно дизелів) поза SECAs порівняно з

експлуатацією у SECAs робота дизелів відбувалась на одному й тому ж сорті моторного мастила без його зміни в разі переведення дизелів з одного сорту палива (класу IFO380 або IFO450 зі вмістом сірки 0,48...0,5 % за масою) на інше (DMA10 або DMA20 зі вмістом сірки не більш за 0,1 %). Повний цикл дослідження складав 1000 годин. Значення TBN мастила та вмісту металевих домішок  $C_{Fe}$  у мастилі для деяких часових інтервалів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Результати експерименту з визначення експлуатаційних характеристик моторних мастил у системі циліндрового мащення суднових дизелів 6S50ME

Час, год	ММ № 1		ММ № 2		ММ № 3	
	TBN, мгКОH/г	$C_{Fe}$ , ppm	TBN, мгКОH/г	$C_{Fe}$ , ppm	TBN, мгКОH/г	$C_{Fe}$ , ppm
0	40,0	—	40,0	—	40,0	—
100	28,1	62,1	27,3	55,1	32,7	61,2
200	32,2	58,2	28,2	56,0	28,3	58,4
300	29,8	53,3	30,9	47,2	25,1	62,0
400	26,3	55,9	30,0	48,4	29,0	56,2
500	28,1	48,2	26,2	52,0	32,2	55,0
600	33,0	52,6	25,4	57,9	30,1	59,2
700	31,6	49,8	29,1	53,2	32,4	54,3
800	32,3	58,4	31,3	52,6	27,1	47,8
900	27,9	62,1	32,7	48,0	27,8	51,1
1000	27,4	60,0	28,0	52,2	28,5	57,2

Візуалізація даних, що наведені в таблиці 3.2, подана у вигляді діаграм на рис. 3.2.

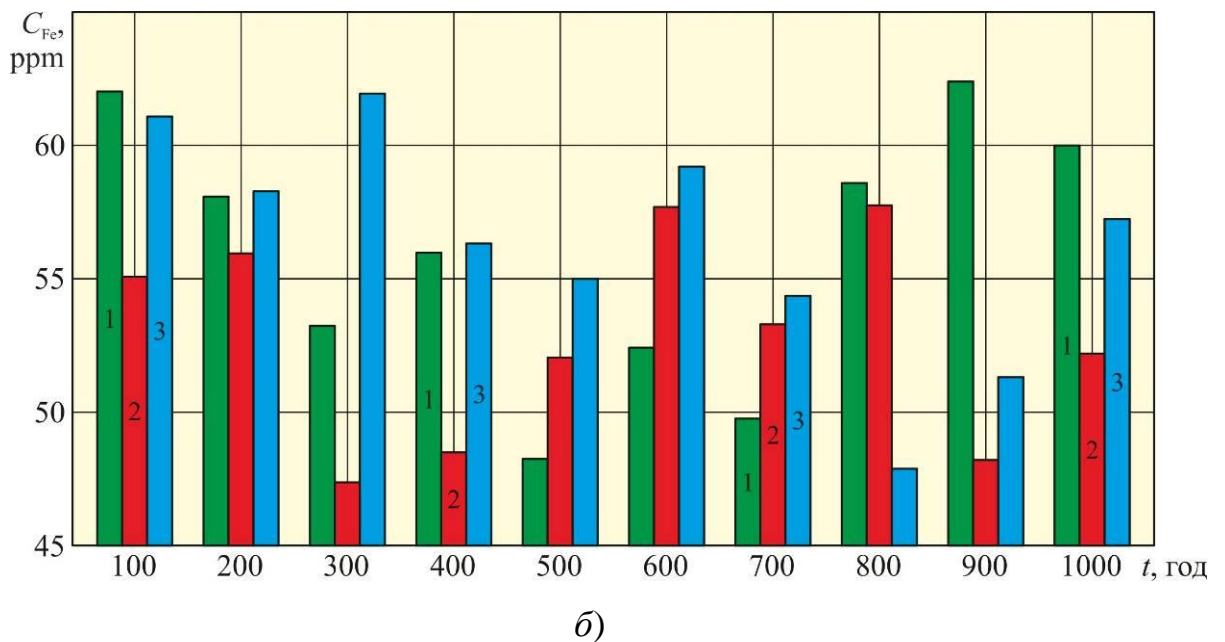
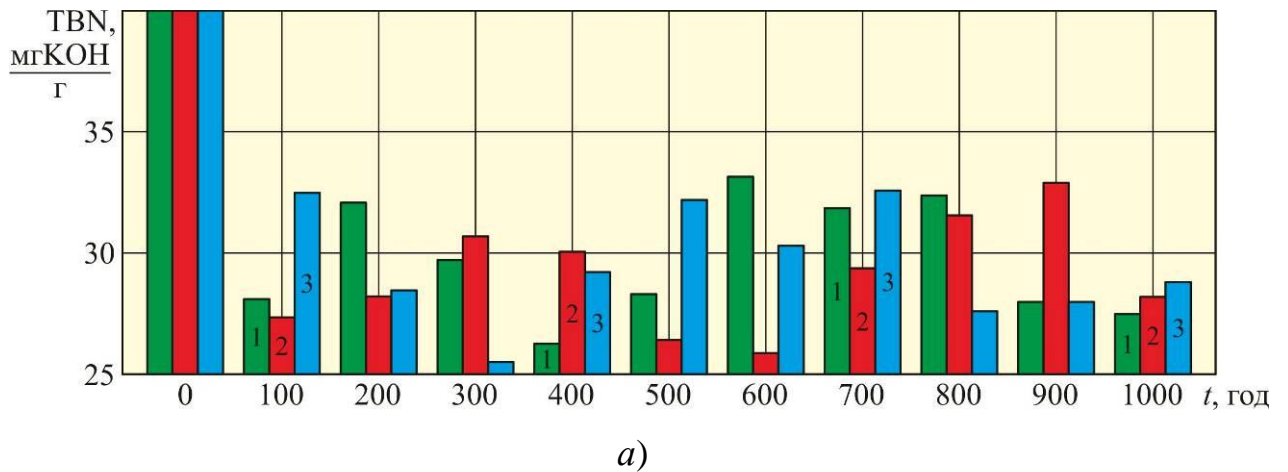


Рис. 3.2. Зміна експлуатаційних показників моторних мастил циліндрової системи мащення суднових дизелів 6S50ME:

*a* – загальне лужне число; *б* – вміст металевих домішок;

1 – ММ № 1, Exxon Mobil Mobilgard 540; 2 – ММ № 2, Shell Rimula R4X 15W40; 3 – ММ № 3, Castroll Cyltech 40SX

Зміна TBN має випадковий характер, але інтенсивність її зменшення зумовлює збільшення або зменшення вмісту металевих домішок в мастилі.

Величина загального лужного числа TBN та значення концентрації металевих домішок  $C_{Fe}$  у моторному мастилі характеризують поточний стан процесу мащення та не надають оцінки його комплексному перебігу. Для виконання такої оцінки найбільш доцільним є визначення швидкості зміни цих показників, яка визначається за виразами:

- швидкість зміни загального лужного числа моторного мастила

$$V_{\text{TBN}}^{2\text{T}} = \frac{\text{TBN}_n - \text{TBN}_0}{t_n - t_{n-1}}, \left[ \frac{\text{мгКОН/г мастила}}{\text{год}} \right]; \quad (3.31)$$

- швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі

$$V_{C_{\text{Fe}}} = \frac{C_{\text{Fe}_n} - C_{\text{Fe}_{n-1}}}{t_n - t_{n-1}}, \left[ \frac{\text{ppm}}{\text{год}} \right]; \quad (3.32)$$

де  $\text{TBN}_n$ ,  $\text{TBN}_0$  – початкове (паспортне) та поточне значення загального лужного числа мастила, мгКОН/г мастила;

$C_{\text{Fe}_n}$ ,  $C_{\text{Fe}_{n-1}}$  – поточне та попереднє значення вмісту металевих домішок у мастилі, ppm;

$t_n$ ,  $t_{n-1}$  – поточний та попередній часовий інтервал, що відповідає відбору проб мастила та проведенню аналізів, год.

Через лінійність системи циліндрового мащення (тобто одноразової подачі моторного мастила на дзеркало циліндрової втулки для одного або декількох ходів поршня та відсутності поповнення цієї порції моторного мастила протягом часу її знаходження в циліндрі) швидкість зміни загального лужного числа в цьому випадку визначається через порівняння її поточного значення з паспортним, тобто з таким, з яким мастило вприскується в циліндр лубрикатором.

Величина  $V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$  характеризується негативними значеннями для всіх режимів та інтервалів експлуатації дизелів. **Збільшення швидкості** зміни загального лужного числа  $V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$  свідчить про виникнення додаткових процесів та явищ, що призвели до підвищення кислотного середовища в циліндрі дизеля та, відповідно, до **зменшення** TBN моторного мастила .

Зазначимо, що  $V_{C_{\text{Fe}}}$  може приймати як позитивні, так і негативні значення. Позитивні значення  $V_{C_{\text{Fe}}}$ , а також збільшення його абсолютної

величини є ознакою виникнення режимів граничного або сухого тертя та пов'язаного з цим підвищення контактних взаємодій. **Позитивні значення**  $V_{C_{Fe}}$  відповідають режимам тертя, у результаті яких **збільшується знос** циліндрових втулок та поршневих кілець, що відображається в підвищенні кількості металевих домішок у пробах моторного мастила. **Негативні значення**  $V_{C_{Fe}}$  свідчать про зменшення металевих домішок у моторному мастилi порівняно з попереднім вимірюванням та характеризують **зменшення зносу** контактних поверхонь за цей період.

Також необхідно зосередити увагу на тому, що величини  $V_{C_{Fe}}$  визначаються не як порівняння між поточним та первісним значенням, а саме як порівняння послідовних один за одним результатів з визначення вмісту металевих домішок у пробах мастила. Саме це дозволяє діагностувати перебіг процесу мащення за певний проміжок часу. Особливо небезпечними є такі режими, за якими спостерігається постійне збільшення швидкості зміни концентрації металевих домішок у мастилi, тобто у випадках, коли значення  $V_{C_{Fe}}$  постійно зростає. Ці режими можуть діагностуватися як такі, за якими порушуються умови мащення циліндрової групи та поршневих кілець та такі, за якими тертя між циліндровою втулкою та поршневими кільцями переходить до граничного або сухого режимів.

З урахуванням наведених виразів та за даними таблиці 3.2 за виразами (3.31), (3.32) отримаємо відповідні значення швидкості зміни загального лужного числа та швидкості зміни концентрації металевих домішок у мастилi, які узагальнимо у вигляді таблиці 3.3.

Для систем циліндрового мащення поточне та попереднє зменшення загального лужного числа під час експлуатації характеризується коливальним характером. Через це коливальним характером характеризується також швидкість зміни загального лужного числа. Поточне значення цієї величини порівняно з попереднім може змінюватися або в бік зменшення, або в бік збільшення за певний проміжок часу. Це дає

Таблиця 3.3

Результати розрахунків з визначення швидкості зміни загального лужного числа  $V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$ , градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$  та швидкості зміни вмісту металевих домішок у мастилі  $V_{\text{CFe}}$  щодо системи циліндрового мащення суднових дизелів 6S50ME

Час, год	ММ № 1			ММ № 2			ММ № 3		
	$V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$V_{\text{CFe}}$	$V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$V_{\text{CFe}}$	$V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$V_{\text{CFe}}$
100	-0,119	—	—	-0,127	—	—	-0,073	—	—
200	-0,078	0,041	-0,039	-0,118	0,009	0,009	-0,117	-0,044	-0,028
300	-0,102	-0,024	-0,049	-0,091	0,027	-0,088	-0,149	-0,032	0,036
400	-0,137	-0,035	0,026	-0,100	-0,009	0,012	-0,110	0,039	-0,058
500	-0,119	0,018	-0,077	-0,138	-0,038	0,036	-0,078	0,032	-0,012
600	-0,070	0,049	0,044	-0,146	-0,008	0,059	-0,099	-0,021	0,042
700	-0,084	-0,014	-0,028	-0,109	0,037	-0,047	-0,076	0,023	-0,049
800	-0,077	0,007	0,086	-0,087	0,022	-0,006	-0,129	-0,053	-0,065
900	-0,121	-0,044	0,037	-0,073	0,014	-0,046	-0,122	0,007	0,033
1000	-0,126	-0,005	-0,021	-0,120	-0,047	0,042	-0,115	0,007	0,061

підставу для оцінки перебігу процесу мащення ввести додаткове поняття «**градієнт швидкості зміни загального лужного числа**», який може бути визначено як

$$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}} = \frac{V_{\text{TBN}_n} - V_{\text{TBN}_{n-1}}}{t_n - t_{n-1}}, \left[ \frac{\text{мгКОН/г мастила}}{\text{год}} \right]. \quad (3.33)$$

**Позитивні значення** цієї величини відповідають уповільненню зменшення загального лужного числа (та, відповідно, зменшенню окислювальних процесів в циліндрі дизеля та покращення перебігу процесу мащення), **негативні** – прискоренню зменшення загального лужного числа (та, відповідно, погіршенню перебігу процесу мащення).

Розрахункові значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$ , що отримані за виразом (3.33), наведені в таблиці 3.3. Для кращої візуалізації, результати, що наведені в таблиці 3.3, подані у вигляді діаграм (рис. 3.3-3.5).

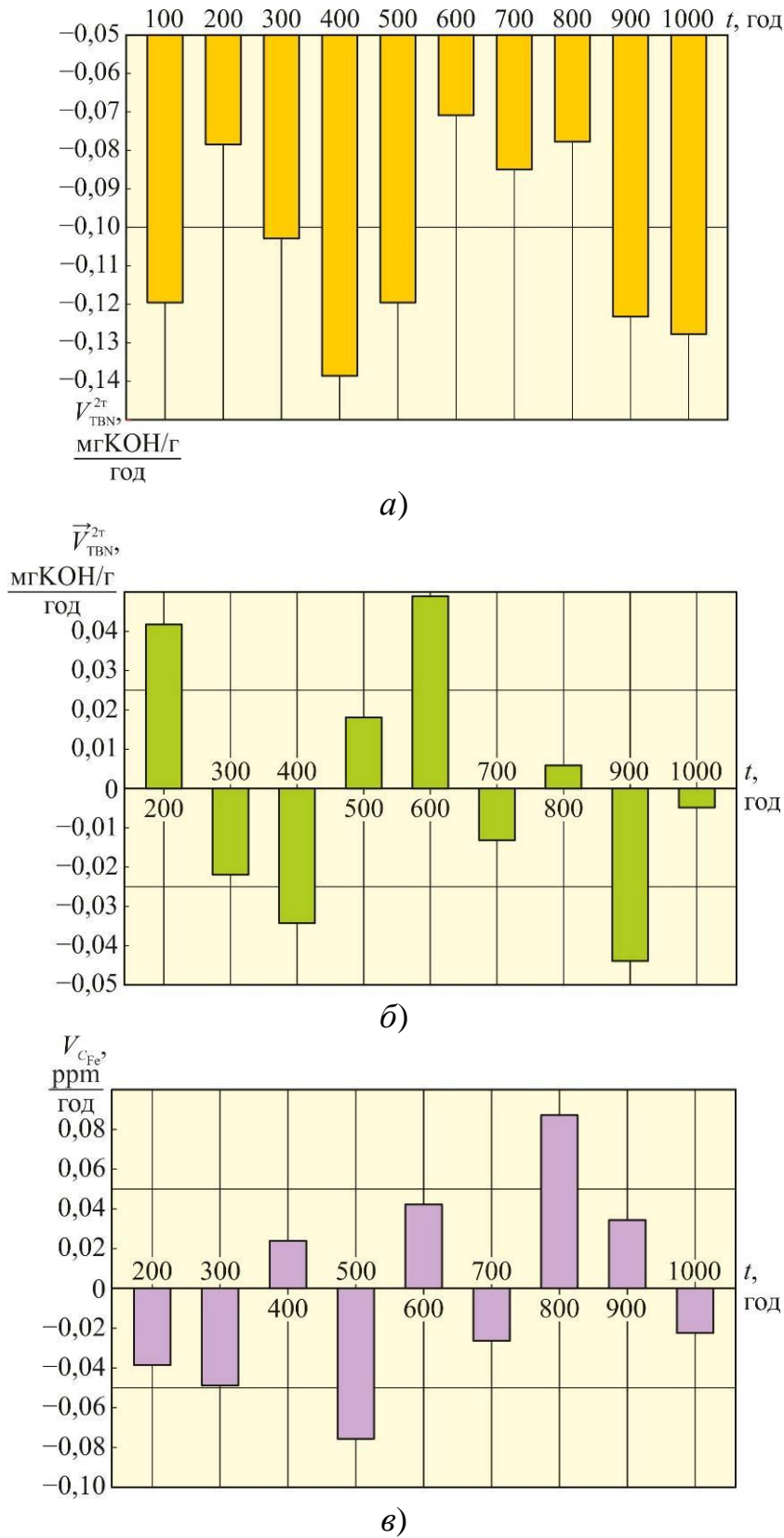


Рис. 3.3. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила під час проведення експериментів в системі циліндрового мащення суднових дизелів 6S50ME (щодо ММ № 1):

*а* – швидкість зміни загального лужного числа; *б* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; *в* – швидкість вмісту металевих домішок у мастилі

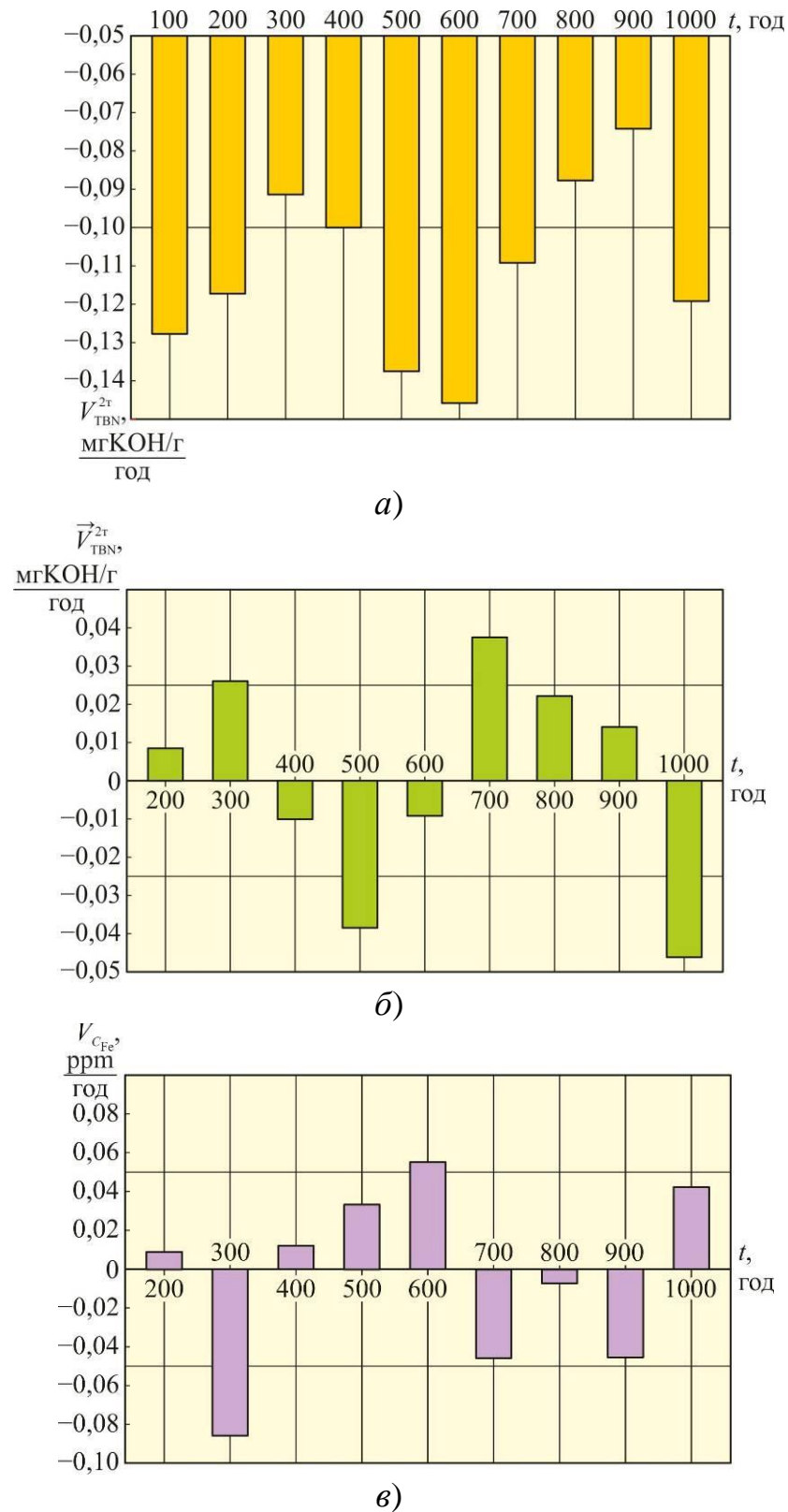


Рис. 3.4. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила під час проведення експериментів в системі циліндрового мащення суднових дизелів 6S50ME (щодо ММ № 2):

*a* – швидкість зміни загального лужного числа; *б* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; *в* – швидкість вмісту металевих домішок у мастилі

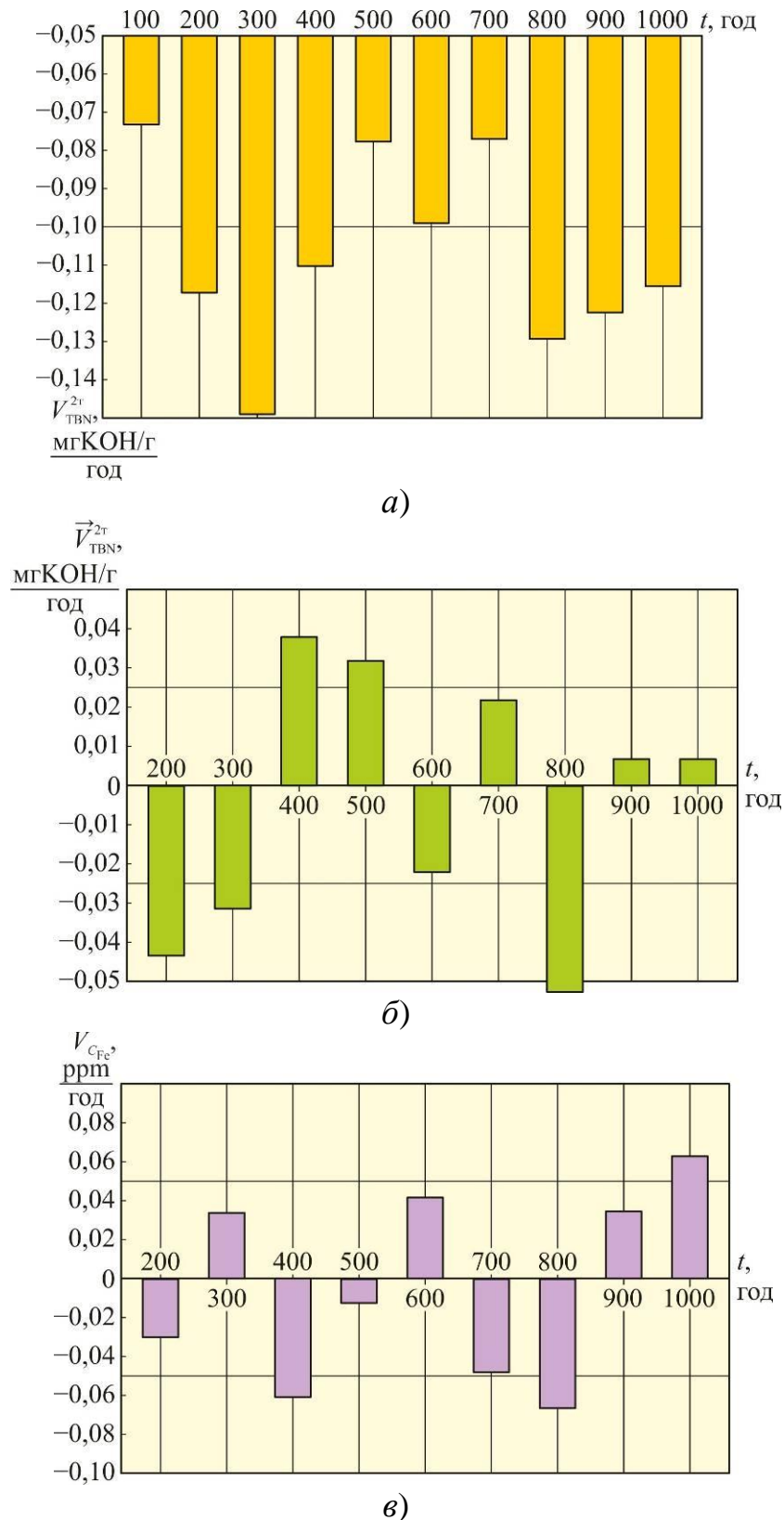


Рис. 3.5. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила під час проведення експериментів в системі циліндрового мащення суднових дизелів 6S50ME (щодо ММ № 3):

*а* – швидкість зміни загального лужного числа; *б* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; *в* – швидкість вмісту металевих домішок у мастилі

### 3.3.2. Експериментальне визначення ресурсних показників суднових дизелів 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та 5L35MC MAN-B&W морських суден класу Container Ship та класу General Cargo

Дослідження за наведеною технологією та відповідною послідовністю були продовжені на інших морських суднах та інших двотактних дизелях. Це дало змогу збільшити масив експериментальних даних та переконатися в можливості імплементації поширення висновку на дизелі іншого класу з іншими конструкційними та енергетичними характеристиками [142, 143]. Цикл досліджень було виконано на суднах класу Container Ship з головним двигуном 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та General Cargo з головним двигуном 5L35MC MAN-B&W. Система циліндрового мащення кожного з дизелів відповідала принциповій схемі, що наведена на рис. 3.1.

У системі циліндрового мащення дизеля 9K80ME MAN-Diesel&Turbo використовувалось моторне мастило Mobilgard 560 VS – ExxonMobil, у системі циліндрового мащення дизеля 5L35MC MAN-B&W моторне мастило Castrol Turbo Diesel 40W. Основні характеристики моторних мастил надані в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Основні характеристики моторних мастил під час проведення експериментів в системах циліндрового мащення суднових дизелів 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та 5L35MC MAN-B&W

Параметр	Марка моторного мастила	
	Mobilgard 560 VS	Castrol 40W
Клас SAE	50	50
Густина за 15°C, кг/м <sup>3</sup>	919	950
В'язкість кінематична за 40°C, сСт	216	209
В'язкість кінематична за 100°C, сСт	20,0	18,5
Температура спалаху, °C	248	210
Загальне лужне число, TBN, мгКОН/г	70	50

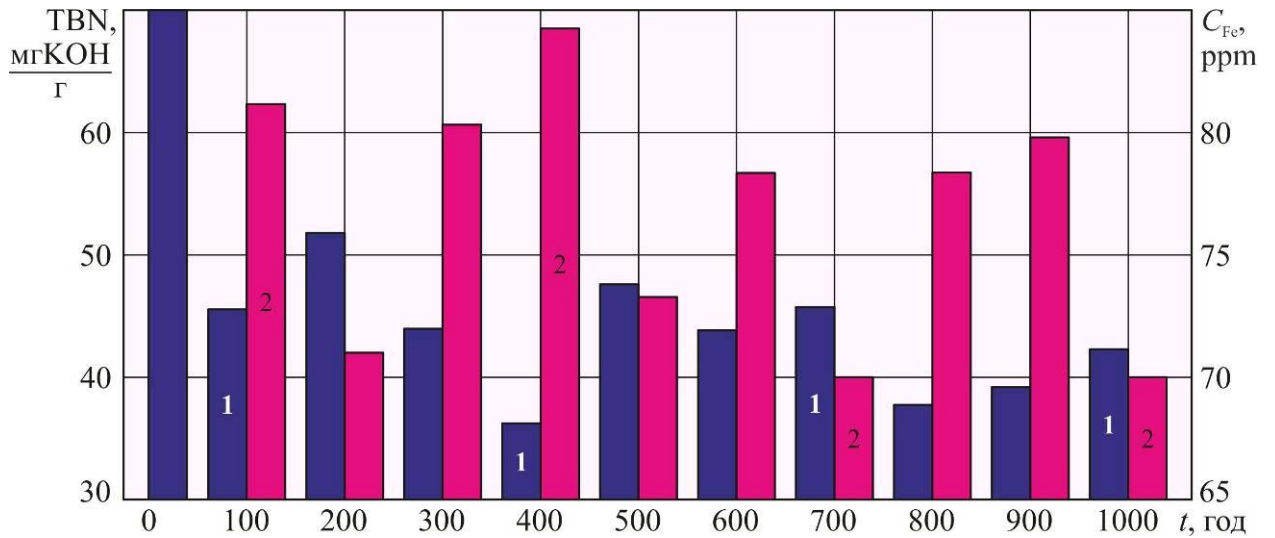
Аналогічно з попередніми дослідженнями під час випробувань протягом 1000 годин роботи дизелів за певні проміжки часу відбиралися проби моторного мастила з підпоршневого простору дизелів та визначалися значення TBN моторного мастила та вміст у мастилі металевих домішок  $C_{Fe}$ . Результати вимірювань надані в таблиці 3.5. Після чого (відповідно до виразів 3.31-3.33) за експериментальними значеннями виконувались розрахунки швидкості зміни загального лужного числа  $V_{TBN}^{2T}$ , градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{TBN}^{2T}$  та швидкості зміни вмісту металевих домішок у мастилі  $V_{C_{Fe}}$ . Результати розрахунків надані в таблиці 3.6.

Таблиця 3.5

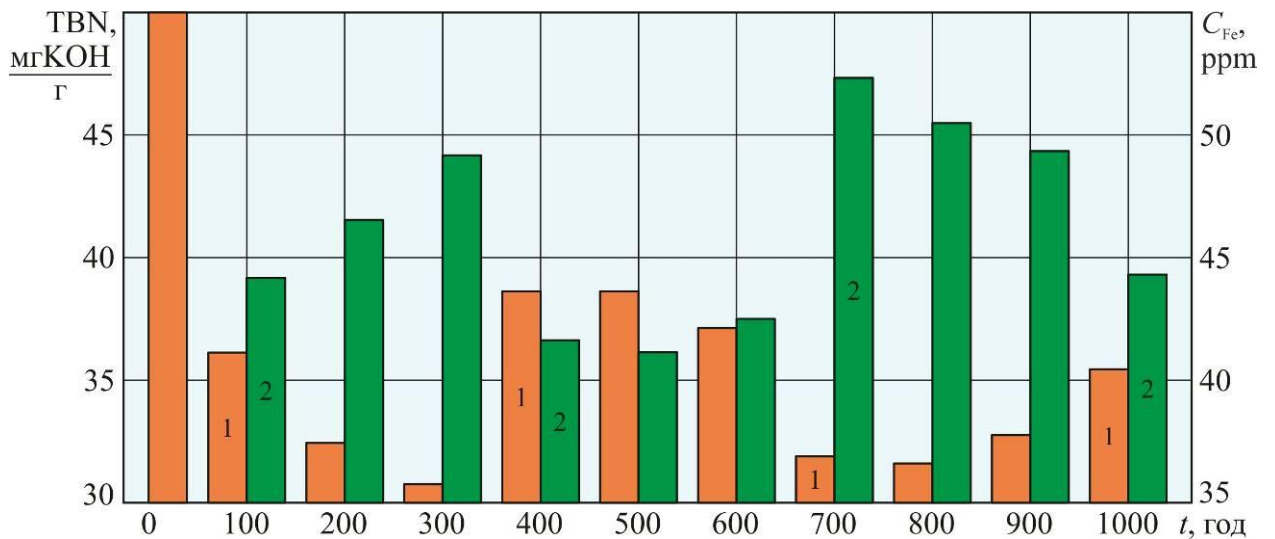
Результати вимірювань експлуатаційних характеристик моторних мастил у системі циліндрового мащення суднових двотактних дизелів 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та 5L35MC MAN-B&W

Час, год	9K80ME MAN-Diesel&Turbo, моторне мастило Mobilgard 560 VS		5L35MC MAN-B&W, моторне мастило Castrol Turbo Diesel 40W	
	TBN, мгКОН/г	$C_{Fe}$ , ppm	TBN, мгКОН/г	$C_{Fe}$ , ppm
0	70	—	50	—
100	46,3	81,2	36,3	44,2
200	52,3	72,3	32,6	46,8
300	44,1	80,6	30,9	49,3
400	36,9	84,7	38,4	41,6
500	48,2	73,6	38,5	41,5
600	44,3	78,4	37,2	42,3
700	46,2	70	31,8	52,6
800	38,4	78,6	31,6	50,8
900	39,6	79,2	32,9	48,6
1000	42,7	69,5	35,3	44,3

Візуалізація даних, що наведені в таблиці 3.5, подана у вигляді діаграм на рис. 3.6.



a)



б)

Рис. 3.6. Зміна експлуатаційних показників моторних мастил системи циліндрового мащення суднових двотактних дизелів

9K80ME MAN-Diesel&Turbo (a) та 5L35MC MAN-B&W (б):

1 – загальне лужне число моторного мастила ; 2 – вміст металевих домішок у моторному мастилi

Таблиця 3.6

Результати розрахунків з визначення швидкості зміни загального лужного числа  $V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$ , градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$  та швидкості зміни вмісту металевих домішок у мастилі  $V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$  щодо системи циліндрового мащення судових двотактних дизелів 9K80ME MAN-Diesel&Turbo та 5L35MC MAN-B&W

Час, год	9K80ME MAN-Diesel&Turbo, моторне мастило Mobilgard 560 VS			5L35MC MAN-B&W, моторне мастило Castrol Turbo Diesel 40W		
	$V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$	$V_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}}$	$V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$
100	-0,237	—	—	-0,137	—	—
200	-0,177	0,06	-0,089	-0,174	-0,037	0,026
300	-0,259	-0,082	0,083	-0,191	-0,017	0,025
400	-0,331	-0,072	0,041	-0,116	0,075	-0,077
500	-0,218	0,113	-0,111	-0,115	0,001	-0,001
600	-0,257	-0,039	0,048	-0,128	-0,013	0,008
700	-0,238	0,019	-0,084	-0,182	-0,054	0,103
800	-0,316	-0,078	0,086	-0,184	-0,002	-0,018
900	-0,304	0,012	0,006	-0,171	0,013	-0,022
1000	-0,273	0,031	-0,097	-0,147	0,024	-0,043

Візуалізація даних, що наведені в таблиці 3.6, подана у вигляді діаграм на рис. 3.7-3.8.

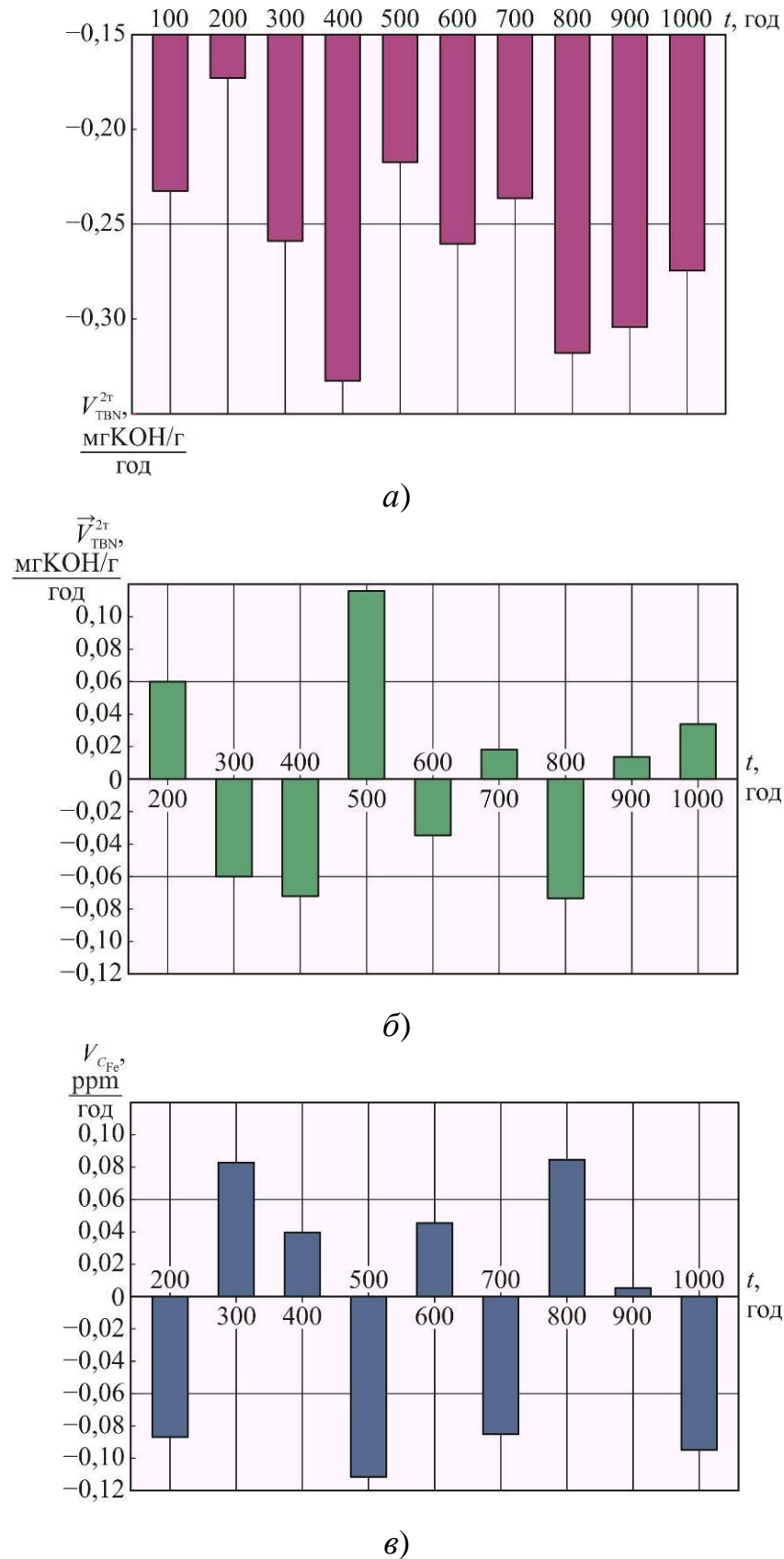


Рис. 3.7. Зміна експлуатаційних показників мастила Mobilgard 560 VS в системі циліндрового мащення дизеля 9K80ME MAN-Diesel&Turbo: а – швидкість зміни загального лужного числа; б – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; в – швидкість зміни вмісту металевих домішок

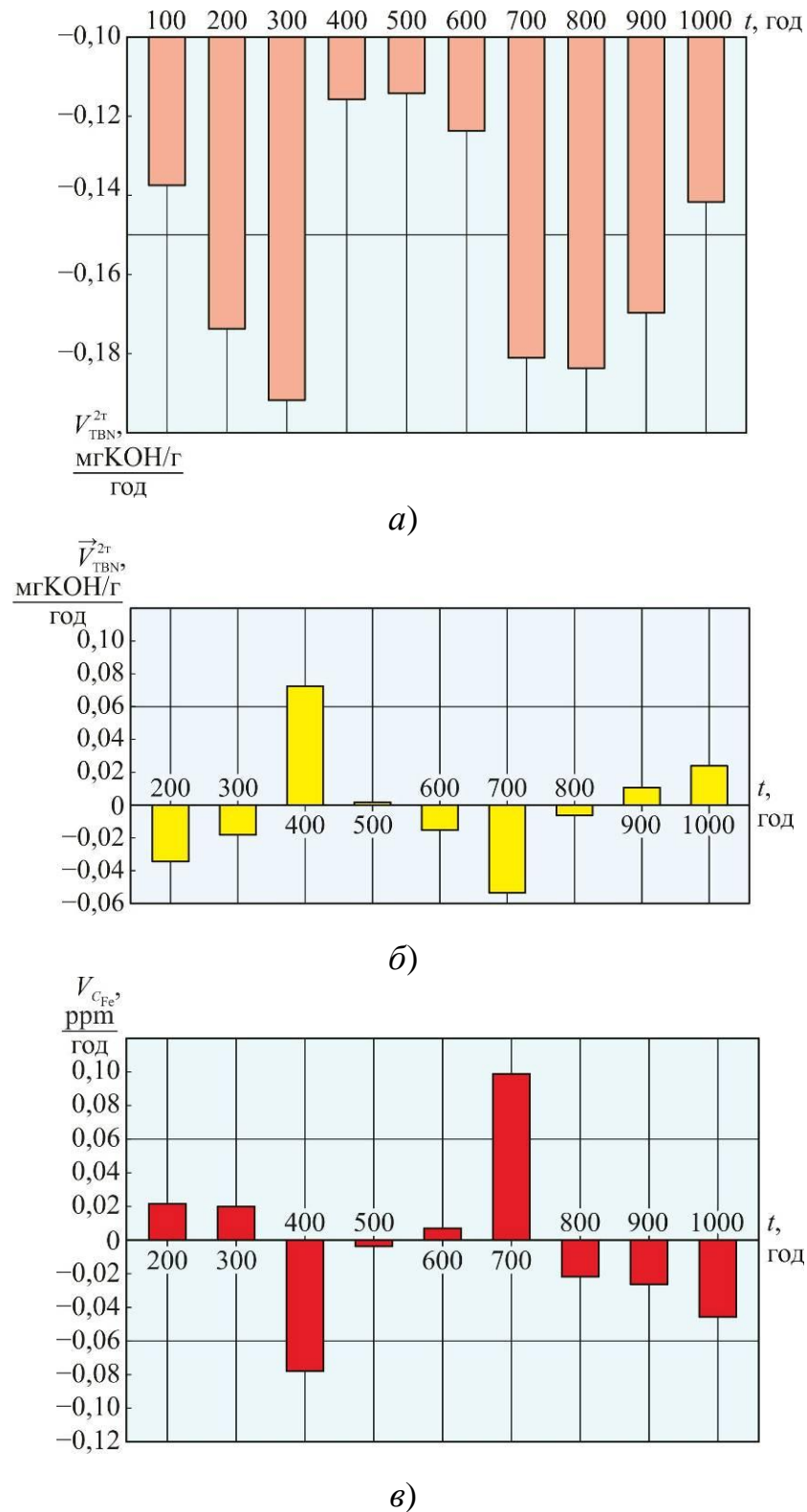


Рис. 3.8. Зміна експлуатаційних показників мастила Castrol Turbo Diesel 40W в системі циліндрового мащення дизеля 5L35MC MAN-B&W:  
*а* – швидкість зміни загального лужного числа; *б* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; *в* – швидкість зміни вмісту металевих домішок

3.4. Діагностування зміни технічного стану чотиритактних дизелів морських суден за аналізом експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в системах циркуляційного мащення

3.4.1. Експериментальне визначення ресурсних показників судових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel морських суден класу Bulk Carrier

Цикл подібних досліджень був продовжений в системах циркуляційного мащення судових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel Mfg. Co., Ltd. Принципова відміна циркуляційних систем мащення від циліндрових полягає в тому, що в цих системах мастило потрапляє як на контактні поверхні циліндрової групи також і на поверхні підшипників ковзання. При цьому мастило здійснює неодноразове мащення цих поверхонь, що призводить до поступового накопичення в ньому металевих домішок та, відповідно, постійному збільшенню їхньої концентрації (за умовою відсутності додавання свіжого мастила в систему). Принципова схема системи циркуляційного мащення судового чотиритактного дизеля наведена на рис. 3.9.

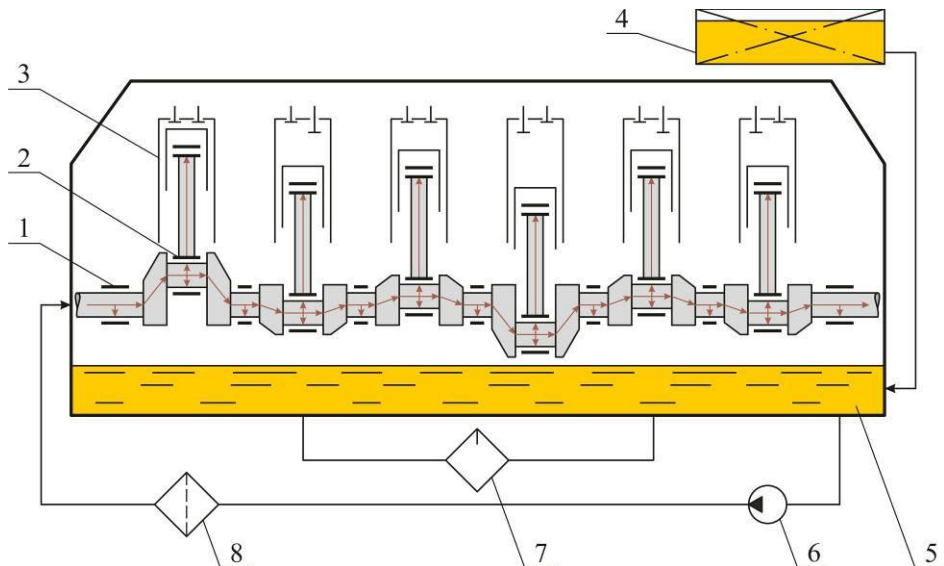


Рис. 3.9. Принципова схема циркуляційної системи мащення судових чотиритактних дизелів:

- 1 – трибосполучення вал – вкладиш рамового підшипника; 2 – трибосполучення вал – вкладиш мотильового підшипника; 3 – трибосполучення кільце – циліндрова втулка; 4 – мастильна цистерна; 5 – картер; 6 – циркуляційний мастильний насос; 7 – мастильний сепаратор; 8 – мастильний фільтр

У системах циркуляційного мащення здійснюється постійне зниження загального лужного числа моторного мастила, тому вираз швидкості його зміни визначається як різниця між послідовними вимірюваннями за певний проміжок часу

$$V_{\text{TBN}}^{4\text{T}} = \frac{\text{TBN}_n - \text{TBN}_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}, \left[ \frac{\text{мгКОН/г мастила}}{\text{год}} \right]; \quad (3.34)$$

у якому  $\text{TBN}_n$ ,  $\text{TBN}_{n-1}$  – поточне та попереднє значення загального лужного числа мастила, мгКОН/г мастила.

Подібно дослідженням, що були виконані на суднових двотактних дизелях, цикл досліджень у системі циркуляційного мащення чотиритактних дизелів виконувався для трьох однотипних суден, згаданих раніше. Експлуатація дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel під час знаходження суден поза SECAs здійснювалась на паливах класу IFO380 зі вмістом сірки 0,48...0,5 % за масою, під час знаходження суден всередині SECAs на паливах класу IFO180 зі вмістом сірки 0,08...0,1 % за масою. Для всіх умов експлуатації в системі циркуляційного мащення використовувались моторні мастила з загальним лужним числом 40 мгКОН/г мастила. Деякі характеристики моторних мастил наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Основні характеристики моторних мастил під час проведення експериментів в системах циркуляційного мащення суднових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel

Параметр	Марка моторного мастила		
	ММ № 1, Exxon Mobil Mobilgard 412	ММ № 2, Shell Gadinia S3 40	ММ № 3, Castrol MHP 154
Клас SAE	40	40	40
Густина за 15°C, кг/м <sup>3</sup>	899	890	895
В'язкість кінематична за 40°C, сСт	142	128	122
В'язкість кінематична за 100°C, сСт	14,5	13,7	13,5
Температура спалаху, °C	272	230	200
Загальне лужне число (Total Base Number – TBN), мгКОН/г	20	20	20

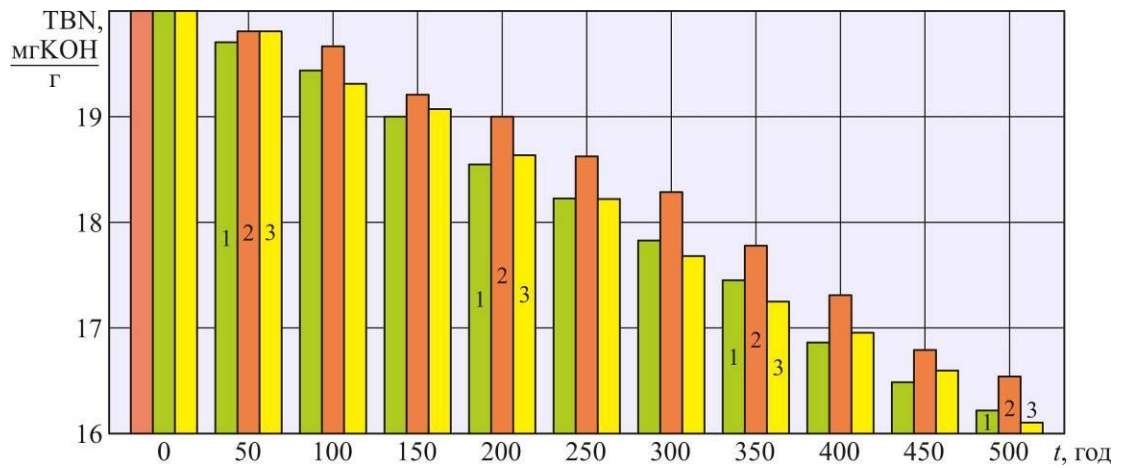
Відбір проб моторного мастила для подальшого аналізу виконувався в чотирьох різних точках картера дизеля. Для кожної в такий спосіб отриманої порції мастила виконувалося визначення його загального лужного числа та вмісту металевих домішок [142, 143]. Після цього результати вимірювання усереднювались. Цикл випробувань складав 500 годин для кожного з дизелів – саме в цей часовий проміжок експлуатація дизелів виконувалась без поповнення обсягу моторного мастила в циркуляційній системі мащення. Результати вимірювань для деяких часових інтервалів наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

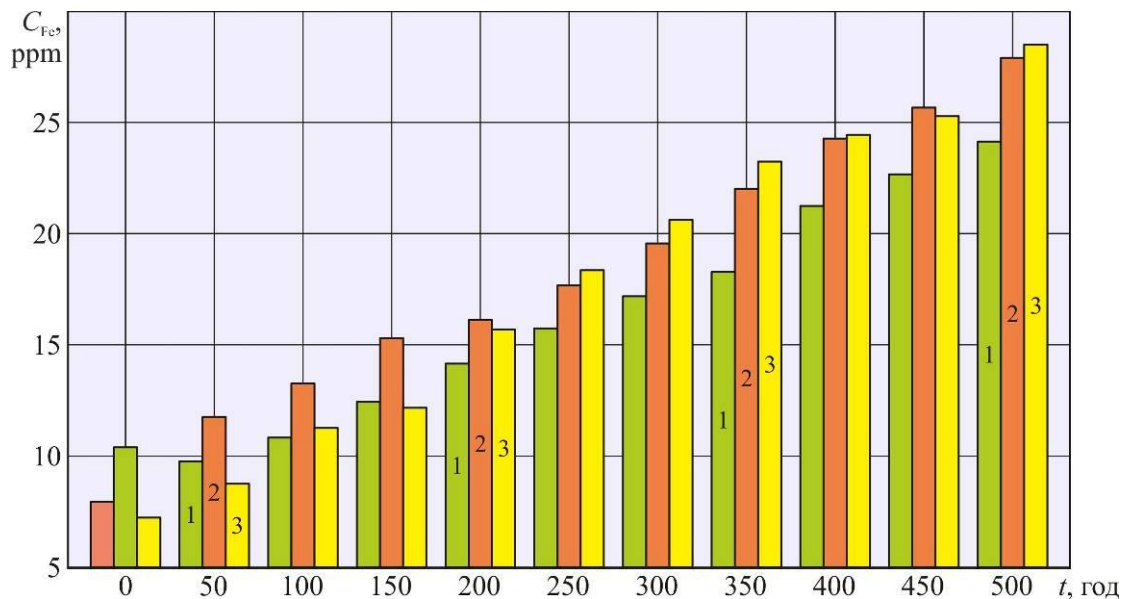
Результати експерименту з визначення експлуатаційних характеристик моторних мастил у системі циркуляційного мащення дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel

Час, год	ММ № 1, Exxon Mobil Mobilgard 412		ММ № 2, Shell Gadinia S3 40		ММ № 3, Castrol МНР 154	
	TBN, мгКОН/г	C <sub>Fe</sub> , ppm	TBN, мгКОН/г	C <sub>Fe</sub> , ppm	TBN, мгКОН/г	C <sub>Fe</sub> , ppm
0	20,0	8,3	20,0	10,6	20,0	7,4
50	19,7	9,7	19,8	11,8	19,8	8,2
100	19,4	10,9	19,6	13,1	19,3	11,2
150	19,0	12,5	19,2	15,3	19,1	12,3
200	18,6	14,1	19,0	16,1	18,7	15,6
250	18,2	15,6	18,7	17,7	18,2	18,4
300	17,8	17,2	18,3	19,6	17,7	20,7
350	17,5	18,3	17,8	22,0	17,3	23,1
400	16,9	21,2	17,3	24,3	17,0	24,5
450	16,5	22,7	16,8	26,8	16,6	26,2
500	16,3	24,1	16,6	28,1	16,1	28,6

Візуалізація даних, що наведені в таблиці 3.8, подана у вигляді діаграм на рис. 3.10.



а)



б)

Рис. 3.10. Зміна експлуатаційних показників моторних мастил в системі циркуляційного мащення суднових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel:  
1 – Exxon Mobil Mobilgard 412; 2 – Shell Gadinia S3 40; 3 – Castrol MHP 154

Аналогічно з дослідженнями, що були виконані в системах циліндрового мащення суднових двотактних дизелів, у цьому випадку також виконувалась оцінка перебігу процесу мащення. При цьому швидкість зміни загального лужного числа мастила та градієнт швидкості зміни загального лужного числа мастила визначались за виразом (3.34), швидкість зміни концентрації металевих домішок у мастилі за виразом (3.32). Результати розрахунків наведено в таблиці 3.9.

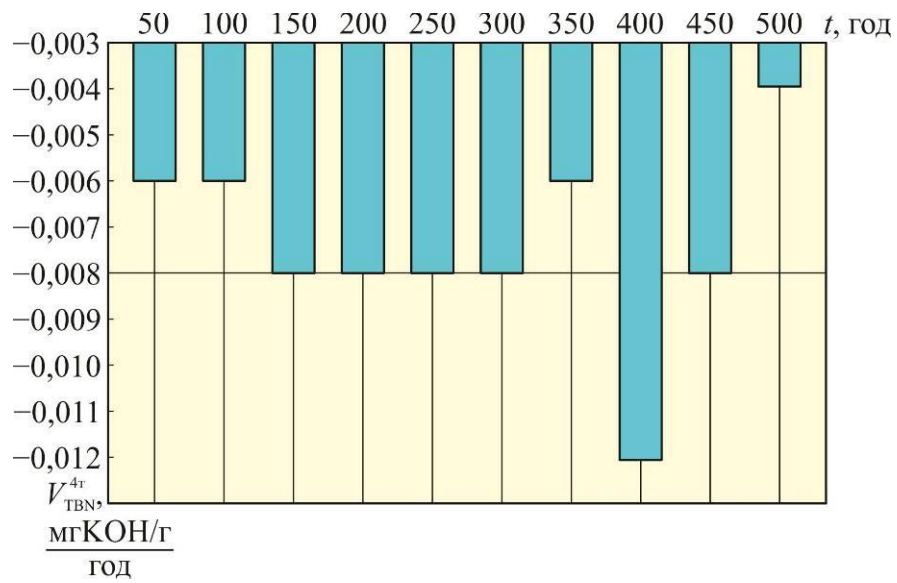
Таблиця 3.9

Результати розрахунків з визначення швидкості зміни загального лужного числа  $V_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$ , градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$  та швидкості зміни вмісту металевих домішок у мастилі  $V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$  щодо системи циркуляційного мащення судових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel

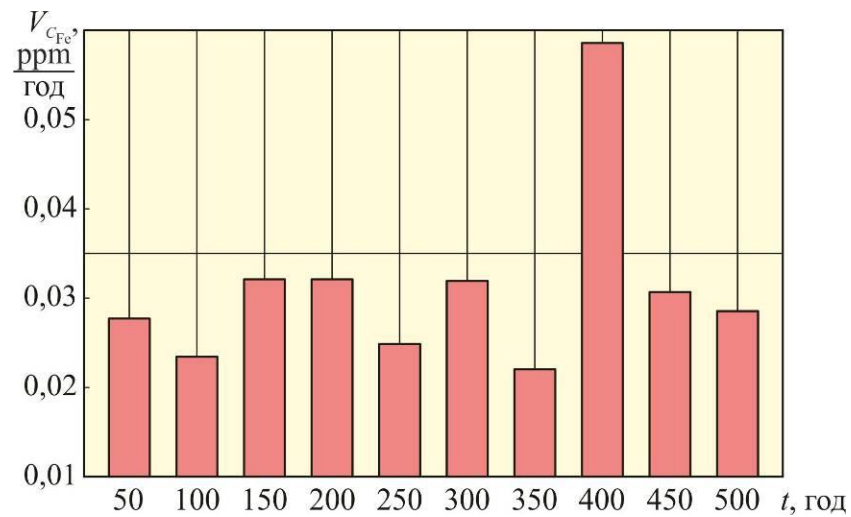
Час, год	ММ № 1, Exxon Mobil Mobilgard 412			ММ № 2, Shell Gadinia S3 40			ММ № 3, Castrol MHP 154		
	$V_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$	$V_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$	$V_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$
50	-0,006	-0,006	0,028	-0,004	-0,004	0,024	-0,004	-0,004	0,016
100	-0,006	-0,006	0,024	-0,004	-0,004	0,026	-0,010	-0,010	0,030
150	-0,008	-0,008	0,032	-0,008	-0,008	0,044	-0,004	-0,004	0,011
200	-0,008	-0,008	0,032	-0,004	-0,004	0,016	-0,008	-0,008	0,033
250	-0,008	-0,008	0,030	-0,006	-0,006	0,032	-0,010	-0,010	0,028
300	-0,008	-0,008	0,032	-0,008	-0,008	0,038	-0,010	-0,010	0,023
350	-0,006	-0,006	0,022	-0,010	-0,010	0,048	-0,008	-0,008	0,024
400	-0,012	-0,012	0,058	-0,010	-0,010	0,046	-0,006	-0,006	0,014
450	-0,008	-0,008	0,030	-0,010	-0,010	0,050	-0,008	-0,008	0,017
500	-0,004	-0,004	0,028	-0,004	-0,004	0,026	-0,010	-0,010	0,024

Система циркуляційного мащення забезпечує багаторазове потрапляння такого ж самого обсягу мастила до контактних поверхонь (з урахуванням того, що кількість мастила під час одного циклу досліджень не змінювалась шляхом її поповнення). Це призводить до поступового зменшення загального лужного числа мастила від одного вимірювання до іншого. Таким чином градієнт швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$  для системи циркуляційного мащення завжди негативний. Також для системи циркуляційного мащення визначимо поступове збільшення кількості металевих домішок, що потрапляють до об'єму мастила.

Для кращої візуалізації, результати, що наведені в таблиці 3.3, подані у вигляді діаграм (рис. 3.11-3.13).



а)

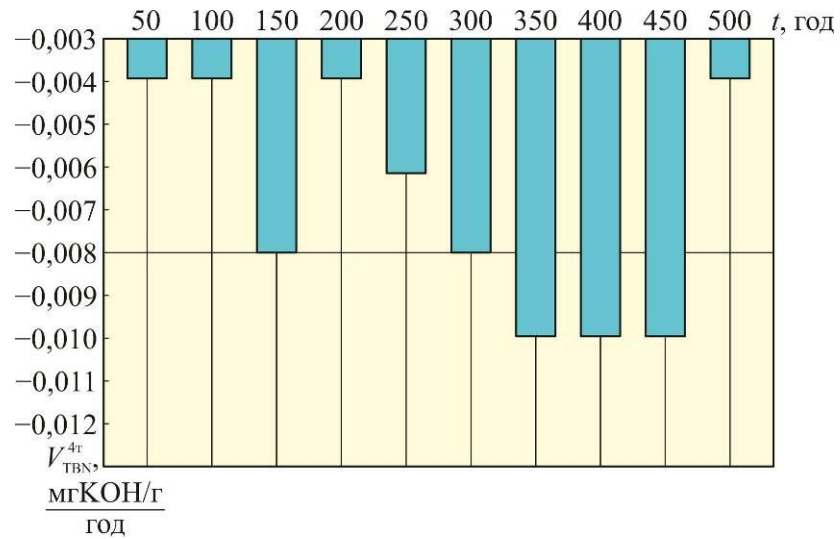


б)

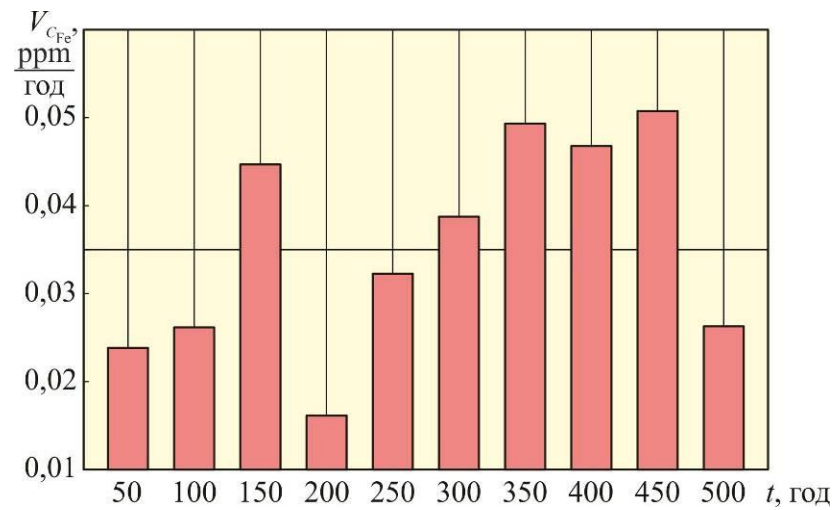
Рис. 3.11. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила в системі циркуляційного мащення суднових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel

(щодо ММ № 1, Exxon Mobil Mobilgard 412):

а – швидкість зміни загального лужного числа; б – швидкість вмісту металевих домішок у мастилi



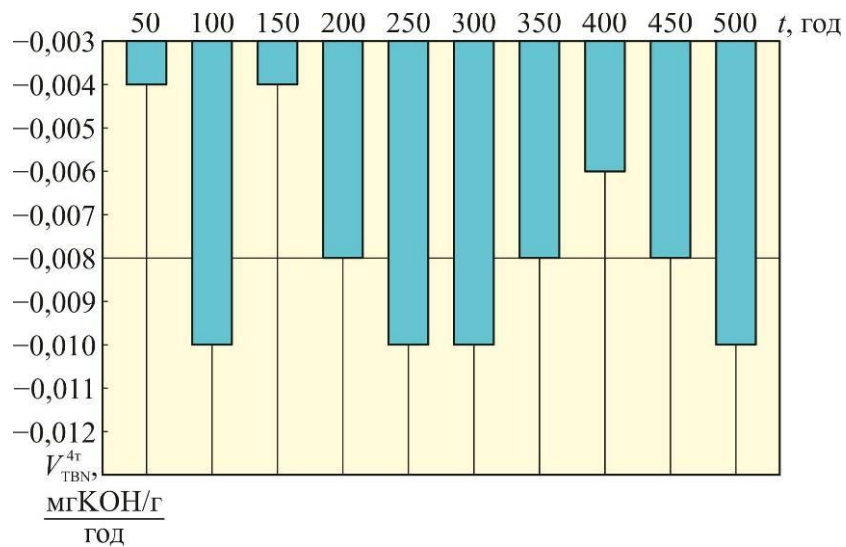
а)



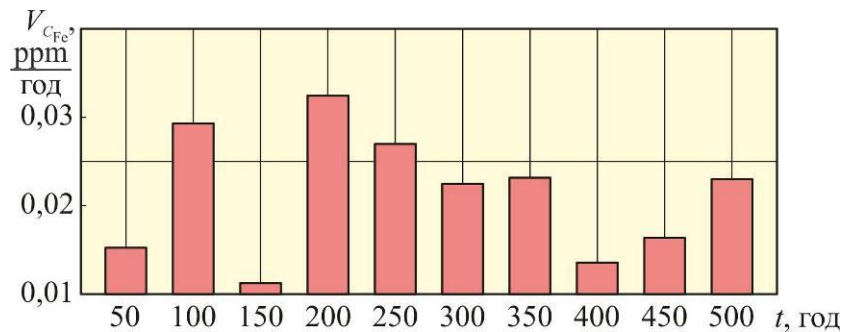
б)

Рис. 3.12. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила в системі циркуляційного мащення суднових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel (щодо ММ № 2, Shell Gadinia S3 40):

*a* – швидкість зміни загального лужного числа; *б* – швидкість вмісту металевих домішок у мастилi



а)



б)

Рис. 3.13. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила в системі циркуляційного мащення суднових дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel

(щодо ММ № 3, Castrol MHP 154):

а – швидкість зміни загального лужного числа; б – швидкість вмісту металевих домішок у мастилi

У випадку аналізу зміни експлуатаційних характеристик моторного мастила систем циркуляційного мащення (на відміну від систем циліндрового мащення) значення  $V_{TBN}$  визначаються не як порівняння між поточним та первісним значенням, а саме як порівняння послідовних один за одним результатів з визначення значень відповідних параметрів. Саме це дозволяє діагностувати перебіг процесу мащення за певний проміжок часу.

### 3.4.2. Експериментальне визначення ресурсних показників суднових дизелів 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo та 5H17/28 Hyundai Heavy Industries морських суден класу Container Ship та класу General Cargo

Дослідження за наведеною технологією та відповідною послідовністю були продовжені на інших морських суднах та інших чотиритактних дизелях. Це дало змогу збільшити масив експериментальних даних та переконатися в можливості імплементації поширення висновків на дизелі іншого класу з іншими конструкційними та енергетичними характеристиками [144, 145]. Цикл досліджень було виконано на суднах класу Container Ship з допоміжними двигунами 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo та General Cargo з допоміжними двигунами 5H17/28 Hyundai Heavy Industries. Система циркуляційного мащення кожного з дизелів відповідала принциповій схемі, що наведена на рис. 3.9.

Під час знаходження суден у районах спеціального екологічного контролю SECAs експлуатація дизелів в обох випадках виконувалась на паливі, вміст сірки в якому не перевищував 0,1 %. Це забезпечувало виконання вимог Annex VI MARPOL щодо контролю емісії оксидів сірки  $SO_x$  з випускними газами дизелів. Під час перебування суден поза SECAs для забезпечення роботи дизелів використовувалось паливо, вміст сірки в якому не перевищував 0,5 %. При цьому під час зміни сорту палива з одного на інший дизелі експлуатувались на тому самому сорті моторного мастила.

У системі циркуляційного мащення дизеля 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo використовувалось моторне мастило Exxon Mobil Mobilgard SHC, у системі циркуляційного мащення дизеля 5H17/28 Hyundai Heavy Industries моторне мастило Shell Argina X 40. Основні характеристики моторних мастил надані в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Основні характеристики моторних мастил під час проведення експериментів в системах циркуляційного мащення суднових чотиритактних дизелів 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo та 5H17/28 Hyundai Heavy Industries

Параметр	Марка моторного мастила	
	Exxon Mobil Mobilgard SHC	Shell Argina X 40
Клас SAE	40	40
Густина за 15°C, кг/м <sup>3</sup>	892	874
В'язкість кінематична за 40°C, сСт	232	216
В'язкість кінематична за 100°C, сСт	16,3	15,8
Температура спалаху, °C	206	218
Загальне лужне число (Total Base Number – TBN), мгКОН/г	40	40

Аналогічно з попередніми дослідженнями під час випробувань протягом 500 годин роботи дизелів з інтервалом 50 годин відбиралися проби моторного мастила з чотирьох різних точок картера дизелів та в судновій дослідницької лабораторії визначалися значення TBN моторного мастила та вміст у мастилі металевих домішок  $C_{Fe}$ . Отримані в такий спосіб дані усереднювалися. Результати вимірювань надані в таблиці 3.11. Після чого (відповідно до виразів 3.32-3.34) за отриманими експериментальними значеннями виконувались розрахунки швидкості зміни загального лужного числа  $V_{TBN}^{4T}$ , градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{TBN}^{4T}$  та швидкості зміни вмісту домішок заліза в мастилі  $V_{C_{Fe}}$ . Результати розрахунків надані в таблиці 3.12.

Таблиця 3.11

Результати вимірювань експлуатаційних характеристик моторних мастил  
в системі циліндрового мащення суднових дизелів  
6L27/38 MAN-Diesel&Turbo та 5H17/28 Hyundai Heavy Industries

Час, год	6L27/38 MAN-Diesel&Turbo, моторне мастило Mobilgard SHC		5H17/28 Hyundai Heavy Industries, моторне мастило Shell Argina X 40	
	TBN, мгКОН/г	C <sub>Fe</sub> , ppm	TBN, мгКОН/г	C <sub>Fe</sub> , ppm
0	40	6,8	40	8,3
50	39,5	8,1	39,4	9,6
100	39,2	9,0	39,0	10,5
150	37,8	11,2	38,1	12,3
200	36,3	13,3	36,5	14,6
250	35,8	14,4	35,5	16,2
300	35,3	15,6	34,7	17,6
350	35,0	16,5	33,8	19,0
400	34,7	17,7	33,0	20,1
450	34,2	18,7	32,6	20,8
500	33,8	69,5	32,3	21,4

Візуалізація даних, що наведені в таблиці 3.11, подана у вигляді діаграм на рис. 3.14.

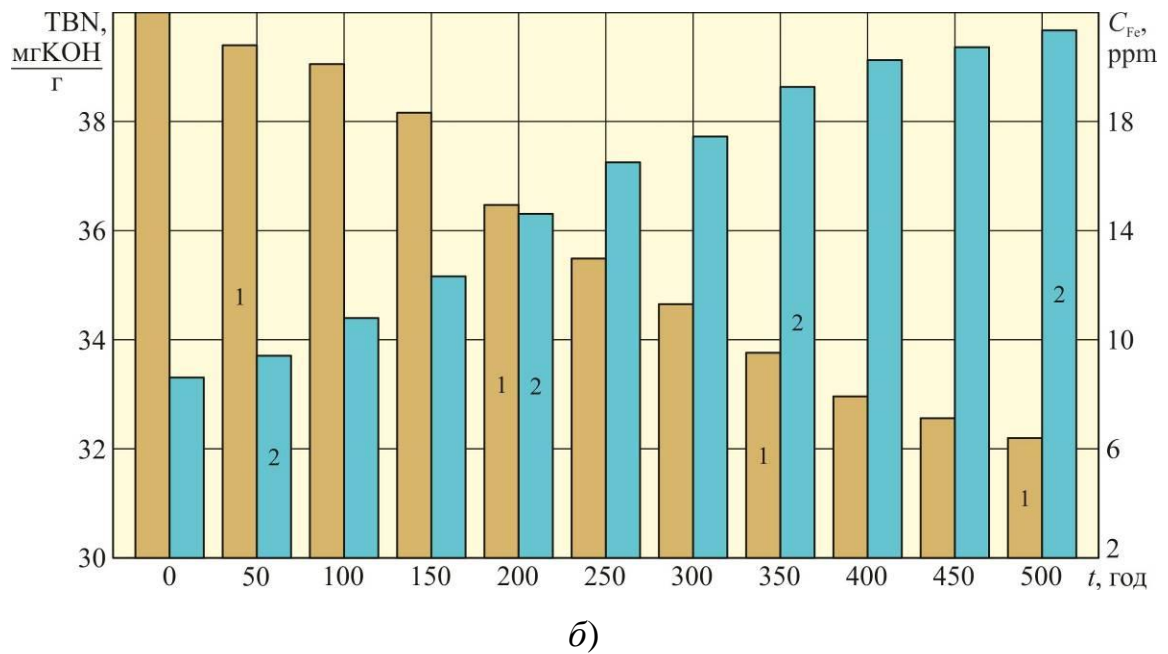
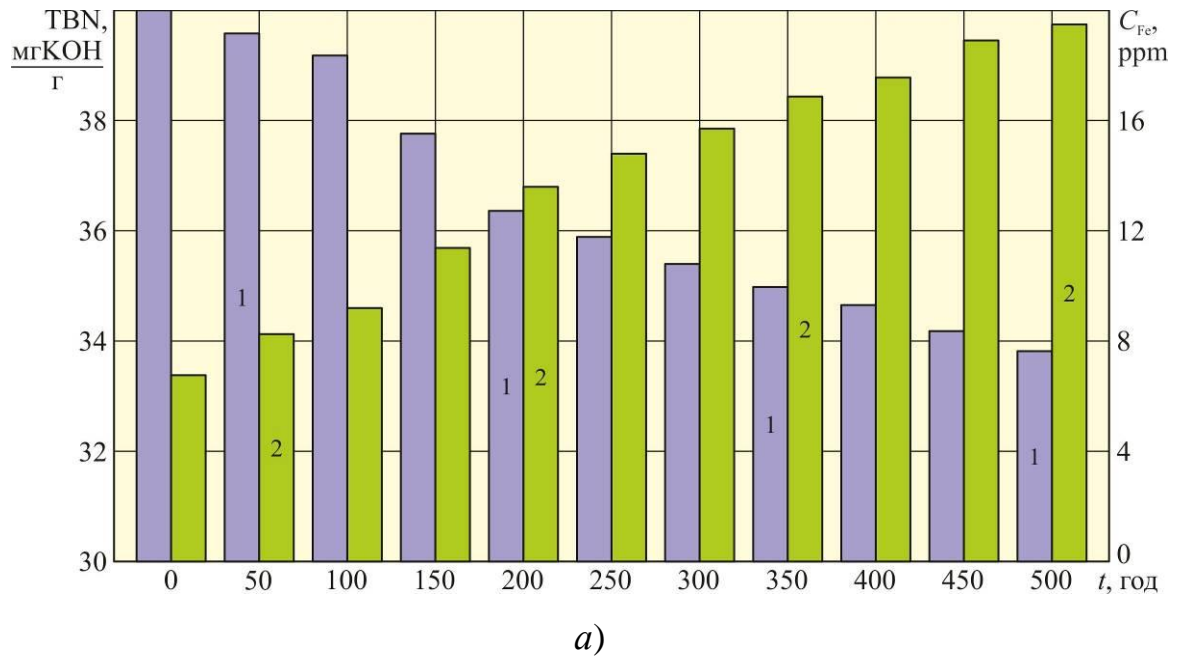


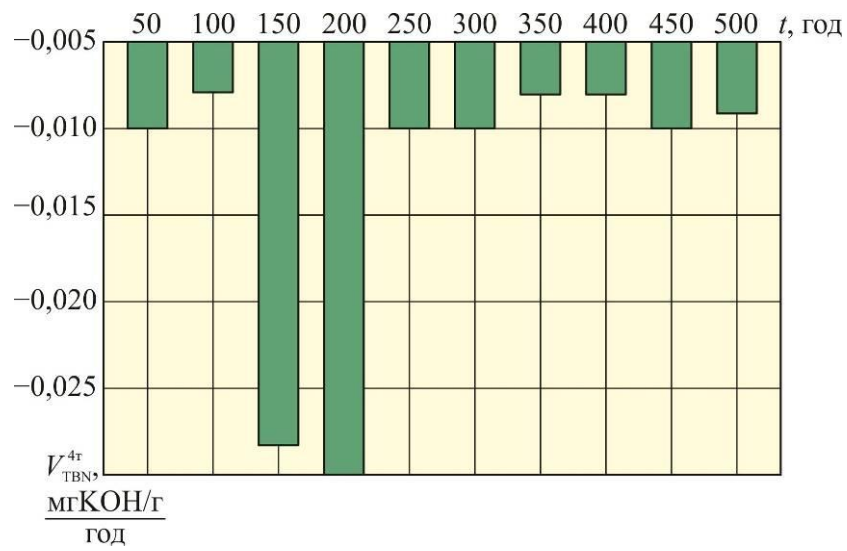
Рис. 3.14. Зміна експлуатаційних показників моторних мастил системи циркуляційного мащення суднових чотиритактних дизелів 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo (a) та 5H17/28 Hyundai Heavy Industries (б): 1 – загальне лужне число; 2 – вміст домішок заліза

Таблиця 3.12

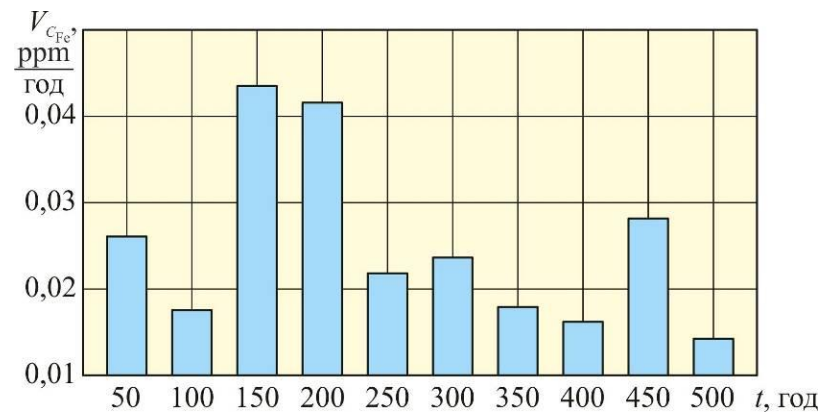
Результати розрахунків з визначення швидкості зміни загального лужного числа  $V_{\text{TBN}}^{4\text{r}}$ , градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{r}}$  та швидкості зміни вмісту домішок заліза в мастилі  $V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$  щодо системи циліндрового мащення судових двотактних дизелів 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo та 5H17/28 Hyundai Heavy Industries

Час, год	6L27/38 MAN-Diesel&Turbo, моторне мастило Mobilgard SHC			5H17/28 Hyundai Heavy Industries, моторне мастило Shell Argina X 40		
	$V_{\text{TBN}}^{4\text{r}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{r}}$	$V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$	$V_{\text{TBN}}^{4\text{r}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{r}}$	$V_{\text{C}_{\text{Fe}}}$
50	-0,01	-0,01	0,026	-0,012	-0,012	0,026
100	-0,006	-0,006	0,018	-0,008	-0,008	0,018
150	-0,028	-0,028	0,044	-0,018	-0,018	0,036
200	-0,03	-0,03	0,042	-0,032	-0,032	0,046
250	-0,01	-0,01	0,022	-0,02	-0,02	0,032
300	-0,01	-0,01	0,024	-0,016	-0,016	0,028
350	-0,006	-0,006	0,018	-0,018	-0,018	0,028
400	-0,006	-0,006	0,024	-0,016	-0,016	0,022
450	-0,01	-0,01	0,02	-0,008	-0,008	0,014
500	-0,008	-0,008	0,014	-0,006	-0,006	0,012

Візуалізація даних, що наведені в таблиці 3.12, подана у вигляді діаграм на рис. 3.15-3.16.



а)

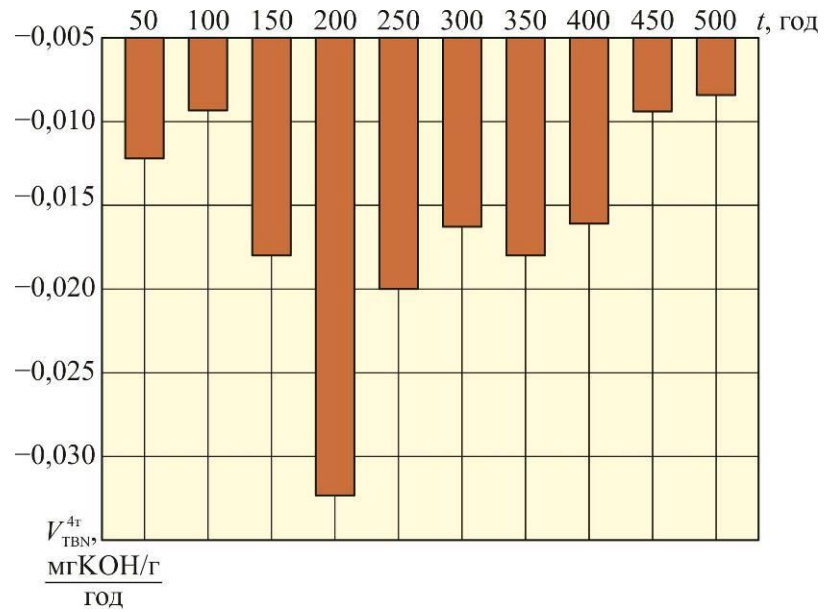


б)

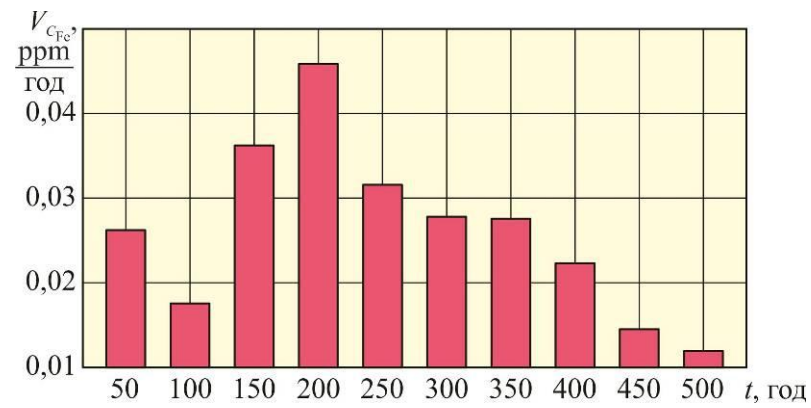
Рис. 3.15. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Mobilgard SHC у системі циліндрового мащення дизеля 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo:

*a* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа;

*b* – швидкість зміни вмісту домішок заліза



а)



б)

Рис. 3.16. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Shell Argina X 40 у системі циркуляційного мащення дизеля 5Н17/28 Hyundai Heavy Industries:

*a* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа;

*в* – швидкість зміни вмісту домішок заліза

### 3.5. Висновки за розділом 3

Як результат досліджень, що виконані в розділі 3, визначимо наступне.

1. Загальне лужне число моторного мастила та значення концентрації металевих домішок у моторному мастилі, як найбільш визнані показники моторного мастила, за якими здійснюється оцінка його функціональності, характеризують поточний стан процесу мащення контактних вузлів судового дизеля та не надають оцінки його комплексному перебігу. Для виконання такої оцінки найбільш доцільним є визначення швидкості зміни цих показників, а також градієнту швидкості зміни загального лужного числа.

2. Швидкість зміни загального лужного числа моторного мастила характеризується негативними значеннями для всіх режимів та інтервалів експлуатації дизелів. Збільшення швидкості зміни загального лужного числа свідчить про виникнення додаткових процесів та явищ, що призвели до підвищення кислотного середовища в циліндрі дизеля та, відповідно, до зменшення загального лужного числа моторного мастила на певних проміжках часу.

3. Для систем циліндрового мащення поточне та попереднє зменшення загального лужного числа під час експлуатації характеризується коливальним характером. Через це коливальним характером характеризується також швидкість зміни загального лужного числа. Поточне значення цієї величини порівняно з попереднім може змінюватися або в бік зменшення, або в бік збільшення за певний проміжок часу. Це дає підставу для оцінки процесу мащення ввести додаткове поняття «градієнт швидкості зміни загального лужного числа». Позитивні значення цієї величини відповідають уповільненню зменшення загального лужного числа (та, відповідно, зменшенню окислювальних процесів в циліндрі дизеля та покращення перебігу процесу мащення), негативні – прискоренню

зменшення загального лужного числа (та, відповідно, погіршенню перебігу процесу мащення). Саме «градієнт швидкості зміни загального лужного числа» є показником, що може бути прийнятий як якісний критерій моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів.

4. Через збіг динаміки зміни вмісту в мастилi компонентів, що характеризують знос його трибосполучень, а також потрапляння до мастила забруднюючих речовин, з градієнтом швидкості зміни загального лужного числа мастила саме градієнт швидкості зміни загального лужного числа рекомендується як параметр, за яким ціліподібно виконувати експрес-діагностику технічного стану трибосполучень дизелів суден морського транспорту. До таких трибосполучень перш за все відносяться поршневі кільця та втулка циліндра, а також вкладиш підшипника та колінчатий вал. Збільшення градієнту швидкості зміни загального лужного відповідає збільшенню концентрації в мастилi компонентів, що характеризують знос саме цих елементів дизеля.

5. Швидкість зміни вмісту металевих домішок у моторному мастилi може приймати як позитивні, так і негативні значення. Позитивні значення відповідають режимам тертя, у результаті яких збільшується знос контактних поверхонь (циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників) що відбивається в підвищенні кількості металевих домішок у пробах моторного мастила та призводить до зменшення ресурсу судового дизеля. Негативні значення свідчать про зменшення металевих домішок у моторному мастилi порівняно з попереднім вимірюванням та характеризують зменшення зносу контактних поверхонь за цей період. Саме «швидкість зміни вмісту металевих домішок у моторному мастилi» є показником, що може бути прийнятий як кількісний критерій моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів.

#### РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЗМІНИ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА РІЗНИХ УМОВ ЇХНЬОЇ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Ресурсозберігаюча технологія експлуатації дизелів суден морського транспорту визначається багатьма факторами, одним з найбільш важливих є своєчасна подача до трибосполучень моторного мастила з відповідними характеристиками, завдяки якій забезпечується гідродинамічний режим мащення його контактних поверхонь.

Перебіг процесу мащення впливає не лише на технічний стан контактних поверхонь (дзеркала циліндрової втулки, поршневих кілець, вкладишів підшипників), але також з часом на показники робочого процесу дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Збільшення зносу циліндрових втулок та поршневих кілець призводить до поступового зменшення їхньої компресійної дії та виникнення додаткових витоків повітря під час процесу стиснення. Це стає підставою багатьох негативних явищ: зниження тиску наприкінці процесу стиснення; зменшення стехіометричного відношення повітря-паливо; виток продуктів згоряння з циліндра під час їх розширення. Результатом цього стає зниження стійкості самозаймання палива, що впорскується в циліндр; погіршення процесу сумішоутворення, уповільнення швидкості згоряння та пов'язані з цим зсув згоряння на лінію розширення та збільшення температури газів під час їхнього випуску з циліндра; збільшення питомої витрати палива.

Для судових дизелів, що тривалий час знаходяться в експлуатації під час автономного плавання суден морського транспорту, на процес мащення також впливають зовнішні показники, що прямо не пов'язані з його забезпеченням. Перш за все до них відносяться режими охолодження дизеля та характеристики палива, що використовується для отримання корисної роботи та ефективної потужності [146, 147].

#### 4.1. Аналіз зміни технічного стану моторного мастила під час його експлуатації в системах мащення суднових дизелів

Під час вивчення поведінки моторного мастила в умовах експлуатації часто виникає необхідність опису її технічного стану. Це дозволяє, з певними припущеннями, у загальному вигляді уявити процес зниження експлуатаційних характеристик та функціональних властивостей мастила, а за необхідності детальніше інтерпретувати й докладніше проаналізувати окремі складові стадії або етапи результуючого процесу, що становлять найбільший інтерес.

Візуальний аналіз великої кількості експериментальних даних показує, що зміна загального стану моторного мастила (зміна експлуатаційних або технічних характеристик) у часі можна апроксимувати S-подібною або близькою до неї на вигляд кривою. У загальному випадку S-подібна крива характеризує стабілізацію процесів, що перебігають з моторним мастилом. Це пояснюється тим, що до певного моменту часу в мастилі пройшли всі можливі перетворення, тобто інгредієнти, схильні до температурних або силових трансформацій, змінили початковий стан. Перетворення, що описуються S-подібною кривою, характерні для окислення, а також для утворення відкладень за високої та низької температур – високотемпературних відкладень (ВТВ) та низькотемпературних відкладень (НТВ) [148, 149].

Інтерпретація зміни стану у вигляді кривої насичення відноситься як до фізико-хімічної суті процесів, що перебігають у системі мащення, також і до способу контролю (статистичного збору) експериментальних даних. У першому випадку, як зазначалося, процес обмежується вмістом в олії відповідних інгредієнтів. У другому – спосіб оцінки лімітований будь-якою граничною величиною, наприклад (щодо проведеного дослідження) мінімально допустимим значенням загального лужного числа мастила TBN і

максимально допустимим значенням концентрації механічних домішок у мастилі  $C_{Fe}$ .

Формування загальних уявлень щодо характеру зміни стану мастила має певні переваги, оскільки на їх основі (керуючись принципом тотожності або системою аналогії) можна виробити відповідні підходи до аналізу ВТВ, НТВ, ТВН,  $C_{Fe}$  та інших проявів, що негативно впливають на надійність двигуна.

Під час розробки відповідних прийомів аналізу стану моторних мастил можливі два принципово різні підходи, а саме: від загального до приватного (дедуктивний метод) та від приватного до загального (індуктивний метод). Як той, так і інший мають свої переваги та недоліки. Застосовність та ефективність використання кожного з них залежить від можливості дослідника та рівня теоретичного опрацювання розглянутого питання.

У разі абстрагування з різних причин від зайвої деталізації користуються дедуктивним методом. Висновки такого підходу легше адаптувати до розв'язання конкретних завдань, пов'язаних зі зміною стану мастил на практиці, зокрема, з їх граничною працездатністю, а також з конкретною технічною характеристикою, такими як утворення ВТВ, НТВ, знос деталей ДВЗ та інші.

Загальний стан моторного мастила в процесі його роботи в ДВЗ можна описати, виходячи з термодинамічних та кінетичних принципів, а також емпіричним шляхом. Що стосується термодинамічного підходу використовується принцип самоорганізації складних систем. Застосування принципу самоорганізації можливе виключно термодинамічно відкритим нелінійним і закритичним системам. Термодинамічна відкритість визначається можливістю обміну потоками енергії та речовини з навколишнім середовищем; нелінійність виявляється в непропорційності результатів реакції (наслідків) від ступеня зовнішніх впливів, а закритичність – у переході від хаосу до порядку (упорядкованості) лише за так званою закритичною точкою (точкою біфуркації), розташованою далеко від термодинамічної рівноваги [150, 151].

У загальному випадку теорія самоорганізації визначає виникнення та розвиток різних (дисипативних) структур, і навіть формування порядку в системі через флуктуації.

Моторні мастила відносяться до складних колоїдних систем, і на них повною мірою поширюються зазначені вище умови. На практиці розрізняють три основні типи дисперсних структур (за П.А. Ребіндером), а саме: коагуляційні, конденсаційно-кристалізаційні та перехідні, близькі, по суті, до ліофільних. З іншого боку, у реальних фізичних системах існують просторові та часові структури. Останні розглядаються як спосіб організації елементів та визначають характер зв'язку між ними. У рамках нерівноважної хімічної термодинаміки просторові, тимчасові та просторово-часові структури, що виникають у нелінійній області далеко від термодинамічної рівноваги, запропоновано називати дисипативними структурами, що характеризуються розсіюванням енергії та переходом з однієї форми в іншу. Виходячи з цього, зміну стану моторного мастила з напрацюванням слід розглядати як перехід однієї структури до іншої. У цьому систему у випадку можна характеризувати як таку, що виробляє ентропію. Змінюючись, система до певного часу приходить до сталого стаціонарного стану, який з термодинамічної точки зору визначається як поточна рівновага, що характеризується кінцевим виробництвом ентропії, а саме  $d_i S > 0$ .

Можна припустити, що переходячи в стійкий стаціонарний стан під час досягнення поточної рівноваги, мастило практично втрачає свою функціональну значимість. У свою чергу під час поточної рівноваги швидкість зміни ентропії досягає максимального значення. Загальну зміну стану мастила в часі можна характеризувати виробництвом ентропії  $S$ , яке визначається співвідношенням:

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = -\frac{VA}{T};$$

де  $V$  – швидкість хімічної реакції;

$A$  – спорідненість хімічної реакції;

$T$  – температура.

У свою чергу швидкість хімічної реакції  $V$  пов'язана зі ступенем її розвитку або з повнотою хімічної реакції  $\xi$  співвідношенням:

$$V \approx \frac{\partial \xi}{\partial \tau};$$

значення  $\xi$  змінюються від 0 до 1. Можна припустити, що  $\xi=0$  відповідає вихідному стану масел, а  $\xi=1$  – стану, на момент реалізації якого в мастилi пройшли всі можливі перетворення [152].

Оскільки більшість процесів, що перебігають у будь-якій системі, описуються переважно  $S$ -подібною кривою, без істотної помилки можна припустити аналогічний характер зміни стану мастила від часу.

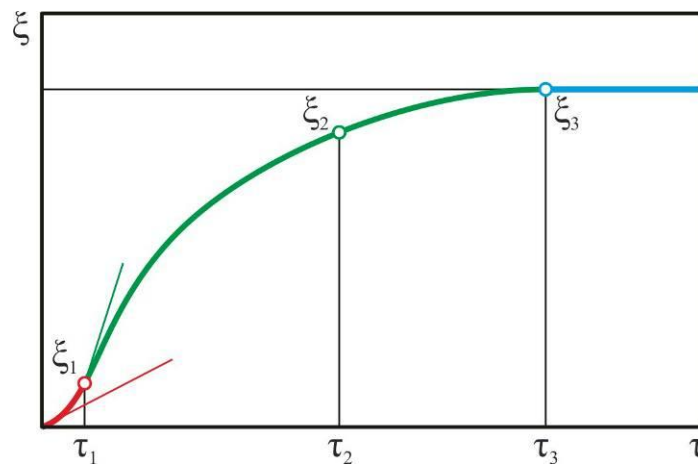


Рис. 4.1. Загальний характер зміни повноти перетворень мастила від часу

На наведеній кривій принципово слід виділити три типові або характерні значення  $\xi$  –  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ . Точка  $\xi_1$  характеризує початок активної зміни стану мастил в результаті розвитку термохімічних процесів, що перебігають у ньому. Точка  $\xi_2$  відповідає початку зниження швидкості термохімічних перетворень в мастилi, яке інтерпретується зміною тангенсу кута нахилу дотичної до кривої. Точка  $\xi_3$  визначає практичне припинення всіх хімічних перетворень у маслах та вихід на теоретично стабільний стан.

Зміну стану моторного мастила з напрацюванням слід розглядати як перехід однієї структури до іншої. У цьому зміну стану системи у випадку можна пов'язати з виробництвом ентропії. Змінюючись, система до певного часу, як зазначалося вище, приходить до порівняно стійкого стаціонарного стану.

Якщо припустити, що стосовно мастила реалізуються два узагальнених процеси, тоді в термодинамічній інтерпретації швидкість зміни ентропії ( $d_i S/d\tau$ ) виражається рівнянням:

$$\frac{d_i S}{d\tau} = \frac{A_1}{T} \cdot \frac{d\xi_1}{d\tau} + \frac{A_2}{T} \cdot \frac{d\xi_2}{d\tau},$$

де  $A_1, A_2$  – спорідненість першого та другого процесу;

$\xi_1, \xi_2$  – ступінь завершеності першого та другого процесу;

$T$  – температура.

У загальному випадку в поданому вигляді перший доданок характеризує ступінь і глибину термоокислювальних і термoxімічних перетворень мастила, а друге – ступінь зміни колоїдного стану системи у вигляді зміни межі розділу фаз дисперсна фаза – дисперсійне середовище. Зміна межі розділу відбувається внаслідок накопичення дисперсної фази зміною величини межі розділу фаз обсягом мастила. При цьому швидкість появи дисперсної фази в обсязі  $V_{\text{дф}}$  визначається двома доданками, а саме формуванням дисперсної фази власне в об'ємі мастила  $V_{\text{м}}$  і дисперсної фази, що надходить в мастило ззовні – з навколишнього середовища або системи  $V_{\text{oc}}$ , тоді:

$$V_{\text{дф}} = V_{\text{м}} + V_{\text{oc}}.$$

У свою чергу рівняння, що характеризує швидкість зміни ентропії, згідно з принципом Де Донде можна привести до вигляду:

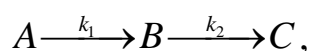
$$\frac{dS}{d\tau} = I_1 X_1 + I_2 X_2;$$

де  $I_1, I_2$  – потік (швидкість) перенесення першої чи другої субстанції;

$X_1, X_2$  – термодинамічна рушійна сила, що зумовлює появу відповідних потоків.

За необхідності кожен складову можна належним чином деталізувати, тобто «розгорнути» з урахуванням її характеристик, властивостей, впливу на технічний стан моторного мастила. Адаптуючи це рівняння стосовно мастила, сили можна інтерпретувати як енергетичне навантаження (напруженість) на мастило, що призводить до відповідних перетворень, а потік – як швидкість перебігу тих чи інших перетворень інгредієнтів мастила.

Кінетичний підхід інтерпретує зміну стану працюючого мастила у вигляді схеми:



де  $k_1, k_2$  – узагальнена питома швидкість первинних і вторинних процесів, які перебігають у мастилі;

$A$  – характеристика вихідного стану мастила;

$B$  – стан мастила після завершення первинних взаємодій;

$C$  – стан мастила після вторинних взаємодій [153].

Кінетичний підхід у випадку передбачає послідовний перехід від одного стану до іншого. Накопичення в працюючому мастилі продуктів глибших – вторинних перетворень (позначаються, як  $y$ ), з принципів формальної хімічної кінетики, описується рівнянням:

$$y = a \left( 1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{k_1 \tau} + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_1 \tau} \right),$$

де  $a \sim A$ ,

$\tau$  – час.

Графічний вигляд цього рівняння ілюструє (рис. 4.2). У цьому випадку величина « $a$ » характеризує якість моторного мастила, у тому числі у вигляді вмісту в мастилі функціональних присадок, що спрацьовують у часі.

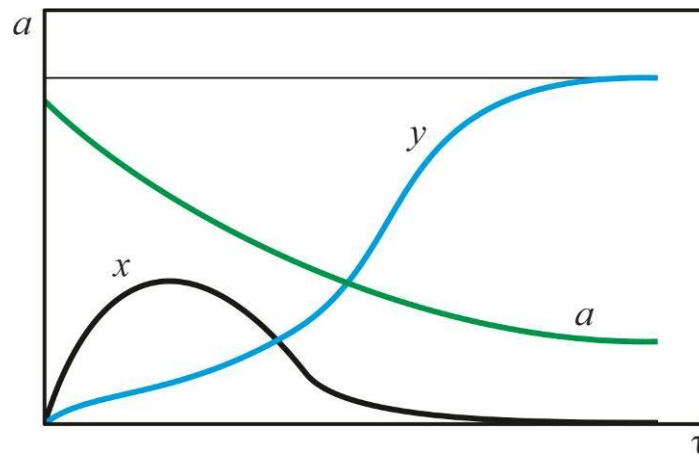


Рис. 4.2. Зміна стану моторного мастила, описане з позицій хімічної кінетики

Розмір «у» характеризує накопичення в мастилі вторинних продуктів перетворення. У свою чергу, величина «х» ілюструє утворення первинних продуктів перетворення, що згодом трансформуються в «у». Накопичення первинних продуктів в часі має екстремальний характер. Надалі, після досягнення екстремуму, спостерігається різке зниження якості мастила. Аналіз зазначеної кінетичної залежності свідчить про наявність стану, при якому  $A$  та  $B$  змінюються з постійною швидкістю. Зазначене співвідношення відповідає так званій перехідній рівновазі, після чого настає активний розвиток негативних процесів ( $k_2 \gg k_1$ ) і мастило швидко втрачає свої функціональні здібності, а загальна зміна стану мастила визначається рівнянням:

$$y = a(1 - e^{-k_1\tau}),$$

При кінетичному підході критичний стан олії лежить в області екстремуму та перехідної рівноваги, а швидкість досягнення критичного стану визначається співвідношеннями між  $k_1$  та  $k_2$ . Наведена залежність свідчить також про те, що зміну стану моторного мастила з напрацюванням досить надійно можна контролювати за результатом розвитку первинних процесів і, зокрема, за кислотним чи загальним лужним числом, а також за кількістю розчинених і нерозчинених домішок в мастилі [154, 155].

Емпіричний підхід базується на описі зміни стану працюючого мастила в часі типової S-подібної кривої. Як один із варіантів криву такого виду можна інтерпретувати запізнювальною логістичною функцією (рис. 4.3), а саме:

$$y = \frac{K}{1 + be^{-ct}}.$$

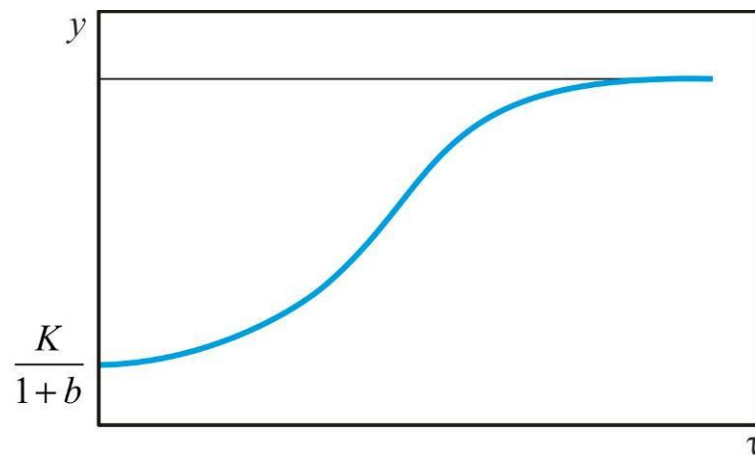


Рис. 4.3. Зміна стану моторного мастила, що описується емпіричним шляхом

У даному випадку  $K$  відповідає якості мастила,  $b$  – стійкості мастила як колоїдної системи,  $c$  – напруженості роботи мастила в двигуні.

Інтенсивна зміна функції починається з моменту, що визначається точкою знаходження максимуму похідної цієї функції від часу, саме співвідношенням  $\ln(b/c)$ . Зі збільшенням значень  $b$  та зменшенням значень  $c$  зазначена точка зміщується в область великих тимчасових значень.

Наведені підходи носять не абстрактний характер, а дозволяють систематизувати прийоми в розв'язанні поставлених завдань, а саме: виділити найбільш продуктивні шляхи постановки та проведення експерименту, оптимізувати способи обробки експериментальних даних та вибрати кращі напрямки дослідження. При цьому для найбільшої ефективності слід оцінювати стан мастила не в загальному вигляді, а залежно від поставленого завдання з акцентом на утворення розчинених і

нерозчинених домішок, зміну загального лужного числа, знос окремих вузлів і деталей двигуна тощо. Крім того, для більшої користі зазначені підходи можна поєднувати між собою, а саме: результати первинних перетворень аналізувати за допомогою одного підходу, тоді як вторинні – за допомогою іншого.

Використання зазначених вище підходів до обробки експериментальних даних дозволяє в результаті не обмежуватися змістовним описом між аргументами, що досліджуються, та функцією, а інтерпретувати цей зв'язок у вигляді стійких математичних залежностей. Останні, на відміну від абстрактної обробки результатів, дають можливість досить надійно прогнозувати зміну стану мастила, визначати його критичні значення й на цій підставі оперативно розв'язувати інші практичні завдання.

Ще раз визначимо, що процес мащення суднових дизелів є одним із основних, які забезпечують його функціонування, а також надійну та безпечну роботу. Порушення процесу мащення (критичне зниження тиску або критичне підвищення температури мастила) може призвести до збільшення температурних та механічних напруг, а також виникненню аварійної ситуації (поломки поршневих кілець, заклинювання поршня в циліндрі, прокручування вкладишів підшипників). При цьому це характерно для будь яких суднових дизелів, головних або допоміжних, крейцкопфних або тронкових. Критичне відхилення показників роботи систем циліндрового або циркуляційного мащення головних крейцкопфних дизелів (наприклад, надмірне зниження тиску мастила, його відсутність, надмірне підвищення температури) призводить до їх аварійної зупинки системою автоматичного регулювання. Аналогічна аварійна зупинка з боку системи автоматичного регулювання здійснюється в разі критичних показників в роботі системи циркуляційного мащення суднових СОД, які виконують функцію головних двигунів та передають потужність гребного гвинту. Зупинка ГД та призупинення передачі механічної енергії до гребного гвинта унеможливорює рух судна та суттєво зменшує його маневрові якості.

#### 4.2. Зміна технічного стану моторного мастила та ресурсних показників судових дизелів за різних термодинамічних умовах їхньої експлуатації

Розвиток двигунів внутрішнього згоряння супроводжують негативні з трибологічної точки зору фактори: підвищений рівень навантаження, збільшення швидкості згоряння та підвищення температури. Найбільший рівень механічних втрат у двигунах внутрішнього згоряння припадає на трибосистему, що включає взаємодію між поршковими кільцями та циліндром. Однією з найбільш завантажених деталей ЦПГ є втулка циліндра дизеля. Як було визначено у розділі 1, втулкам циліндрів дизелів властиві типові дефекти: зноси, натири і задири робочої поверхні, кавітаційно-корозійні руйнування зовнішніх поверхонь, що охолоджуються. Причини й фактори, що викликають перелічені дефекти, а також шляхи підвищення надійності втулок на даний час досить добре вивчені, проте проблема до цього часу повністю не розв'язана, незважаючи на застосування нових матеріалів для втулок, формування оптимальних параметрів макро- і мікроструктури робочої поверхні, розробку і використання спеціальних моторних мастил зі збільшеною температурою згоряння [156-158]. Досвід експлуатації дизелів останнього покоління виявив, що втулки циліндрів перетворилися на одну з головних проблем зниження їхньої надійності через високі швидкості зношування. Фірма MAN-Diesel&Turbo пояснює підвищену швидкість зношування втулок «холодною корозією» через переохолодження робочої поверхні втулок у верхній частині та недостатню здатність мастильної плівки нейтралізувати сірчану кислоту, що утворюється під час згоряння палива. Параметри робочого процесу сучасних потужних судових дизелів досягли на даний час такого рівня, що деталі пари тертя «поршневе кільце-втулка циліндра» за своїми характеристиками вже не можуть відповідати вимогам тривалої стійкості проти зношування. Через це потрібен постійний моніторинг їхнього технічного стану та діагностування їхнього

ресурсу [159, 160]. Одним зі шляхів розв'язання цього завдання є контроль експлуатаційних характеристики моторного мастила, що забезпечує мащення основних контактних вузлів дизеля.

Більш інформативним способом діагностики стану моторного мастила (у порівнянні з визначенням лише загального лужного числа TBN та вмісту заліза Fe) є спектральний аналіз. Він дозволяє визначити вміст у моторному мастилі багатьох компонентів. За допомогою спектрального аналізу визначалася кількість різних хімічних елементів, які потрапляють в мастило внаслідок згоряння палива, зношування деталей дизеля, а також у результаті безпосереднього окислення самого мастила. Частина цих елементів (відповідно до їхньої функціональної дії, а саме – впливу на знос деталей дизеля) відносять до категорії Wear Elements, частину (що впливає на забруднення мастила) – до категорії Contaminant Elements [161].

До елементів, що характеризують знос поверхонь тертя відносяться алюміній Al, хром Cr, мідь Cu, залізо Fe, олово Sn, свинець Pb. Саме ці елементи входять до складу сплавів, що використовуються для надання як твердості, також і податливості поверхонь циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників. Збільшення їхнього вмісту в моторному мастилі свідчить про підвищення зносу та порушення геометрії цих деталей дизеля.

До елементів, що характеризують забруднення моторного мастила відносяться бор B, натрій Na, кремній Si, ванадій V, молібден Mo, нікель Ni. Частина цих елементів може потрапляти в моторне мастило як результат неповного згоряння палива або як продукти нагароутворення, що залишаються на поверхнях випускних клапанів, верхньої частини циліндрової втулки, головки поршня та поршневих кілець. Частина – як складова присадок до палива чи мастила або як складова твердих покриттів, що наносяться на ці поверхні. Основна причина збільшення кількості елементів, що характеризують забруднення моторного мастила, – зменшення компресійної дії поршневих кілець. Це призводить до потрапляння продуктів

згоряння під поршневий простір дизеля (як для двотактних, також і чотиритактних дизелів) та далі в картер дизеля (для чотиритактних).

Процеси мащення та охолодження поверхонь судових дизелів пов'язані між собою. При цьому мащення контактних вузлів дизеля забезпечується безпосереднього його системами мащення, охолодження – системою охолодження прісною водою, та також системою мащення. Система охолодження забезпечує відведення зайвої теплоти від зовнішніх поверхонь, система мащення – від внутрішніх.

Метою цього етапу дослідження було визначення впливу параметрів в системі охолодження судового чотиритактного дизеля на експлуатаційні показники моторного мастила, яке використовується в його системі циркуляційного мащення та комплексне діагностування за цими показниками технічного стану дизеля.

Дослідження виконувались на трьох однотипних судових чотиритактних дизелях 6DK-20e фірми Daihatsu Diesel, що входили до складу допоміжної СЕУ універсального судна водотоннажністю 37200 тонн. Номінальна потужність дизелів 6DK-20e фірми Daihatsu Diesel складала 840 кВт за частотою обертання 720 об/хв. Під час проведення експерименту дизелі експлуатувались з використанням палива RME180 (зі вмістом сірки 0,43 % за масою) та циркуляційного мастила Shell S40 (з загальним лужним числом 20 мгКОН/г).

Відповідно до інструкції з експлуатації, рекомендований температурний діапазон у системі охолодження прісної води складав 65...80 °С. У зв'язку з цим, для досягнення мети дослідження температура в системі охолодження прісної води одного з дизелів (ДД №1) підтримувалась на рівні  $65 \pm 1^\circ\text{C}$ , другого (ДД №2) –  $72 \pm 1^\circ\text{C}$ , третього (ДД №3) –  $80 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Експлуатаційні характеристики моторного мастила Shell S40 визначались шляхом його спектрального аналізу в береговій дослідницькій лабораторії після 500 годин роботи кожного з дизелів. Протягом всього періоду експерименту дизелі експлуатувались однаковий час на однакових навантаженнях. Також через однаковий час виконувалося поповнення об'єму

мастила в картері дизеля. Під час проведення експерименту залежно від кількості та потужності споживачів електричної енергії навантаження на дизелі коливалось у діапазоні 35...75 %, при цьому в експлуатації знаходився або один з дизелів, або два (за умови забезпечення вимог щодо їхньої паралельної роботи). Протягом всього експерименту дизелі експлуатувались рівний час на рівних навантаженнях, що забезпечувалось автоматичним перерозподілом споживачів енергії та переведенням дизелів з режиму stand-by на експлуатаційний та постійним контролем як навантаження на дизелі, також і тривалістю їхньої експлуатації з цим навантаженням [162].

Результати спектрального аналізу моторного мастила Shell S40 після 500 годин та 1000 годин експлуатації в циркуляційній системі мащення судових дизелів 6DK-20e фірми Daihatsu Diesel за різних температурних умов в системі охолодження надані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результати спектрального аналізу моторного мастила Shell S40 за різних умов проведення експерименту

Wear Elements, мг/кг	ДД № 1	ДД № 2	ДД № 3	Contaminant Elements, мг/кг	ДД № 1	ДД № 2	ДД № 3
<b>500 годин експлуатації</b>							
алюміній Al	2	2	2	бор В	13	9	13
хром Cr	1,5	1	1,5	натрій Na	12	7	18
мідь Cu	2	1,5	2,5	кремній Si	9	4	10
залізо Fe	6,5	5,5	8	ванадій V	46	19	53
олово Sn	1	1	1	молібден Mo	4	3	5
свинець Pb	2	2	2	нікель Ni	14	6	17
Загальна кількість	15	13	17	Загальна кількість	98	48	116
<b>10000 годин експлуатації</b>							
алюміній Al	3	2,5	3	бор В	18,5	13,5	22
хром Cr	2,5	2	2,5	натрій Na	16,5	12,5	27,5
мідь Cu	2,5	2	3,5	кремній Si	12	8	18
залізо Fe	10,5	7	14	ванадій V	64,5	27,5	66,5
олово Sn	2	1,5	2	молібден Mo	8	6,5	14,5
свинець Pb	3,5	3	3	нікель Ni	26,5	16	34,5
Загальна кількість	24	18	28	Загальна кількість	146	84	183

За даними таблиці 4.1. побудовані діаграми, що наведені на рис. 4.4, 4.5.

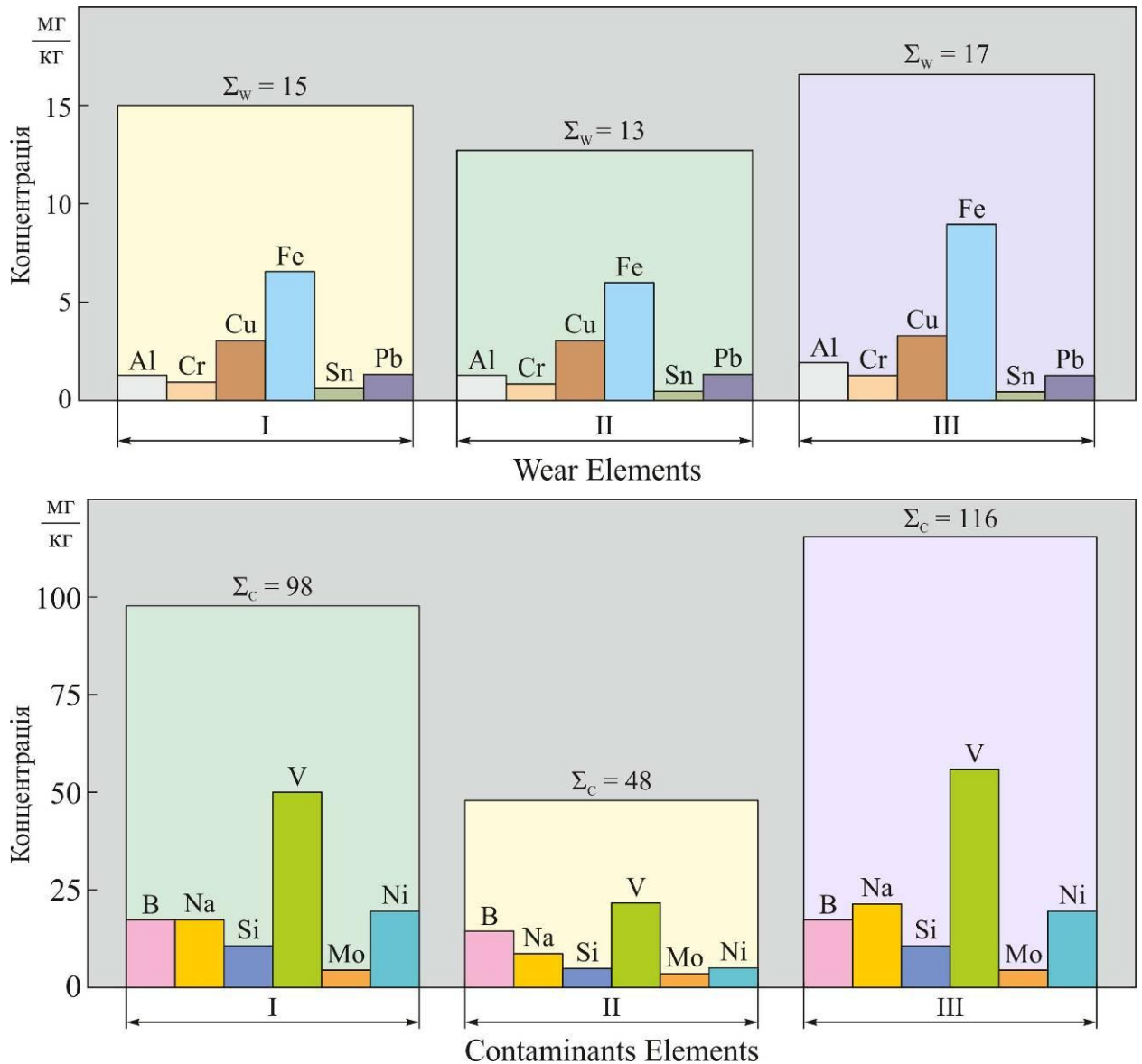


Рис. 4.4. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Shell S40 за різних температурних умов в системі охолодження прісною водою після 500 годин експлуатації:

I – ДД № 1,  $t_{\text{охл}}=65\pm 1^\circ\text{C}$ ; II – ДД № 2,  $t_{\text{охл}}=72\pm 1^\circ\text{C}$ ;

III – ДД № 3,  $t_{\text{охл}}=-80\pm 1^\circ\text{C}$

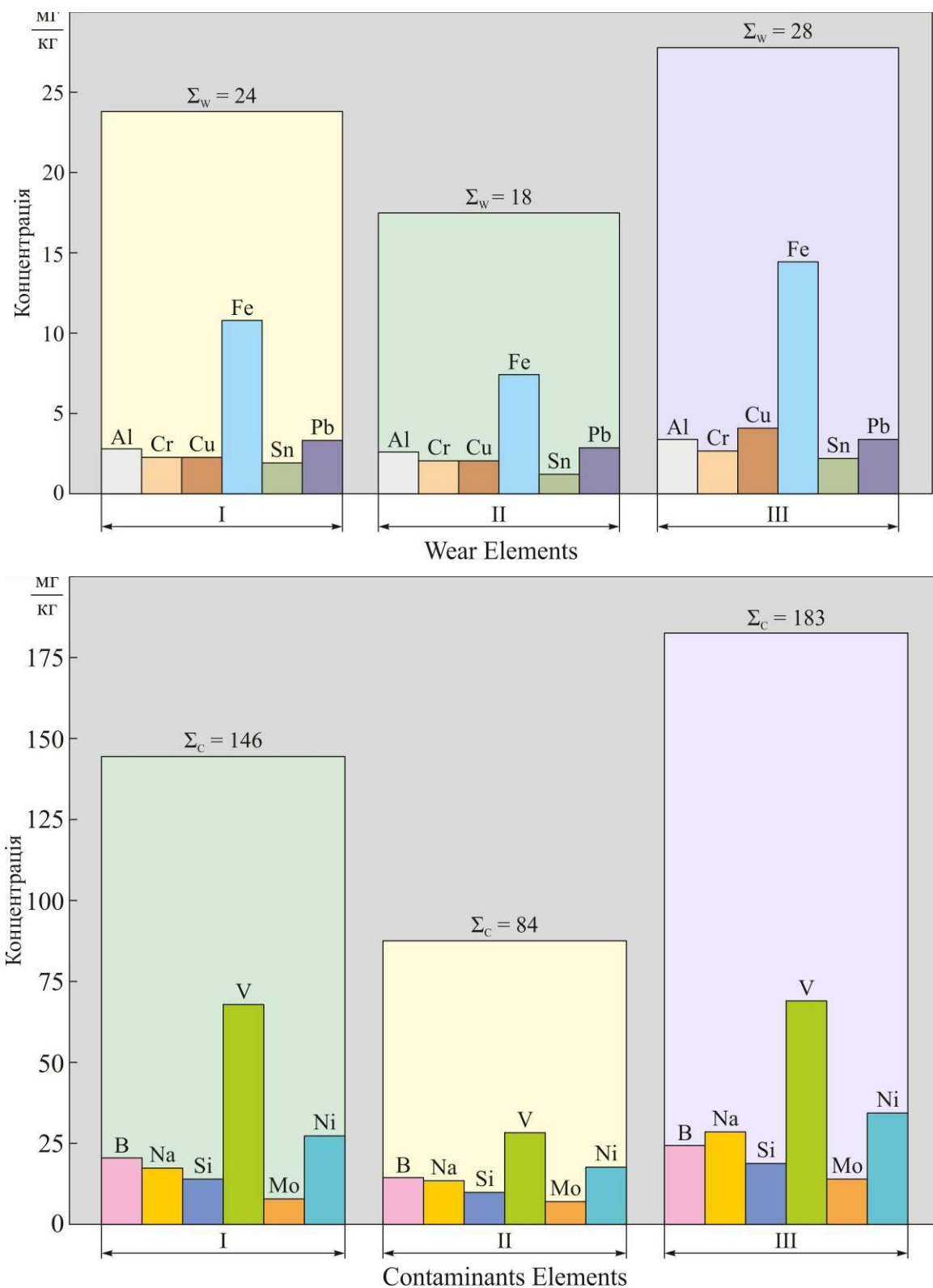


Рис. 4.5. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Shell S40 за різних температурних умов в системі охолодження прісною водою після 1000 годин експлуатації:

I – ДД № 1,  $t_{\text{охл}}=65\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; II – ДД № 2,  $t_{\text{охл}}=72\pm 1^{\circ}\text{C}$ ;

III – ДД № 3,  $t_{\text{охл}}=80\pm 1^{\circ}\text{C}$

Під час експерименту також виконувався постійний моніторинг загального лужного числа моторного мастила. З цією метою з чотирьох різних точок картера кожного з дизелів відбирались проби моторного мастила через кожні 100 годин їхньої експлуатації. Отримані в такий спосіб значення усереднювались.

Під час експлуатації дизелів неминуче відбувається вигар моторного мастила. Перш за все це пов'язано з тим, що система циркуляційного мащення суднових чотиритактних дизелів є загальною та забезпечує подачу моторного мастила як до підшипників руху (головного, мотильового та рамового), так і до циліндрової втулки. Частина моторного мастила, що переміщується поршнем на бік верхньої мертвої точки контактує з полум'ям та гарячими газами, тому згоряє разом з паливом. Також невелика частина моторного мастила вигорає через підвищену температуру в картері та під поршневому просторі дизеля. Наведені факти викликають необхідність періодичного поповнення обсягу моторного мастила в системі циркуляційного мащення. Під час проведення досліджень, поповнення обсягу моторного мастила виконувалась через 500 год експлуатації кожного з дизелів на однакову для всіх дизелів кількість. Також зазначимо, що протягом всього експерименту загальна кількість моторного мастила в системі циркуляційного мащення не була меншою за мінімально допустимий обсяг, що обмежується інструкцією фірми виробника.

Динаміка зміни загального лужного числа моторного мастила Shell S40 під час проведення експерименту наведена в таблиці 4.2. При цьому часовий діапазон 0...500 год відповідає первісному етапу дослідження та починається з повної заміни моторного мастила в системі. Часовий діапазон 500...1000 годин – відповідає другому етапу та починається з поповнення обсягу моторного мастила в системі. Разом зі значеннями загального лужного числа TBN (які визначались шляхом вимірювання) у таблиці 4.2 наведені розрахункові значення швидкості зміни загального лужного  $V_{TBN}$ , які для системи циркуляційного мащення чотиритактного дизелів збігаються зі значенням градієнту зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{TBN}^{4r}$ .

Таблиця 4.2

Зміна експлуатаційних характеристик моторного мастила Shell S40 за різних умов проведення експерименту

Час, години	ДД № 1		ДД № 2		ДД № 3	
	TBN	$V_{TBN}, \vec{V}_{TBN}^{4r}$	TBN	$V_{TBN}, \vec{V}_{TBN}^{4r}$	TBN	$V_{TBN}, \vec{V}_{TBN}^{4r}$
0	20,0	—	20,0	—	20,0	—
100	19,5	-0,005	19,7	-0,003	19,4	-0,006
200	18,5	-0,01	19,0	-0,007	18,2	-0,012
300	17,3	-0,012	18,3	-0,007	17,1	-0,011
400	16,8	-0,005	17,8	-0,005	16,6	-0,005
500	15,8	-0,01	17,1	-0,007	15,5	-0,011
поповнення об'єму моторного мастила у системі циркуляційного мащення						
Час, години	ДД № 1		ДД № 2		ДД № 3	
	TBN	$V_{TBN}, \vec{V}_{TBN}^{4r}$	TBN	$V_{TBN}, \vec{V}_{TBN}^{4r}$	TBN	$V_{TBN}, \vec{V}_{TBN}^{4r}$
500	18,3	—	19,1	—	17,8	—
600	17,7	-0,006	18,7	-0,004	17,1	-0,007
700	17,2	-0,005	18,5	-0,002	16,7	-0,004
800	16,7	-0,005	18,1	-0,004	16,2	-0,005
900	16,4	-0,003	17,8	-0,003	15,8	-0,004
1000	16,0	-0,004	17,5	-0,003	15,4	-0,004

За результатами таблиці 4.2 побудовані діаграми (рис. 4.6), що відображають зміну експлуатаційних показників моторного мастила Shell S40 за різних умов проведення експерименту.

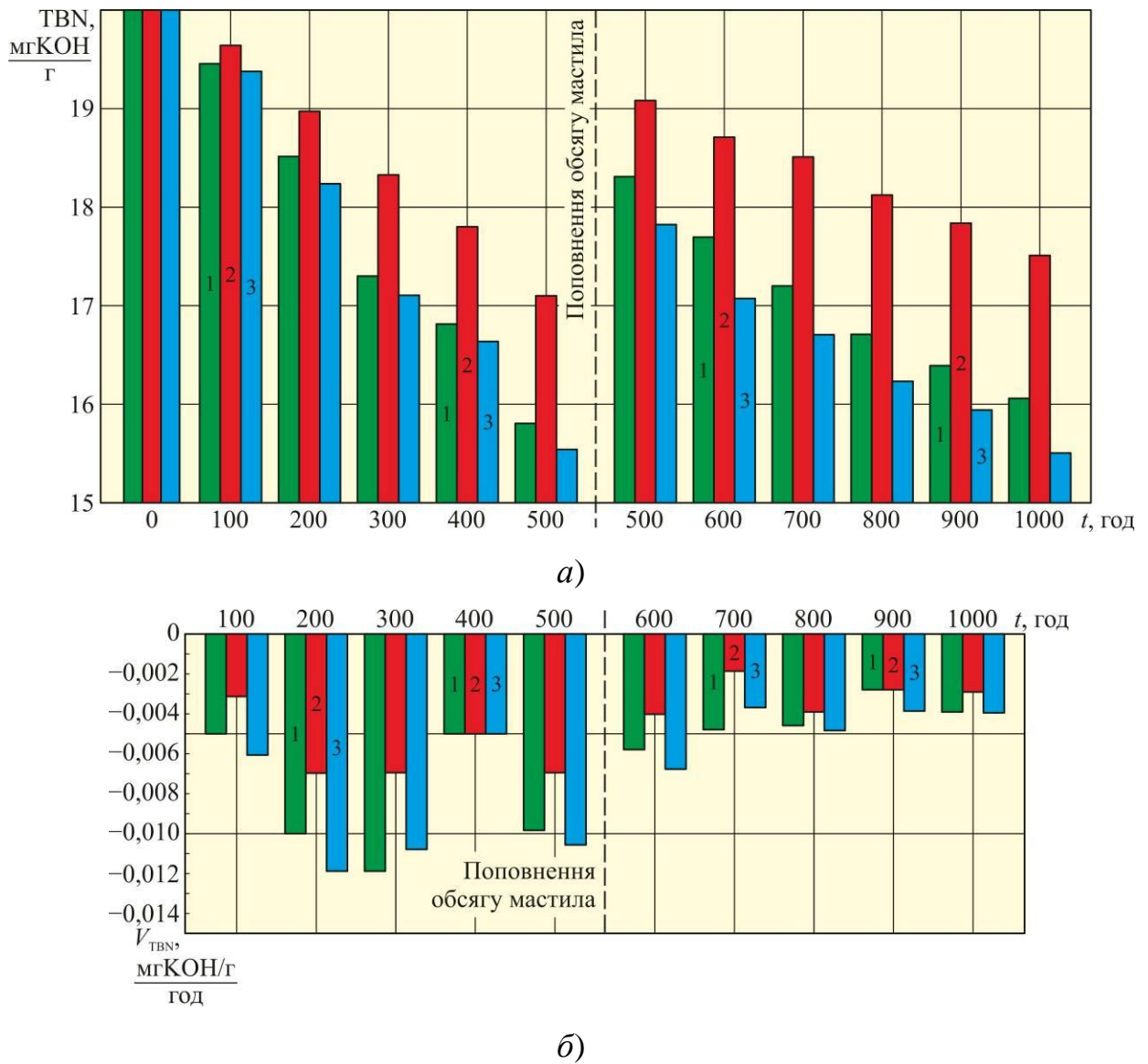


Рис. 4.4. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Shell S40 за різних умов проведення експерименту:

1 – ДД № 1,  $t_{\text{охл}}=65\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; 2 – ДД № 2,  $t_{\text{охл}}=72\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; 3 – ДД № 3,  $t_{\text{охл}}=80\pm 1^{\circ}\text{C}$

*a* – загальне лужне число, *b* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа

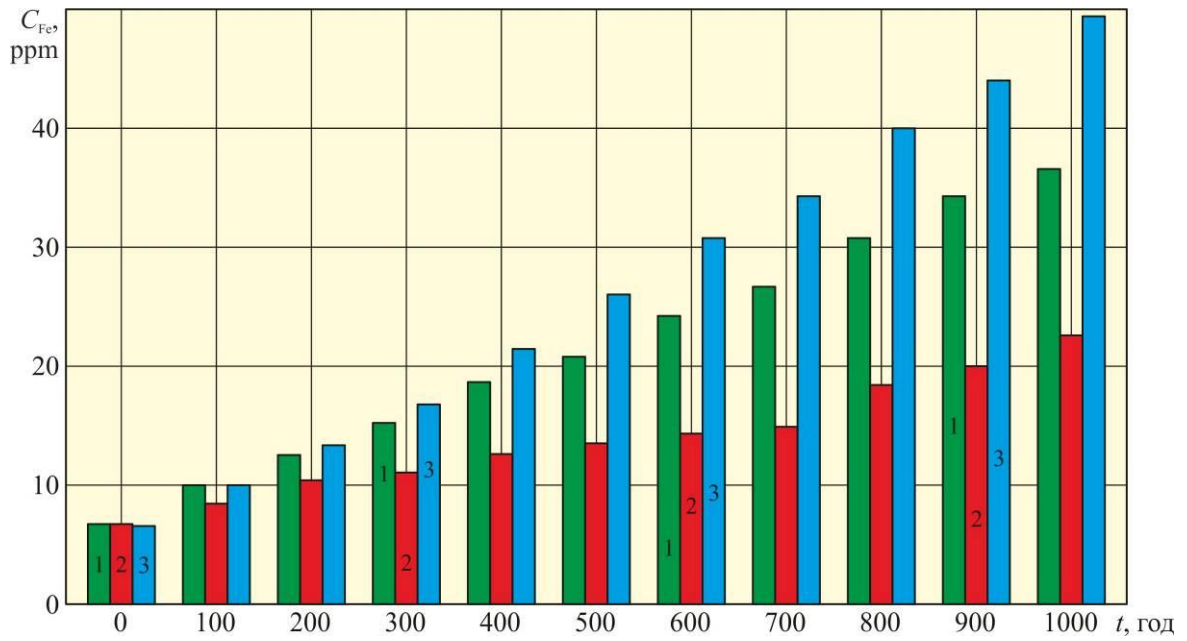
Під час проведення експериментальних досліджень виконувалось визначення вмісту металевих домішок у моторному мастилі та далі розраховувалась швидкість їх потрапляння в моторне мастило. Результати вимірювань та розрахунків надані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

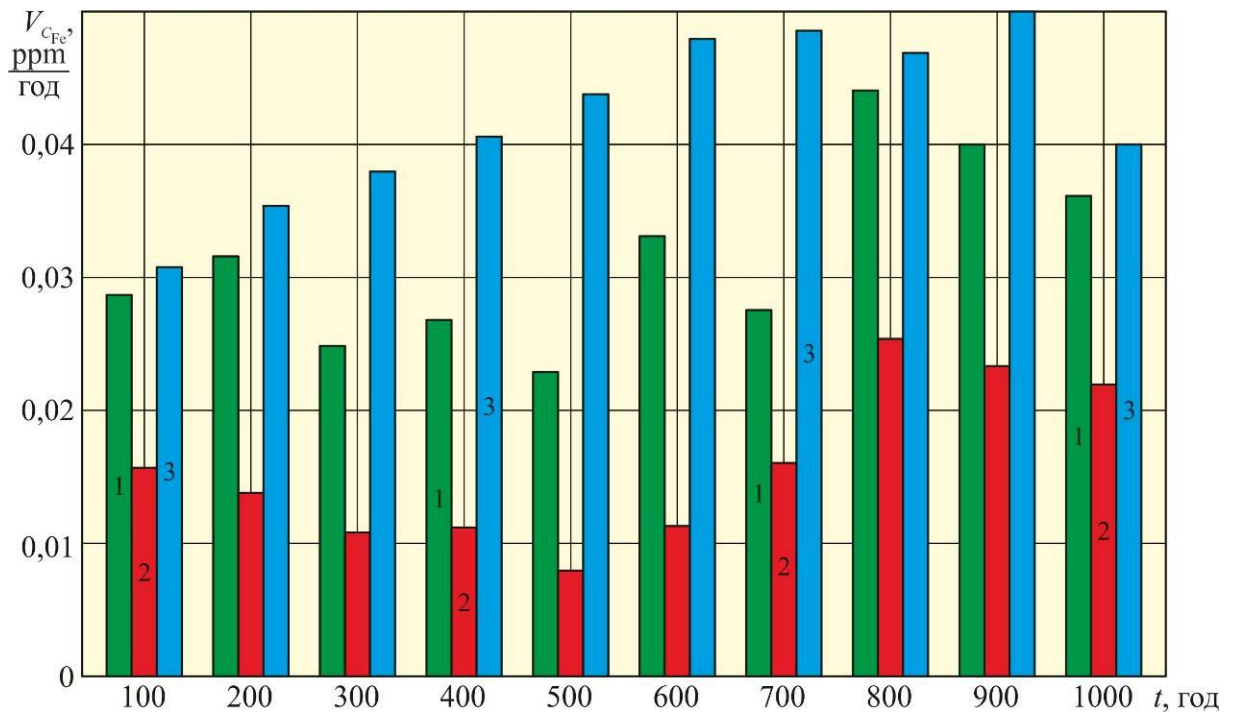
Зміна експлуатаційних характеристик моторного мастила Shell S40 за різних умов проведення експерименту

Час, години	ДД № 1		ДД № 2		ДД № 3	
	$C_{Fe}$	$V_{C_{Fe}}$	$C_{Fe}$	$V_{C_{Fe}}$	$C_{Fe}$	$V_{C_{Fe}}$
0	7,2	—	7,1	—	7	—
100	10,1	0,029	8,7	0,016	10,1	0,031
200	13,3	0,032	10,1	0,014	13,7	0,036
300	15,8	0,025	11,2	0,011	17,5	0,038
400	18,5	0,027	12,3	0,011	21,6	0,041
500	20,8	0,023	13,1	0,008	26	0,044
600	24,1	0,033	14,2	0,011	30,8	0,048
700	26,8	0,027	15,8	0,016	35,6	0,048
800	31,2	0,044	18,1	-0,004	16,2	-0,005
900	35,2	0,04	17,8	-0,003	15,8	-0,004
1000	38,8	0,036	17,5	-0,003	15,4	-0,004

Для кращої візуалізації, результати таблиці 4.2 подані у вигляді діаграм (рис. 4.5).



а)



б)

Рис. 4.4. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Shell S40 та ресурсних показників суднових дизелів 6DK-20e фірми Daihatsu Diesel за різних умов проведення експерименту:

1 – ДД № 1,  $t_{\text{охл}}=65\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; 2 – ДД № 2,  $t_{\text{охл}}=72\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; 3 – ДД № 3,  $t_{\text{охл}}=80\pm 1^{\circ}\text{C}$

а – вміст металевих домішок, б – швидкість потрапляння металевих домішок у моторне мастило

Технічний стан судового дизеля діагностувався за динамікою зміни значення тиску в циліндрі наприкінці процесу стиснення  $p_c$ . Цей показник характеризує перебіг процесу стиснення та якість компресійної дії поршневих кілець. Його максимальні значення відповідають умовам, за якими під час процесу стиснення з об'єму циліндра не здійснюється жодних витоків суміші свіжого повітря (що потрапило в циліндр під час процесу наповнення) та залишкових газів (які не вдалося видалити з циліндра під час процесу продувки). Відхилення тиску стиснення від максимально можливого значення є підставою діагностувати відхилення в роботі випускного клапану (що відбувається рідше) або збільшення радіального зазору між поверхнями циліндрової втулки та поршневих кілець (як найбільш вірогідної причини). Через це разом з контролем температурних напружень на дизель та аналізом моторного мастила системи циркуляційного мащення під час дослідження виконувався моніторинг тиску наприкінці стиснення. Особливістю вибору тиску стиснення як критерію діагностики є те, що його значення не залежить від характеристик процесу подачі палива та технічного стану паливної апаратури високого тиску. Єдиний показник, що характеризує технічний стан судового дизеля та через це впливає на зміну тиску наприкінці стиснення, є стан його трибологічної системи циліндрова втулка – поршневе кільце. Визначимо також, протягом всього експерименту контролювались та підтримувались у необхідному діапазоні всі інші показники, що характеризують роботу дизеля: тиск наприкінці згоряння, середній індикаторний тиск, температура випускних газів, температура та вологість повітря, циклова подача та кути подачі палива.

Результати з визначення тиску наприкінці стиснення для різних умов експлуатації судового чотиритактного дизеля 6DK-20e фірми Daihatsu Diesel наведені в таблиці 4.4. Ще раз визначимо, що під час проведення експериментів дизелі експлуатувались на різних, але на рівних за величиною навантаженнях.

Таблиця 4.4

Зміна експлуатаційних характеристик 6DK-20e фірми Daihatsu Diesel за різних умов проведення експерименту

Час, години	ДД № 1		ДД № 2		ДД № 3	
	$p_c$ , МПа	$\Delta p_c$ , %	$p_c$ , МПа	$\Delta p_c$ , %	$p_c$ , МПа	$\Delta p_c$ , %
0	10,30	—	10,30	—	10,30	—
100	10,28	-0,19	10,29	-0,097	10,25	-0,49
200	10,25	-0,49	10,27	-0,29	10,22	-0,78
300	10,18	-1,17	10,25	-0,49	10,15	-1,46
400	10,15	-1,46	10,22	-0,78	10,12	-1,75
500	10,12	-1,75	10,18	-1,17	10,1	-1,94
600	10,06	-2,33	10,16	-1,36	10,03	-2,62
700	10,04	-2,52	10,15	-1,46	10,01	-2,82
800	10,02	-2,72	10,15	-1,46	9,98	-3,11
900	10,00	-2,91	10,12	-1,75	9,96	-3,30
1000	10,00	-2,91	10,12	-1,75	9,95	-3,40

Разом з вимірюванням тиску наприкінці стиснення виконувався розрахунок відносного зменшення цього значення  $\Delta p_c$ , %, порівняно з початковими умовами експлуатації. За таких умов приймався технічний стан дизелів після інспекції його циліндропоршневої групи та встановлення нового комплексу поршневих кілець. Ці умови дозволяли забезпечити гарантовані фірмою-виробником значення тиску наприкінці стиснення.

Визначення  $\Delta p_c$  виконувалось за виразом

$$\Delta p_c = \frac{p_c^t - p_c^0}{p_c^0} \cdot 100\%;$$

де  $p_c^0, p_c^t$  – початковий та поточний тиск наприкінці стиснення, МПа.

За результатами таблиці 4.5 побудовані діаграми – рис. 4.5.

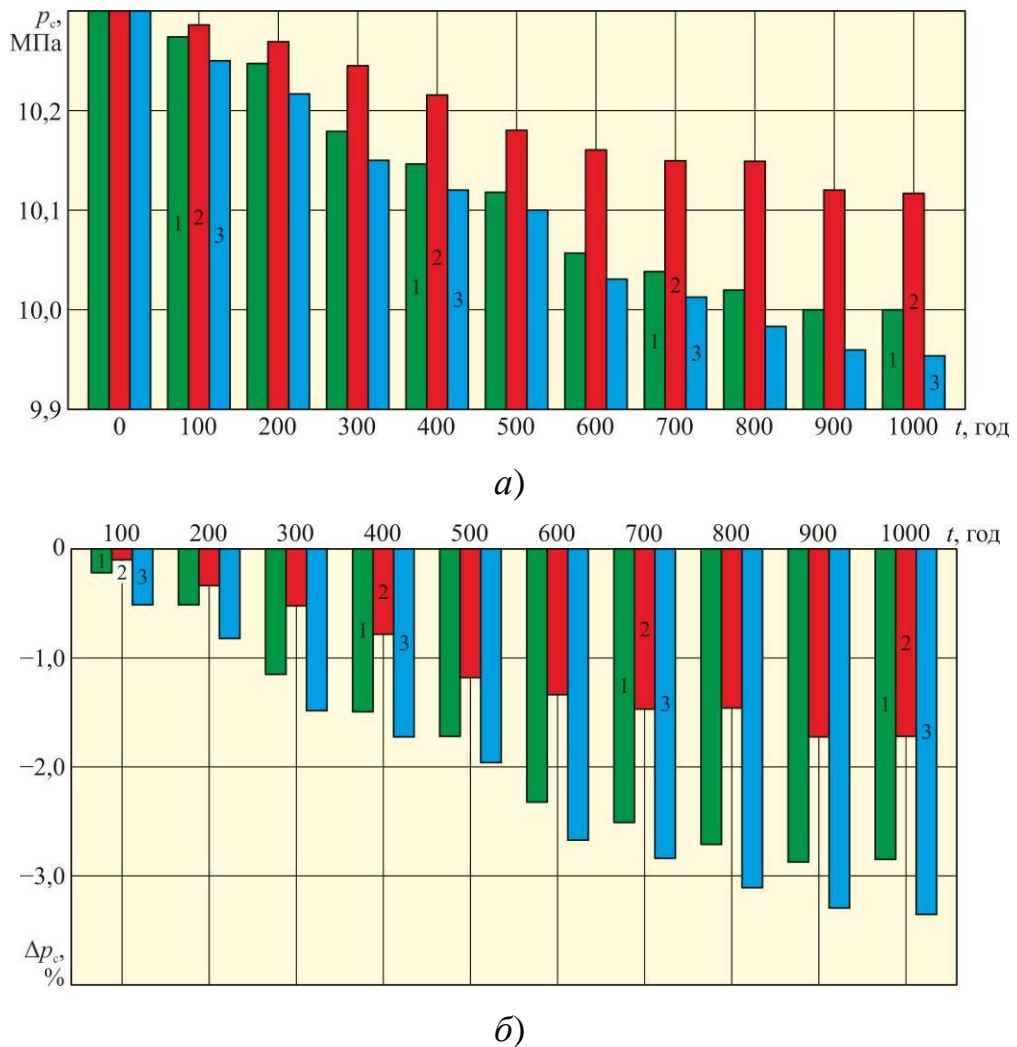


Рис. 4.5. Зміна ресурсних показників судових дизелів 6DK-20e фірми

Daihatsu Diesel за різних умов проведення експерименту:

1 – ДД № 1,  $t_{\text{охл}}=65\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; 2 – ДД № 2,  $t_{\text{охл}}=72\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; 3 – ДД № 3,  $t_{\text{охл}}=80\pm 1^{\circ}\text{C}$

а – вміст металевих домішок, б – швидкість потрапляння металевих домішок у моторне мастило

Наведені результати свідчать, що в рекомендованому діапазоні температур охолоджуючої води існують оптимальні значення, за якими підтримується термодинамічна рівновага в комплексі паливо – продукти згоряння – мастило – деталі дизеля, що сприяє зменшенню зносу циліндрових втулок та поршневих кілець та відображається меншою концентрацією в моторному мастилі елементів, що впливають на знос деталей дизеля та на забруднення мастила.

#### 4.3. Зміна технічного стану моторного мастила та ресурсних показників судових дизелів під час використання палива різного елементарного складу

Ще однією причиною, що впливає на зміну технічного стану дизелів суден морського транспорту є елементарний склад палива, на якому відбувається їхня експлуатація. Горючим елементами палива є вуглець С, водень Н та сірка S – саме вони під час спалювання виділяють теплоту. Прийнято вважати, що основною складовою палива, яка призводить до погіршення технічного стану дизеля, є сірка. Під час її згоряння утворюються сірчані SO<sub>3</sub> та сірчистий SO<sub>2</sub> гази, які в подальшому через контакт з водяною парою перетворюються на сірчану H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> або сірчисту H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> кислоти та оказують руйнівну дію на деталі дизелів. Перш за все до них відносяться верхня частина циліндрової втулки, поршень, поршневі кільця та випускний клапан. При цьому до корозійної дії від сірчаної H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та сірчистої H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> кислот підпадають також деталі руху дизелів, насамперед підшипники ковзання (головний, мотильовий та рамовий). Одночасно з цим негативний внесок на технічний стан поверхонь циліндрової втулки, поршневих кілець та вкладишів підшипників надає такі компоненти палива, як натрій Na, кремній Si та ванадій V – елементи палива, які (як правило) окремо не визначаються в характеристиках палива та відносяться до категорії «домішок». Разом з цим, ці елементи також сприяють підвищенню зносу та пошкодженню контактних поверхонь. Частина цих елементів, яка не згоріла під час згоряння палива у циліндрі дизеля, потрапляє до моторного мастила системи циркуляційного мащення (стосовно судових чотиритактних дизелів) та далі переміщається з його потоком скрізь всі трибологічні з'єднання (поршневі кільця – втулка циліндра, вкладиш підшипника – колінчатий вал) та сприяє збільшенню їхнього абразивного зносу. Крім того потрапляння натрію Na, кремнію Si ванадію V та їхніх оксидів Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O,

$\text{SiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  на поверхню поршня та в поршневі кепи призводить до додаткового забруднення та збільшення температури цих поверхонь. Визначення вмісту цих елементів у складі моторного мастила як правило виконується шляхом спектрального аналізу.

З метою визначення впливу палива різного елементарного складу на утворення в результаті його згоряння речовин, що впливають на забруднення моторного мастила та знос деталей дизеля, а також з можливістю використання запропонованої раніше технологічної схем для діагностування перебігу процесу мащення та технічного стану дизеля, цикл досліджень було продовжено відповідно до послідовності, яка викладена нижче [163, 164].

Дослідження виконувались на двох чотиритактних судових дизелях 6R26 Wartsila, мащення циліндрової групи та колінчатого вала яких забезпечувалось загальною циркуляційною системою, у якій використовувалось моторне мастило Castrol 15W20. Серед основних функціональних характеристик якої визначимо: кінематична в'язкість за  $100^\circ\text{C}$  – 16,4 сСт, Total Base Number – 15,0 мгКОН/г. Паливні системи дизелів дозволяли використовувати в кожній з них окремий від палива. Через це один з дизелів експлуатувався на паливі класу RME180, RME350. Обидва сорти палива дозволені до використання в дизелях 6R26 Wartsila під час знаходження суден поза SECAs. Основні характеристики палив RME180 та RMG380 надані в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Основні характеристики судових палив під час проведення експерименту

Характеристика	RME180	RMG380
В'язкість за $40^\circ\text{C}$ , $\text{мм}^2/\text{м}$ (сСт)	180	380
Густина за $15^\circ\text{C}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	975	991
Вміст алюмінію та кремнію (загальний), мг/кг	50	60
Вміст натрію, мг/кг	50	100
Вміст ванадію, мг/кг	150	350
Температура спалаху, $^\circ\text{C}$	65	70
Вміст сірки, %	0,042	0,048
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	41040	40630

Дослідження складались з двох етапів. Перший виконувався безпосередньо на судні на полягав у визначенні значення ТВN моторного мастила після кожних 100 годин експлуатації дизелів. Тривалість цього етапу складала 1000 годин. Другий етап полягав у надсиланні проб моторного мастила, що були відібрані за 500 годин та 1000 годин до берегової дослідницької лабораторії. У подальшому саме в ній виконувався, спектральний аналіз моторного мастила з метою визначення вмісту металевих та інших домішок. Усі технологічні процедури, що пов'язані з виконанням першого етапу, а також статистична обробка та аналіз отриманих результатів як першого, так і другого етапу, виконувались послідовно та збігалися один з одним.

Спектральний аналіз моторного мастила, що виконується в берегових дослідницьких лабораторіях є обов'язковою технологічною процедурою під час експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту та забезпечує визначення багатьох компонентів, що потрапляють у моторне мастило в результаті згоряння палива та контактних взаємодій трибосполучень дизеля. Недоліком спектрального аналізу є певна затримка в отриманні його результатів, що пов'язана з логістичним ланцюжком судно – дослідницька лабораторія (до якої моторне мастило відправляється з судна на дослідження), певною затримкою в проведенні аналізу в лабораторії (через великий обсяг подібних досліджень) та можливістю порушення зворотного зв'язку між дослідницькою лабораторією та морським судном (що, наприклад, може бути зумовлене особливостями навігаційного переходу). На жаль, це може бути причиною несвоєчасного прийняття рішення з управління режимами мащення судових дизелів та оцінки технічного стану його трибосполучень (перш за все поршневі кільця – втулка циліндра та вкладиші підшипника – колінчатий вал).

Через це, як додаткові критерії, за якими можливе виконувати діагностику технічного стану судових дизелів, розглядалися швидкість зміни загального лужного числа мастила  $V_{\text{TVN}}$  (яка, як вказувалась раніше,

для моторних мастил, що використовуються в системах циркуляційного мащення чотиритактних дизелів) збігається за значенням з градієнтом швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$  та швидкість збільшення вмісту металевих домішок у моторному мастилі, які визначались за запропонованими у п. 3.2 виразами:

$$V_{\text{TBN}}^{4\text{T}} = \vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}} = \frac{\text{TBN}_n - \text{TBN}_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}, \left[ \frac{\text{мгКОН/Г мастила}}{\text{ГОД}} \right];$$

$$V_{C_{\text{Fe}}} = \frac{C_{\text{Fe}_n} - C_{\text{Fe}_{n-1}}}{t_n - t_{n-1}}, \left[ \frac{\text{ppm}}{\text{ГОД}} \right].$$

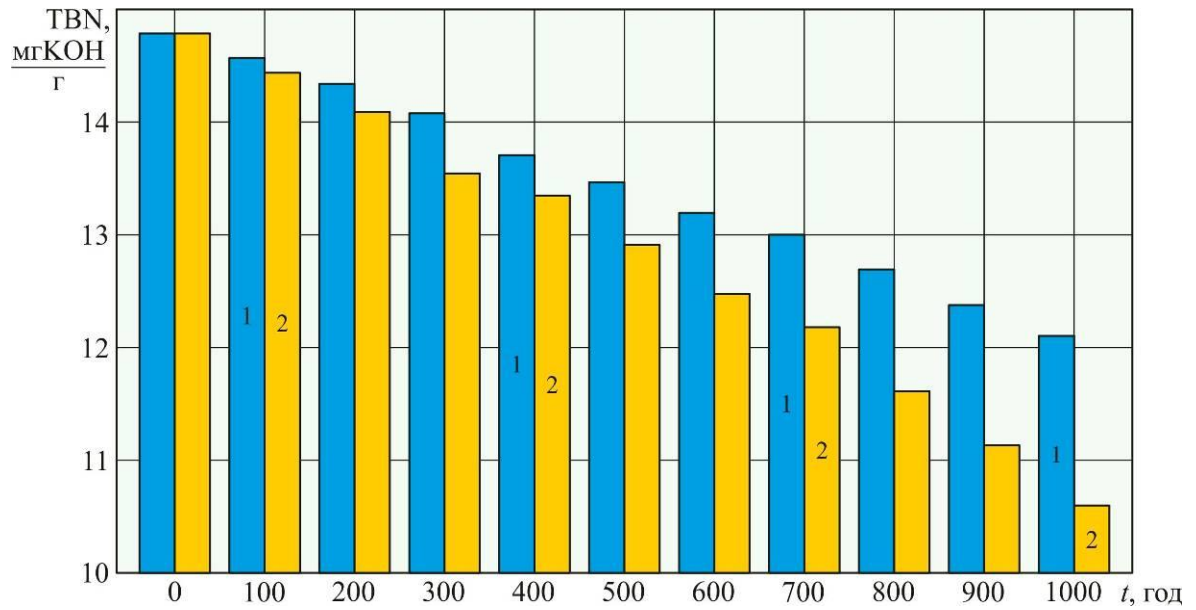
Результати вимірювань та розрахунків узагальнені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

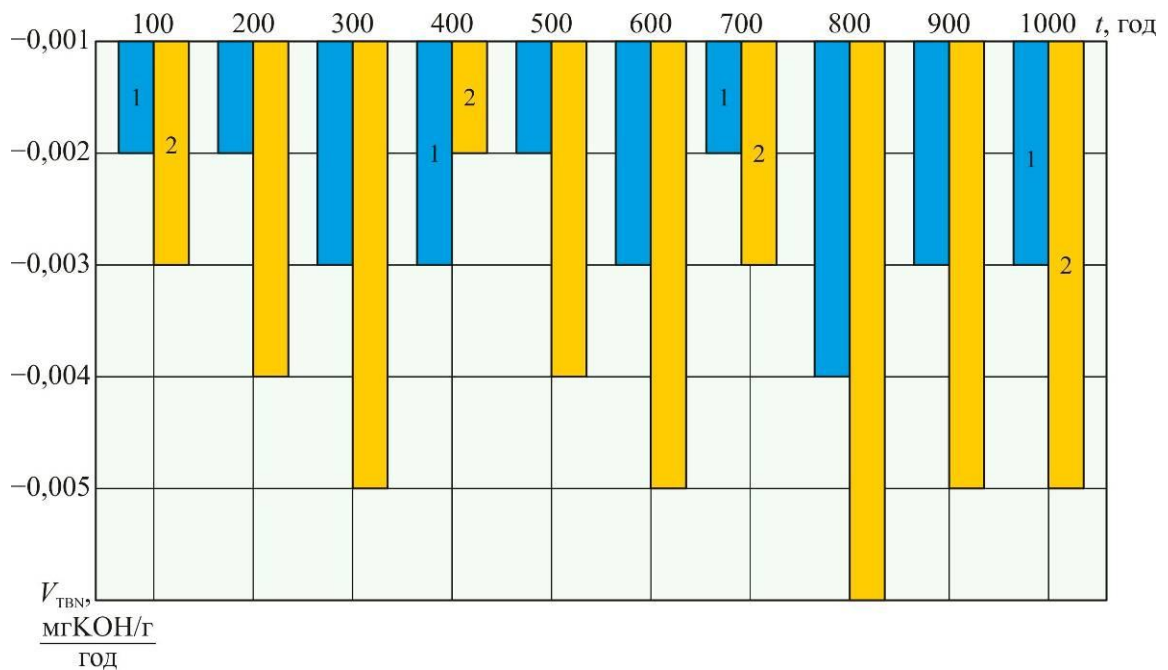
Зміна експлуатаційних характеристик моторне мастило Castrol 15W20 та ресурсних показників суднових дизелів 6R26 Wartsila за різних умов проведення експерименту

Час, години	ДД № 1, експлуатація на паливі RME180				ДД № 2, експлуатація на паливі RMG380			
	TBN	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$C_{\text{Fe}}$	$V_{C_{\text{Fe}}}$	TBN	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}}$	$C_{\text{Fe}}$	$V_{C_{\text{Fe}}}$
1	14,8	—	4,5	—	14,8	—	4,8	—
100	14,6	-0,002	5,8	0,013	14,5	-0,003	8,2	0,034
200	14,4	-0,002	7,2	0,014	14,1	-0,004	12,3	0,041
300	14,1	-0,003	9,0	0,018	13,6	-0,005	15,4	0,031
400	13,8	-0,003	10,8	0,018	13,4	-0,002	17,3	0,019
500	13,6	-0,002	12,0	0,012	13	-0,004	19,5	0,022
600	13,3	-0,003	13,3	0,013	12,5	-0,005	22,4	0,029
700	13,1	-0,002	14,7	0,014	12,2	-0,003	23,6	0,012
800	12,7	-0,004	16,7	0,02	11,6	-0,006	27,6	0,04
900	12,4	-0,003	18,5	0,018	11,1	-0,005	31,2	0,036
1000	12,1	-0,003	20,0	0,015	10,6	-0,005	35,5	0,043

За результатами таблиці 4.6 побудовані діаграми, що наведені на рис. 4.6-4.7.



а)



б)

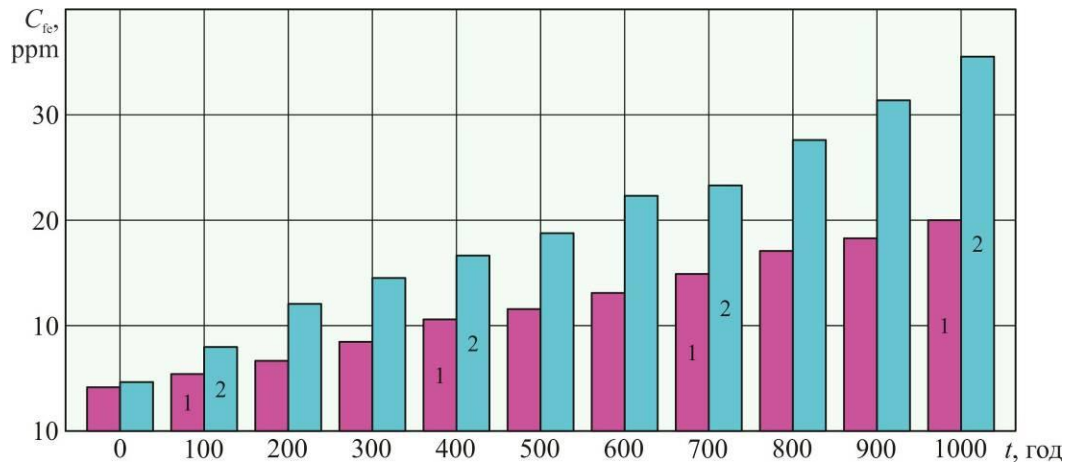
Рис. 4.6. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Castrol 15W20, що використовувалось у системі циркуляційного мащення суднових дизелів Diesel 6R26 Wartsila за різних умов проведення експерименту:

1 – ДД № 1, експлуатація на паливі RME180;

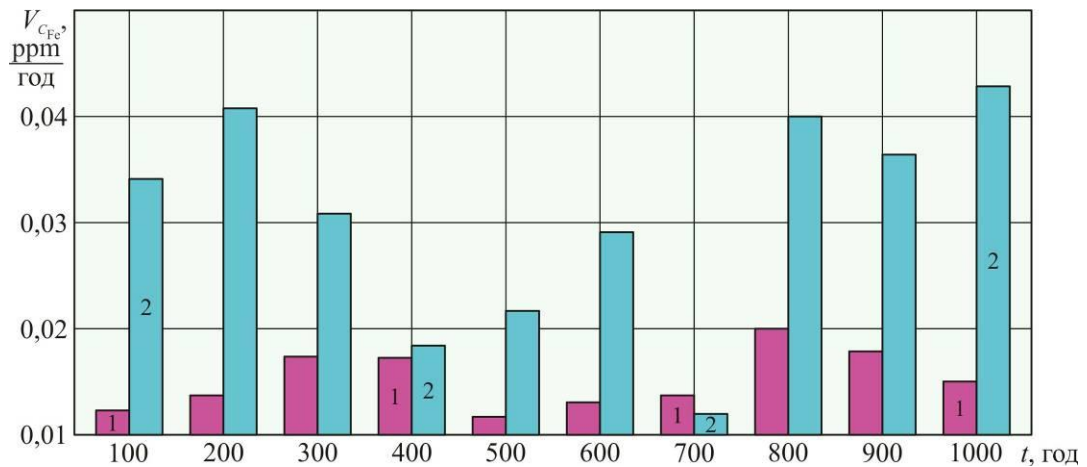
2 – ДД експлуатація на паливі RMG380;

а – загальне лужне число, б – градієнт швидкості зміни загального лужного

числа



а)



б)

Рис. 4.7. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Castrol 15W20 та ресурсних показників суднових дизелів 6R26 Wartsila за різних умов проведення експерименту:

1 – ДД № 1, експлуатація на паливі RME180;

2 – ДД № 2, експлуатація на паливі RMG380;

а – вміст металевих домішок у моторному мастилі,

б – швидкість потрапляння металевих домішок у моторне мастило

Як і в попередніх, односпрямованих дослідженнях саме градієнт швидкості зміни загального лужного мастила є показником, за яким можливо виконувати діагностику стрибкоподібної зміни технічного стану трибосполучень судового дизеля. Значення градієнту загального лужного числа характеризує лише можливість подальшого використання певного об'єму моторного мастила, яке знаходиться в системі мащення, та не надає

додаткової інформації щодо процесу його окислення чи забруднення сторонніми компонентами. Підтвердженням цього припущення є аналіз відповідності зміни  $V_{\text{ТВН}}$  (яка розраховувалась за результатами аналізу моторного мастила в судновій лабораторії) та спектрального аналізу забруднень, що входять до складу мастила (який виконувався в береговій дослідницькій лабораторії).

Результати спектрального аналізу, що виконувались у береговій дослідницькій лабораторії, наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Результати спектрального аналізу моторного мастила Castrol 15W20 за різних умов проведення експерименту

Wear Elements, мг/кг	ДД № 1	ДД № 2	Contaminant Elements, мг/кг	ДД № 1	ДД № 2
500 годин експлуатації					
алюміній Al	1,5	2,5	бор B	3	9
хром Cr	1	2	натрій Na	2,5	7,5
мідь Cu	1,5	2,5	кремній Si	2,5	5,5
залізо Fe	5,5	8,5	ванадій V	21,5	37,5
олово Sn	1	2	молібден Mo	2	6
свинець Pb	1,5	2,5	нікель Ni	6	10,5
Загальна кількість	12	20	Загальна кількість	37,5	76
1000 годин експлуатації					
алюміній Al	2,5	3,5	бор B	4	11
хром Cr	1	3	натрій Na	3	10,5
мідь Cu	2,5	4	кремній Si	3,5	8
залізо Fe	7,5	16,5	ванадій V	26	50,5
олово Sn	1	3	молібден Mo	3	8
свинець Pb	2,5	3	нікель Ni	11,5	18
Загальна кількість	17	33	Загальна кількість	51	106

За результатами таблиці 4.7 побудовані діаграми – рис. 4.8, 4.9, що відображають зміну експлуатаційних показників моторного мастила та ресурсних показників роботи дизелів за різних умов проведення експерименту.

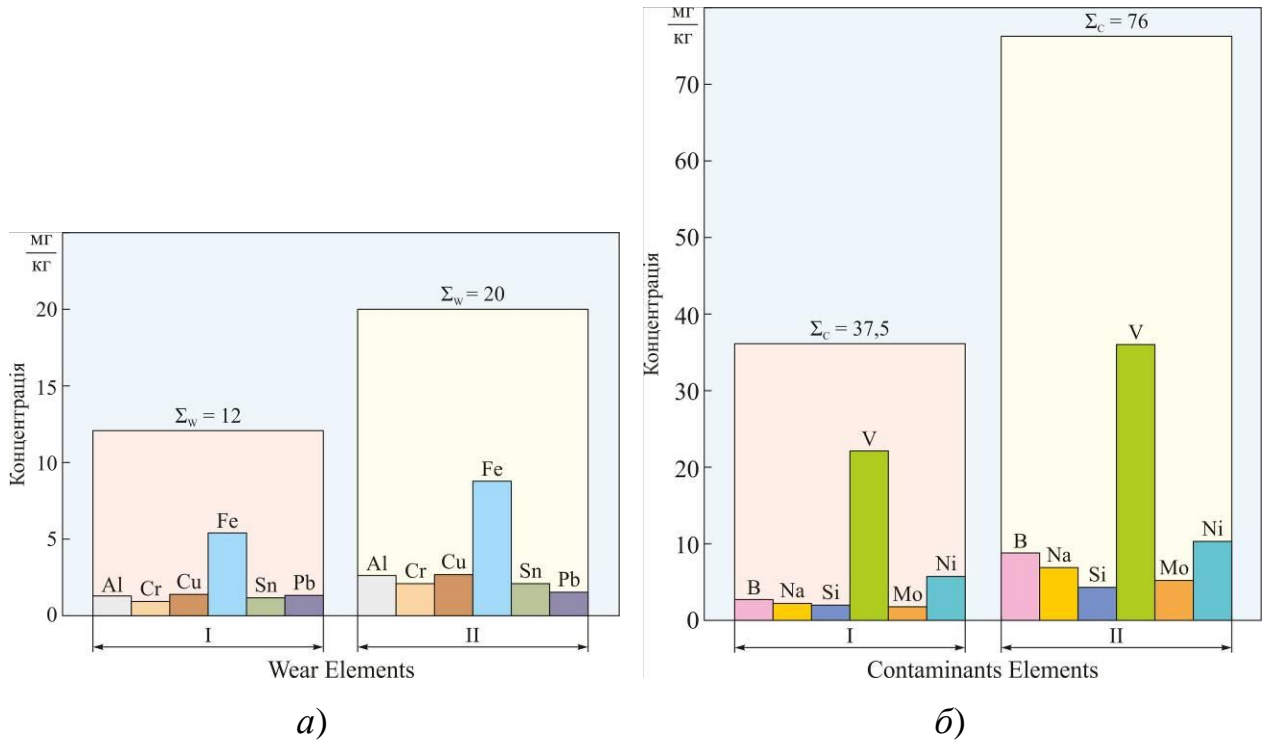


Рис. 4.8. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Castrol 15W20 та ресурсних показників суднових дизелів 6R26 Wartsila після 500 год експлуатації за різних умов проведення експерименту:

I – ДД № 1, експлуатація на паливі RME180;

II – ДД № 2, експлуатація на паливі RMG380;

*a* – компоненти, що характеризують знос деталей дизеля, *б* – компоненти, що характеризують забруднення моторного мастила

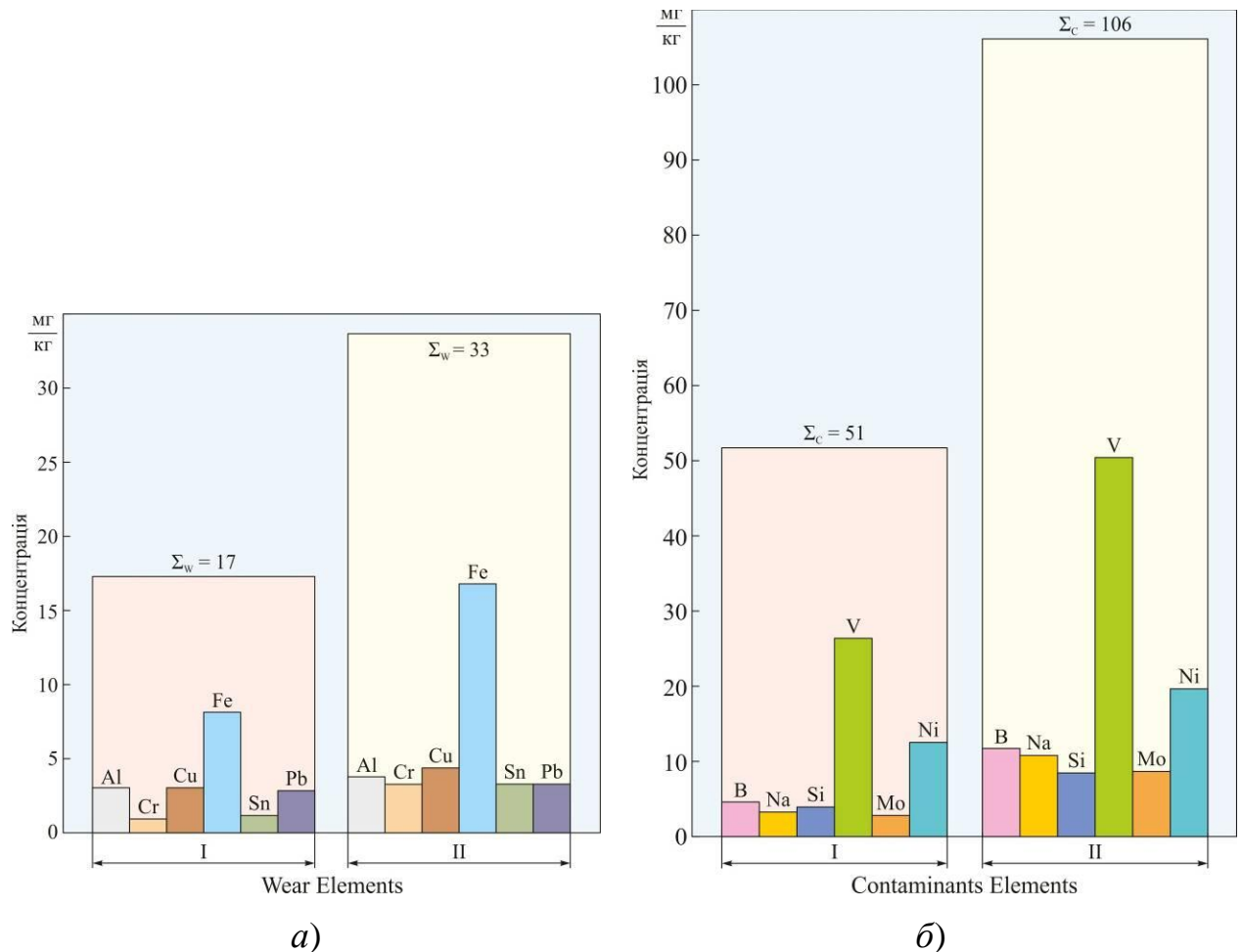


Рис. 4.9. Зміна експлуатаційних показників моторного мастила Castrol 15W20 та ресурсних показників суднових дизелів 6R26 Wartsila після 1000 год експлуатації за різних умов проведення експерименту:

I – ДД № 1, експлуатація на паливі RME180;

II – ДД № 2, експлуатація на паливі RMG380;

*a* – компоненти, що характеризують знос деталей дизеля, *б* – компоненти, що характеризують забруднення моторного мастила

На рис. 4.9 як основні результати спектрального аналізу моторного мастила, що виконувався в береговій дослідницькій лабораторії наведені значення вмісту в оливі наступних речовин Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb – які характеризують знос контактних поверхонь дизеля та відносяться до категорії Wear Elements; а також B, Na, Si, V, Mo, Ni – які характеризують забруднення моторного мастила та відносяться до категорії Contaminant Elements. Зазначимо, що компоненти Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb є складовими, що входять до матеріалів, з яких виготовляються поршневі кільця, втулки та до

антифрикційних багатошарових покриттів вкладишів підшипників. Через це за їхньою зміною можливо діагностувати технічний стан цих поверхонь. Приклад такої діагностики наведено в таблиці 4.8.

Різні деталі двигуна (циліндрові втулки, поршневі кільця, вкладиші підшипників) виготовляються з різних сплавів, що містять різні елементи в різних концентраціях. Присутність у мастилі таких елементів, званих елементами зносу, може свідчити про знос деталей двигуна, таких як підшипники, циліндрові втулки та кільця поршневі. Якщо вміст зносостійких елементів у мастилі раптово збільшується, це може свідчити про позаштатну ситуацію в системі мащення, перехід гідродинамічного режиму мащення в граничний і навіть виникнення сухого тертя. За елементним складом забруднень, що знаходяться в мастилі, можна визначити джерело їхнього надходження. Основні елементи, що входять до мастила як забруднення, а також джерела їхньої появи наведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Основні елементи, що входять до мастила як забруднення та можливе джерело їх виникнення

Елемент	Джерело появи
Алюміній, Al	Знос вкладишів підшипників
Ванадій, Va	Високов'язке паливо
Залізо, Fe	Знос втулки та поршневих кілець
Кремній, Si	Розкладення присадок
Мідь, Cu	Знос вкладишів підшипників
Молібден, Mo	Знос вкладишів підшипників
Натрій, Na	Розкладення присадок
Нікель, Ni	Високов'язке паливо
Олово, Sn	Знос вкладишів підшипників
Свинець, Pb	Знос вкладишів підшипників
Хром, Cr	Знос втулки та поршневих кілець

Зіставлення результатів з визначення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4r}$  та концентрації в мастилі компонентів, що характеризують знос основних трибосполучень дизеля та потрапляння в мастило компонентів, що забруднюють дозволяє зробити висновок щодо їхнього взаємозв'язку та можливості діагностування стану суднового дизеля за аналізом моторного мастила [165].

Інструкції та рекомендації фірм-виробників дизелів регламентують лише гранично допустимий вміст у моторному мастилі складових, що характеризують знос його елементів. Саме за цими значеннями оцінюється технічний стан дизеля. Проте через аналіз градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4r}$  можливо діагностувати виникнення несправностей, пов'язаних зі зміною технічного стану елементів дизеля, наприклад, підвищеного зносу поршневих кілець (що може призвести до їхньої поламки), видаленню антифрикційного матеріалу з поверхонь вкладишів підшипників (що може призвести до збільшення механічних напружень та зайвих механічних втрат).

Під час дослідження контролювались та підтримувались в рекомендованому фірмою-виробником діапазоні всі основні показники роботи дизелів 6R26 Wartsila та систем, що забезпечують їхнє функціонування.

Експлуатація суднових дизелів нерозривно пов'язана зі зміною їхнього ресурсу та технічного стану їхніх основних трибосполучень, до яких відносяться циліндрові втулки та поршневі кільця, а також колінчатий вал та вкладиші підшипників ковзання. Діагностика технічного стану цих елементів може бути виконана за аналізом моторного мастила, що використовується в їхніх системах циркуляційного мащення.

#### 4.4. Висновки за розділом 4

Як результат досліджень, що виконані в розділі 4, визначимо наступне.

1. Ефективність експлуатації циркуляційних систем мащення суднових чотиритактних дизелів залежить як від параметрів безпосередньо в системі мащення (тиску, температури, в'язкості та лужного числа мастила), також і від параметрів в системі охолодження циліндрів дизеля.

2. Термодинамічні режими експлуатації суднових дизелів та елементарний склад палива, що використовується в дизелі для отримання корисної роботи, впливають на експлуатаційні показники моторного мастила та технічний стан дизелів та через це призводять до зміни їхніх ресурсозберігаючих показників.

3. Ефективність експлуатації циркуляційних систем мащення суднових чотиритактних дизелів залежить як від параметрів безпосередньо в системі мащення (тиску, температури, в'язкості та лужного числа мастила), також і від параметрів в системі охолодження циліндрів дизеля. У рекомендованому діапазоні температур охолоджуючої води існують оптимальні значення, за якими підтримується термодинамічна рівновага в комплексі паливо – продукти згоряння – мастило – деталі дизеля, що сприяє зменшенню зносу циліндрових втулок та поршневих кілець та відображається меншою концентрацією в моторному мастилі елементів, що впливають на знос деталей дизеля та на забруднення мастила.

4. Найбільш інформативним способом діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів є спектральний аналіз моторного мастила, який дозволяє визначити вміст у мастилі елементів, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля – Wear Elements, та елементів, що характеризують забруднення мастила – Contaminant Elements. Обмеженням цього методу є необхідність його проведення виключно в берегових

дослідницьких лабораторіях, що збільшує інтервал інформативності та підвищує час прийняття рішень зі зміни умов експлуатації дизеля.

5. Через збіг динаміки зміни вмісту в мастилі компонентів, що характеризують знос його трибосполучень та потрапляння до мастила забруднюючих речовин (Wear Elements / Contaminant Elements) та градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила, саме градієнт швидкості зміни загального лужного числа рекомендується як параметр, за яким ціліподібно виконувати експрес-діагностику технічного стану трибосполучень дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. До таких трибосполучень перш за все відносяться поршневі кільця та втулка циліндра, а також вкладиш підшипника та колінчатий вал. Збільшення градієнту швидкості зміни загального лужного відповідає збільшенню концентрації в мастилі компонентів, що характеризують знос саме цих елементів дизеля.

6. Діагностування стану моторного мастила за значеннями градієнту зміни загального лужного числа, швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі, вмістом у моторному мастилі домішок, що відображають наявність продуктів зносу деталей дизеля, а також продуктів окислення моторного мастила та неповного згоряння палива, прийняття рішень щодо управління процесами мащення за результатами цього діагностування сприятиме забезпеченню гарантованого фірмами-виробниками ресурсу роботи судових дизелів.

## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ МОТОРНОГО МАСТИЛА

### 5.1. Використання імітаційного статистичного аналізу даних під час діагностування технічного стану суден морського транспорту

На даний час актуальним науково-прикладним завданням в сфері управління життєвим циклом суден морського транспорту є перехід від концепції «реагувати та виправляти» до більш ефективної концепції – «прогнозувати та попереджати». Одним із способів діагностики надійності суден морського транспорту, їхніх енергетичних установок, допоміжного та навігаційного обладнання є методи статистичного аналізу вимірюваних експлуатаційних характеристик, енергетичних показників та технологічних параметрів.

Класичні підходи до визначення показників надійності техніки у вигляді, наприклад, оцінки ймовірності безвідмовної роботи пов'язані з аналізом групи обладнання однакового призначення, що функціонує протягом деякого інтервалу часу з реєстрації випадкової величини часу до їхньої відмови. На даний час статистична концепція процесів, що лежить в основі теорії надійності техніки, зустрічає труднощі експериментальної перевірки для складної та наукомісткої продукції суднобудування, що виготовляється порівняно невеликою кількістю унікальних зразків техніки, тоді як термін їхнього життя становить десятки років. Для практичного підтвердження високих вимог до надійності суден морського транспорту та їх енергетичних установок надто мала серійність їхнього виробництва. Як правило, для морських суден – це не більше 10...15 однотипних одиниць одного проекту, для енергетичного обладнання – до 50 повністю однотипних теплових двигунів, які встановлюються на морських судах різного класу, різної водотоннажності та різного району плавання. Крім того, аналіз

життєвого циклу відбувається за великий інтервал часу спостережень та вимірювань. Наслідком цих обставин є недостатня статистична вибірка несприятливих подій відмов морської техніки щодо проведення якісного статистичного узагальнення її показників надійності в режимі реального часу.

Дорогі натурні стенди та прискорені випробування практично ніколи не можуть створити умови технічної експлуатації відповідно до реальних, одночасно з цим статистична вибірка таких експериментів не завжди переконлива для повного та точного діагностування характеристик надійності (безвідмовності, довговічності, збереження та ремонтпридатності). Однак економічні й енергетичні потреби суспільства дозволили сформулювати завдання управління надійністю та якістю експлуатації суден морського транспорту з метою зниження вартості та термінів їхнього будівництва, комплектації, сервісного обслуговування, а також своєчасного оновлення енергетичного та навігаційного обладнання в умовах жорсткої конкуренції на світовому ринку продукції суднобудування. Цей напрямок науково-прикладних досліджень пов'язаний із розробкою інформаційно-комунікаційної технології управління життєвим циклом.

На даний час розвиток комп'ютерної техніки та комп'ютерних технологій, засобів вимірювання та обробки даних (у тому числі тих, що застосовуються безпосередньо на суднах морського транспорту) забезпечили можливість контролю, діагностики та прогнозування експлуатаційних характеристик енергетичного обладнання безпосередньо на борту судна в реальних умовах плавання без збільшення трудомісткості його обслуговування. Комп'ютерна техніка дозволяє розв'язувати цей клас завдань на базі статистичних модельних досліджень з метою оптимального управління складними об'єктами морської техніки протягом усього життєвого циклу експлуатації суден. Результати статистичного моделювання процесів дозволяють оцінювати ризики (технічні, економічні та екологічні) під час експлуатації суден морського транспорту в реальних умовах та

розв'язувати завдання забезпечення прийняттого значення ризиків на основі більш адекватних знань.

Існує два принципово різних підходи до визначення показників надійності – це методи прямих та непрямих вимірів. Прямим виміром показника надійності є визначення випадкового числа однотипних об'єктів, що відмовили залежно від часу їхньої роботи до відмови – це виправдано для простих і малофункціональних пристроїв. Відмінною особливістю методів прямого вимірювання показників надійності є те, що чисельна оцінка ймовірності збереження чи втрати працездатності двигунів, обладнання та пристроїв не залежить від їхньої фізичної природи [166].

При непрямому вимірі показників надійності технічного об'єкта використовують оцінку ймовірності події збереження чи втрати значень деяких його технологічних параметрів не більше допустимих значень залежно від часу функціонування цього об'єкта. Непрямі виміри використовуються для розв'язання завдань за допомогою систем функціональної діагностики. Тоді умовою втрати надійності буде подія збільшення / зменшення вимірюваних технологічних (діагностичних) параметрів вище / нижче деяких гранично допустимих значень. Показники надійності, отримані непрямим виміром, дають оцінку ймовірності більш масових та різноманітних за фізичною природою несприятливих подій чи повної втрати об'єктом працездатності (наприклад, втрати міцності через перевищення часу експлуатації чи зносу матеріалів). При цьому є можливість розрізняти характеристики надійності різних одиниць однотипного обладнання, формуючи технічний паспорт всієї історії їхнього життєвого циклу. Ця можливість має перевагу порівняно з традиційним усередненням їхніх часових показників надійності за множиною однотипних зразків техніки. Тому актуальним є підвищення ефективності системи управління технічною експлуатацією морських суден, їхніх енергетичних установок та їхнього обладнання, зниження термінів та вартості їхнього сервісного

обслуговування на базі розвитку засобів безрозбірної параметричної діагностики та відповідних методів статистичної обробки отриманих даних.

Розглянемо основні припущення та гіпотези у відомих методичних підходах щодо досліджень надійності та якості енергетичного обладнання суден морського транспорту, які стримують вирішення завдань, сформульованих раніше. Область досліджень, пов'язаних із технічною діагностикою, передбачає розгляд трьох типів завдань:

- завдання діагностування – визначення технічного стану, у якому знаходиться об'єкт у даний момент;
- завдання еволюції (або передісторії) його технічного стану з минулого до теперішнього часу;
- завдання прогнозування (з урахуванням результатів розв'язання першого та другого завдань) – передбачення технічного стану, у якому виявиться об'єкт у певний майбутній час [167].

Статистичний опис параметрів технологічних процесів з метою контролю технічного стану та діагностики суднового обладнання характеризується багатоваріантним підходом. При цьому завдання прогнозування зводиться до визначення ймовірності невиходу / виходу прогнозованого процесу за встановлені межі, коли відомі функції розподілу випадкової величини діагностичного показника  $\xi(t)$ , який змінюється в моменти часу  $t_i (i=1, 2, 3, \dots, n; t_i \in T_1)$ . Однак на практиці закони розподілу ймовірностей випадкової величини діагностичних показників  $\xi(t)$ , як правило, невідомі до їхніх вимірів та відповідної статистичної обробки емпіричних даних. Для складної наукомісткої морської техніки розв'язання цього науково-практичного завдання залишається на даний час актуальним та комерційно доцільним. Під час ймовірнісного прогнозування використовуються методи екстраполяції на основі рівнянь регресії для визначення величини прогнозованої змінної у вигляді математичного очікування  $m_{\xi}(t)$  у моменти часу  $t_j (j=n+1, n+2, \dots, n+m; t_j \in T_2)$ .

Математична статистика поділяє випадкові процеси на стаціонарні та нестаціонарні типи. Випадковий процес називається стаціонарним, якщо всі статистичні та змішані моменти інваріантні (незалежні) в часі. У той же час нестаціонарний випадковий процес відрізняється наявністю лінійного тренду або більш складної форми. Основними статистичними характеристиками, що мають велике значення для опису окремих реалізацій стаціонарних випадкових процесів, є наступні параметри: середнє вибіркове значення та дисперсія, щільність ймовірності розподілу значень випадкової величини, функція коваріації, функція спектральної щільності потужності стаціонарної реалізації. На коротких інтервалах часу, коли вибірка часового ряду випадкової величини незначна і тренд може бути виявлений, процес може вважатися локально стаціонарним [167].

У цілому реальні фізичні процеси, що перебігають у складних судових системах протягом усього терміну експлуатації морського судна, завжди мають повільні нестаціонарні зміни внаслідок нестабільності зовнішніх умов експлуатації суден і внутрішніх умов навантаження обладнання, впливу агресивних робочих середовищ, вібрації, поступовому збільшенню ресурсу матеріалів і інше. Цей вид нестаціонарних процесів характеризується тим, що не надто сильно перевершує час кореляції. Проте на даний час під час розв'язання практичних завдань теорії надійності діє основне припущення у вигляді гіпотези постійної інтенсивності відмов обладнання. Це припущення дає змогу застосувати математичний апарат Марківських випадкових процесів. На жаль, привабливість зазначеної гіпотези пов'язана з перевагами чисельного рішення лише простих інженерних завдань. Але, по суті, за таких припущень ігнорується можливість урахування накопичення «збитку» в системі через процеси поступового збільшення та досягнення регламентованого ресурсу експлуатації вузлів та матеріалів, погіршення їхніх експлуатаційних характеристик, зносу кінематичних сполучень у механізмах та подібних явищ, що існують для завдання опису нестаціонарних

випадкових процесів в характеристиках надійності та втрати якості суднового обладнання.

Водночас, система моніторингу технічного стану суднового обладнання повинна передбачати розв'язання наступних завдань: фіксування вимірних значень діагностичних параметрів, аналіз тенденцій їхніх змін, прогноз технічного стану об'єкта контролю. Прогноз стану виконується з урахуванням передісторії зміни діагностичних параметрів із достатнім числом їхніх вимірів. Ця вимога не завжди виконується в повному обсязі, хоч і зроблено значні кроки в галузі розробки та впровадження засобів діагностики в морську практику. Досі існують лише поодинокі ефективні методи статистичного аналізу технічного стану суднового обладнання, еволюції його в часі та прогнозування небезпечних тенденцій його погіршення.

Статистичний аналіз складного обладнання з метою прогнозування його технічного стану значною мірою стримується складністю опису реальних фізичних явищ, що характеризуються як випадкові нестационарні процеси. У багатьох випадках у класі нестационарних випадкових процесів, що відповідають реальним фізичним явищам, можна виділити особливі категорії нестационарності, що полегшує завдання їх вимірювання та аналізу. Наприклад, деякі явища випадкового характеру можуть бути описані випадковим нестационарним процесом  $\{y(t)\}$ , кожна вибіркова функція якого має вигляд

$$y(t)=A(t)\cdot x(t);$$

де  $x(t)$  – вибіркова функція стаціонарного випадкового процесу  $\{x(t)\}$ ;

$A(t)$  – детермінований множник. Іншими словами, такий процес відноситься до нестационарних випадкових процесів, вибірккові функції яких мають детермінований тренд.

Якщо нестационарний процес відповідає конкретній моделі такого типу (що вимагатиме статистичного підтвердження допустимості подібних гіпотез) тоді для його опису немає необхідності проводити осереднення по

всьому ансамблю. При цьому достатньо проводити осереднення по кожній вибірці на рівних інтервалах часу (наприклад, через кожні 100 год виробленого технічного ресурсу агрегату) та визначати лінійну швидкість зміни детермінованого множника або деякої їх сукупності.

Таким чином, більш загальний випадок порівняно з положеннями, викладеними раніше, є підхід статистичного опису нестационарного випадкового процесу. На рис. 5.1-5.3 представлено ілюстрацію нестационарного методичного підходу до розв'язання такого завдання.

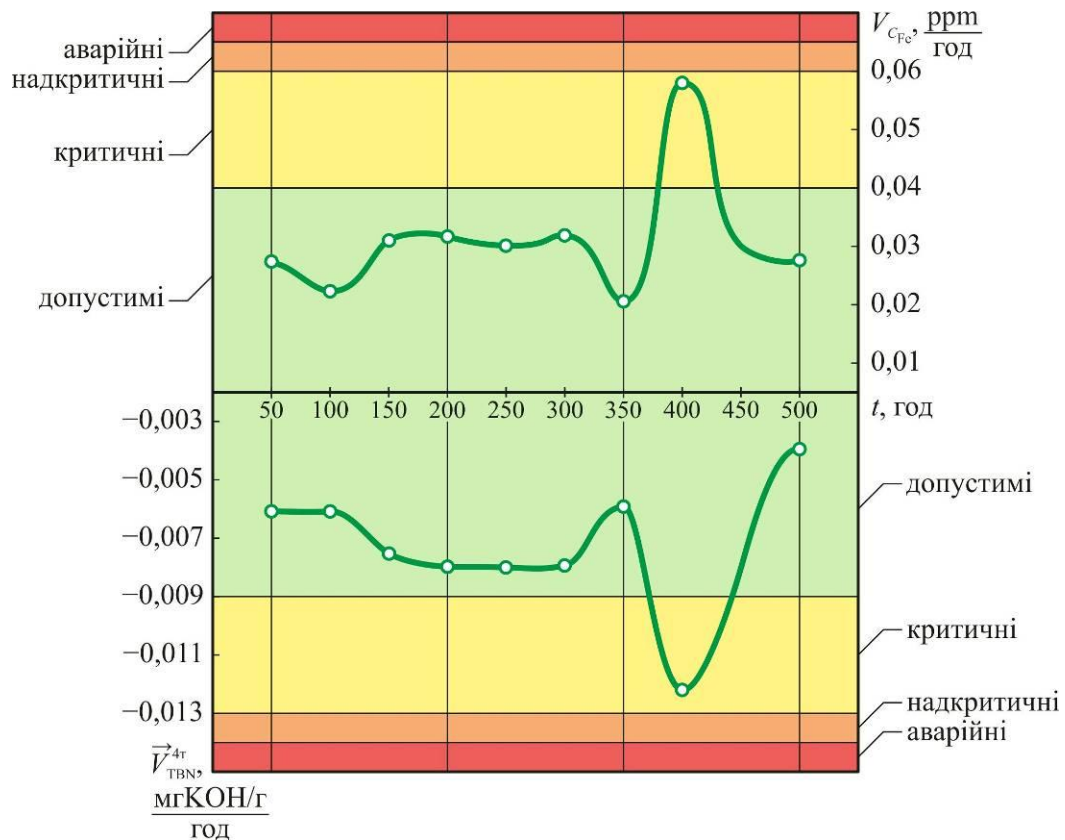


Рис. 5.1. Приклад статистичного опису процесів зміни експлуатаційних характеристик моторного масла в дискретних інтервалах часу (відносно значень для ММ № 1 таблиці 3.9)

Наведені на рис. 5.1-5.3 графічні залежності отримані на прикладі можливої зміни експлуатаційних характеристик (градієнта швидкості зміни загального лужного числа та швидкості зміни вмісту механічних домішок) моторного мастила системи мащення суднового дизеля, враховуючи ймовірність їхнього потрапляння в область нормальних та неприпустимих значень.

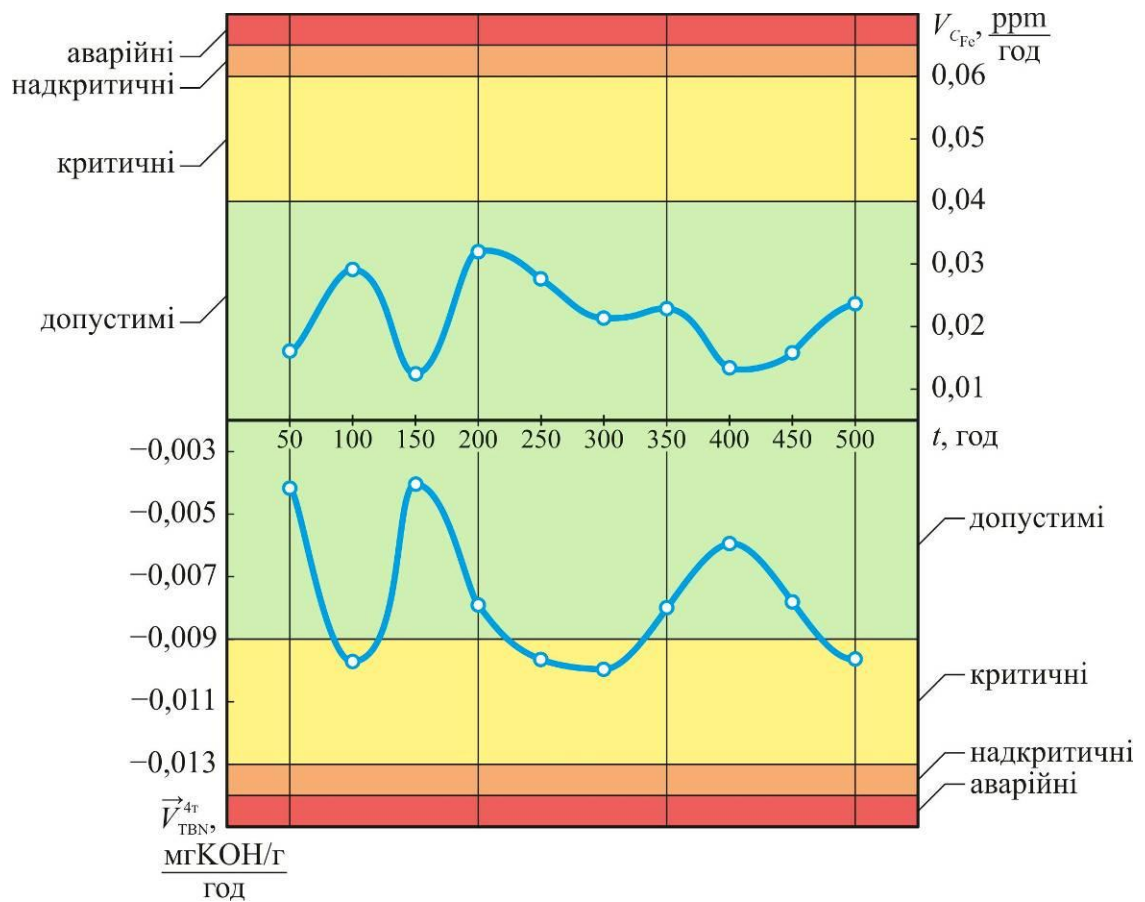


Рис. 5.2. Приклад статистичного опису процесів зміни експлуатаційних характеристик моторного масла в дискретних інтервалах часу (відносно значень для ММ № 2 таблиці 3.9)

Графічні залежності, наведені на рис. 5.1-5,2 побудовані за даними таблиці 3.9. При цьому область допустимих значень контрольованих параметрів розподілена в інтервалі від мінімального до максимального значення, а також виділені області контрольованих відхилень параметрів, що відповідають критичним, надкритичним та аварійним значенням.

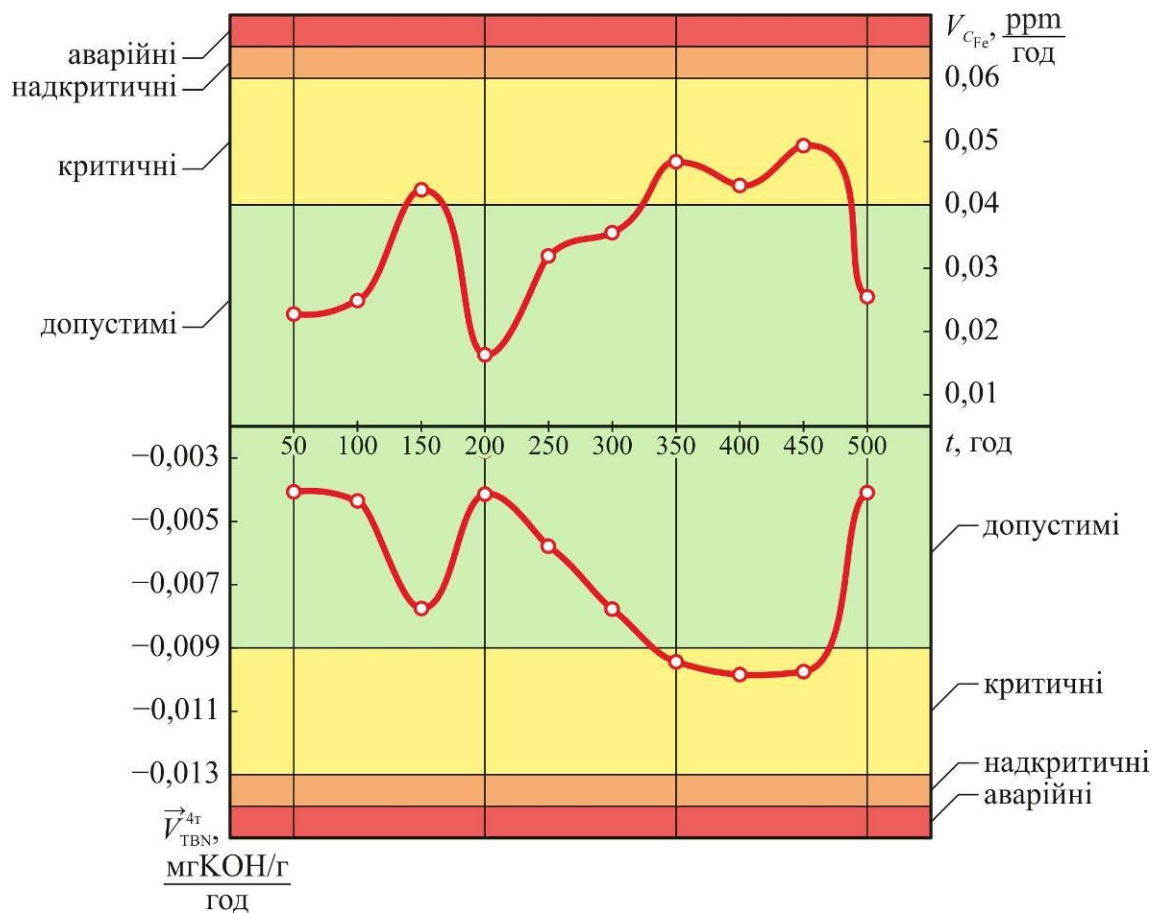


Рис. 5.3. Приклад статистичного опису процесів зміни експлуатаційних характеристик моторного масла в дискретних інтервалах часу (відносно значень для ММ № 3 таблиці 3.9)

Розрізнятимемо небажані зміни поточних параметрів технологічних процесів та відповідні зміни загального стану обладнання за очікуваним обсягом та трудомісткістю наступних ремонтно-відновлювальних робіт. Тут формальною ознакою ступеня небезпеки пошкодження обладнання є такі події, що мають випадковий час їхнього наступу:

- критичне, який вимагатиме проведення робіт мінімальної трудомісткості (без розбирання, без технологічної обробки чи заміни деталей дизеля) або лише зміни режиму його експлуатації;
- надкритичне, яке вимагатиме проведення відновлювальних робіт з частковим розбиранням та заміною деталей дизеля;
- аварійне, яке потребуватиме заміни однієї чи кількох деталей дизеля та виконання великого обсягу ремонтно-відновлювальних робіт.

У процесі тривалого експлуатаційного етапу життєвого циклу морської техніки змінюється й математичне очікування, і дисперсія випадкової величини контрольованого технологічного параметра судна, двигуна, устаткування чи суднової конструкції. Крім того, існує можливість регресійного опису зміни в часі не тільки математичного очікування та середньоквадратичного відхилення, а й максимального та мінімального значень цієї випадкової величини з урахуванням допустимої похибки для реєстрації їхніх значень. Кожна із зазначених робіт може бути описана інтенсивністю відновлення, які разом із інтенсивністю зносу впливатимуть на коефіцієнт готовності обладнання. При цьому статистичний аналіз розуміється як процедури обчислення інтервальних значень очікуваних моментів часу, коли обладнання переходить із нормального стану до зазначених раніше небажаних станів [168].

Перетворення чисельних (точкових) значень емпіричних функцій розподілу за даними вимірів (середніх та середньоквадратичних відхилень параметра  $X$ ) на межах кожного тимчасового кроку в шматково-лінійні залежності простої регресії може здійснюватися методом найменших квадратів. Це дозволить отримати аналітичні залежності вибіркового середнього, максимальних і мінімальних значень параметра функції часу  $t$  (див. відповідні криві  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4r} = f(t)$ ,  $V_{C_{\text{Fe}}} = f(t)$ , на площинах  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4r} - t$ ,  $V_{C_{\text{Fe}}} - t$ ). Для зазначених залежностей зеленим кольором виділена область нормальних значень, жовтим – область допустимих короточасних відхилень, червоним – область надкритичних й аварійних.

Принцип побудови статистичної моделі динаміки зміни умовного параметра  $X$  пояснює рис. 5.1. Графічні залежності  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4r} = f(t)$  та  $V_{C_{\text{Fe}}} = f(t)$  можна вважати множиною функцій розподілу випадкової величини параметра  $X$  (випадкової величини  $X$ ).

Для даного випадку чисельні значення вказані для експлуатаційних характеристик моторного масла системи циркуляційного мащення дизеля через кожні 50 годин фактично виробленого технічного ресурсу.

У кожному зазначеному інтервалі часу встановлені поточні значення параметра  $X$  представлені у вигляді множини точок у просторі характеристик  $\vec{V}_{\text{TBN}}$ ,  $V_{\text{CFe}}$ ,  $t$ , а відповідна емпірична вибірка може бути оброблена як локально стаціонарний процес. При цьому приймається гіпотеза, що в загальному випадку відповідний тренд на коротких інтервалах часу (50 год) незначний порівняно з тимчасовим інтервалом повного життєвого циклу експлуатації судна (який може змінюватися від 10 до 100 тис. год). У загальному випадку статистика даних вимірів може бути описана як стандартними теоретичними, так й емпіричними функціями розподілу випадкових величин технологічних параметрів.

Статистичний аналіз технологічних процесів за даними вимірюваних параметрів має включати низку обчислювальних процедур. Як правило, зміна технологічних характеристик судна є досить складним процесом, для прогнозу їхніх змін використовується імовірнісний підхід. Устаткування, надійність якого контролюється технологічними та діагностичними інструментальними засобами, пропонується описувати статистичною моделлю зміни зазначених характеристик у процесі експлуатації судна. Слід зазначити, що форма представлення великих обсягів статистичної інформації у вигляді поточних значень параметрів усієї генеральної сукупності даних, що вимірюються, є недостатньо компактною й зручною для її зберігання. У цьому випадку доцільно їх зберігати у вигляді чисельних значень функцій розподілу (через кожні 50...100 год), а також у вигляді середніх вибіркових величин, середньоквадратичних відхилень, чисельних значень ексцесів і коефіцієнтів асиметрії та мінімальних і максимальних значень. Кожен набір цих середніх статистичних значень може бути описаний кусково-лінійними рівняннями регресії функції часу. Ці фактичні дані повинні відображати всю передісторію розвитку технологічних процесів до поточного часу.

## 5.2. Прогнозування залишкового ресурсу експлуатації суднових дизелів за моніторингом часових рядів значень контрольованих параметрів

Одним із найважливіших показників надійності технічних об'єктів (у тому числі суден морського транспорту та їхніх дизелів, що виконують функції головних або допоміжних двигунів) є їхня довговічність. Імовірно-статистичні методи, що застосовуються для групової оцінки терміну служби суднового обладнання на стадії його проектування, не завжди придатні для індивідуальної оцінки залишкового ресурсу під час експлуатації у зв'язку із суттєвими значеннями коефіцієнтів варіації ресурсу та значними розбіжностями передбачуваної та фактичної моделей експлуатації. Підвищення достовірності оцінок може бути досягнуто за рахунок контролю фактичних режимів експлуатації та моніторингу діагностичних параметрів, що характеризують деградацію фактичного технічного стану обладнання [169].

Одним із типових методів розрахункової оцінки показників надійності та, зокрема, довговічності технічних об'єктів є застосування масиву статистичних даних, що узагальнюють результати експлуатації або тривалих випробувань однотипних вузлів чи деталей. Для більшості видів суднового обладнання характерне дрібносерійне (а іноді й унікальне) виробництво та великі терміни служби. У зв'язку з цим статистичні дані про фактичну довговічність обладнання, що необхідні для реалізації імовірно-статистичного методу прогнозування, у більшості випадків виявляються недостатньо інформативними чи застарілими. Крім того, імовірнісний характер прогнозів (обтяжених, як правило, суттєвою дисперсією через значущі для суднового обладнання коефіцієнти варіації ресурсу та суттєві розбіжності передбачуваної та фактичної моделей експлуатації) обмежує область застосування імовірно-статистичного методу оцінками групових середніх експлуатаційних показників довговічності обладнання (наприклад,

групи однотипних вузлів чи деталей). Достовірний індивідуальний прогноз довговічності конкретного механізму чи агрегату цим способом отримати складно. Тим часом інформаційною основою оптимального планування обслуговування суднового обладнання є достовірні індивідуальні прогнози експлуатаційних змін технічного стану найбільш навантажених та значимих вузлів та оцінка їхнього залишкового ресурсу. Більш пристосовані для індивідуальних прогнозів методи, інформаційною основою яких є результати моніторингу експлуатаційних параметрів конкретного контрольованого об'єкта.

Застосування аналізу масиву спостережень, що характеризує зміну деякого діагностичного параметра за часом, надає методу властивості універсальності, оскільки він абстрагований від фізичної природи об'єкта, вимагає знань його внутрішньої структури й функціональних зв'язків між вхідними й вихідними параметрами.

Цикл проведення діагностичних досліджень під тимчасовим рядом розуміє послідовність виміряних значень контрольованого параметра (змінної  $X$ ) деякого фізичного процесу, що спостерігається, який відбувається в енергетичному обладнанні. Ці значення реєструються через рівні проміжки часу  $\Delta t$ . Для завдань, розглянутих у дисертаційному дослідженні:

- як контрольований параметр приймалися значення загального лужного числа моторного масла TBN, мгКОН/г та кількість металевих домішок, які в ньому знаходяться  $C_{Fe}$ , ppm; далі за цими значеннями розраховувалися градієнт зміни швидкості загального лужного числа  $\vec{V}_{TBN}$ , (мгКОН/г)/рік, і швидкість зміни концентрації металевих домішок  $V_{C_{Fe}}$ , ppm/рік;

- як фізичний процес, що відбувається в енергетичному обладнанні, розглядався процес мащення циліндропоршневої групи та підшипників ковзання;

- як часовий інтервал – виміри зазначених величин за той самий проміжок часу протягом певного періоду експлуатації суднового дизеля.

У скалярному поданні часовий ряд є множину значень змінної  $X$  з  $m$  чисел  $\{X(t_j)\}_{j=1}^m$ , відповідних моментам часу  $t_j = t_0 + j\Delta t$ .

У процесі аналізу часового ряду виділяють два завдання:

завдання 1 – ідентифікація математичної моделі часового ряду, яка за мінімальним числом параметрів адекватно представляє фізичний процес, що спостерігається;

завдання 2 – безпосередньо прогноз часового ряду, що передбачає передбачення майбутніх змін контрольованої змінної на деякому відрізку часу.

Розв'язання зазначених завдань виходить з припущення в тому, що зміна контрольованого параметра в часі підпорядковується деякому детермінованому закону, який зберігається незмінним, як в інтервалі спостережень за енергетичним устаткуванням (базовому прогнозному періоді), також і на інтервалі прогнозування. Маючи у своєму розпорядженні аналітичний опис цього закону, можна оцінити очікувані зміни параметра (характеристики технічного стану енергетичного обладнання) шляхом звичайної екстраполяції. При цьому передбачається, що неминучі випадкові флуктуації часового ряду можна довести до прийняттого рівня дисперсії застосуванням операторів згладжування – операторів математичного очікування, а також поточного середнього, експоненційного та інтегрального згладжування [170].

Відповідно до цієї концепції прогноз зміни стану енергетичного обладнання передбачає послідовне виконання низки етапів:

- вибір контрольованого параметра, що має найбільш сильний причинно-наслідковий зв'язок із деградацією стану енергетичного обладнання;
- накопичення результатів вимірювання обраного параметра на заданому часовому інтервалі (періоді основи прогнозу), тобто формування часового ряду;

- апроксимація часового ряду з метою виявлення детермінованого закону зміни параметра в часі та оцінка статистичних характеристик випадкових відхилень, зумовлених флуктуаціями процесу та похибками вимірювань;

- екстраполяція – застосування встановленого закону для визначення прогнозованого значення параметра за заданим збільшенням часу;

- оцінка очікуваної випадкової похибки прогнозу на підставі статистичних характеристик часового ряду.

У свою чергу, апроксимація часового ряду включає три послідовних у виконанні процедури:

- вибір типу апроксимуючої функції (математичної моделі);

- визначення чисельних значень її коефіцієнтів (наприклад, методом найменших квадратів);

- оцінка адекватності математичної моделі вихідному часовому ряду та інтерпретованості відносно до процесу, що спостерігається.

Під час вибору апроксимуючої залежності сучасні комп'ютерні програми найчастіше використовують бібліотеки типових функцій. Послідовно «перебираючи» типові функції, обчислюючи їм відповідні числові коефіцієнти методом найменших квадратів й оцінюючи похибки апроксимації, програма вибирає найбільш придатну апроксимуючу функцію. Найбільш раціональним є застосування програм, що забезпечують пошук апроксимуючих функцій за допомогою спеціальних операторів згладжування часового ряду, з подальшим переходом у фазові площини з метою аналізу результатів згладжування та вибору найкращої апроксимуючої функції з числа конкуруючих [171]. На рис. 5.4 представлена частина алгоритму моніторингу технічного стану енергетичного обладнання щодо процедури прогнозу.

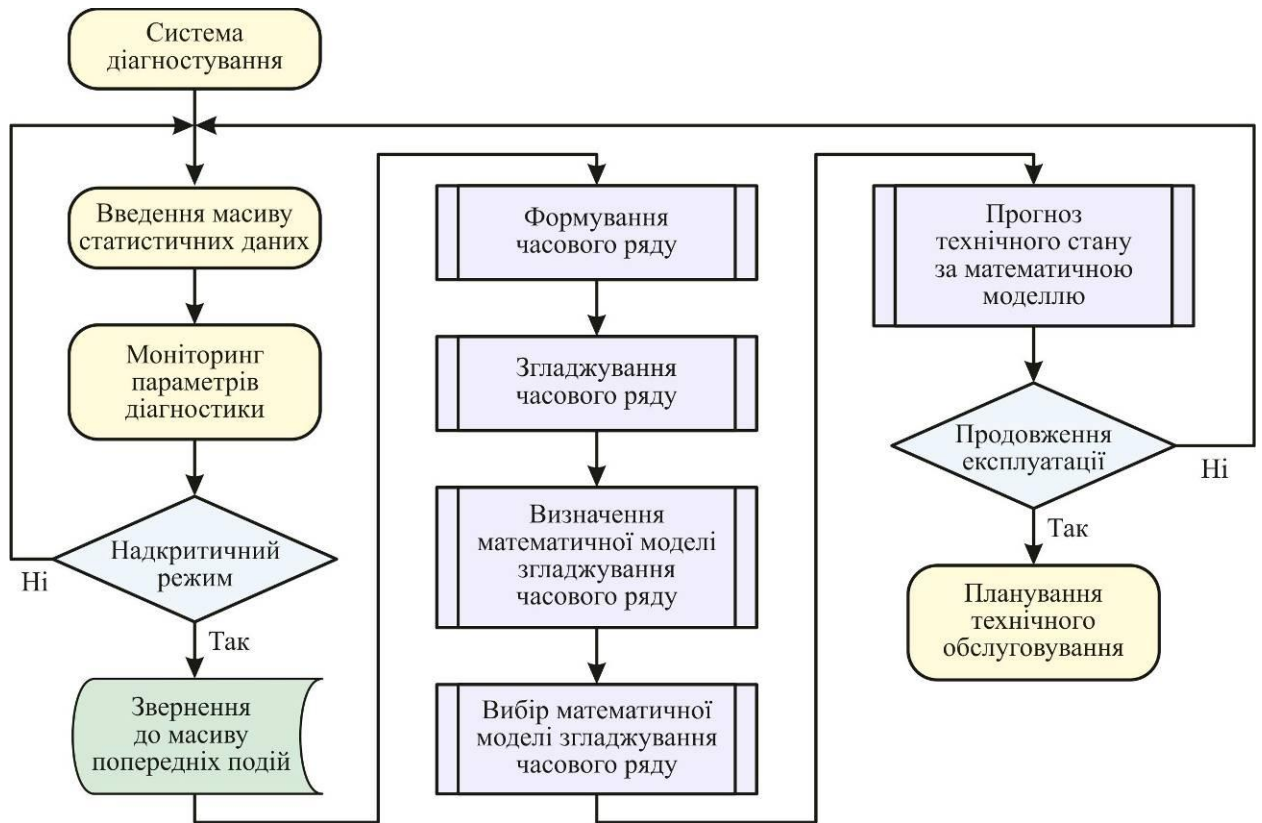


Рис. 5.4. Алгоритму моніторингу технічного стану енергетичного обладнання щодо процедури прогнозу за допомогою часових рядів значень контрольованих параметрів

Система моніторингу технічного стану енергетичного обладнання на основі аналізу послідовних даних (якими у розглянутій постановці задачі є загальне лужне число моторного масла TBN і кількість металевих домішок, які в ньому знаходяться  $C_{Fe}$ ) виконує розрахунок градієнта зміни швидкості загального лужного числа  $\vec{V}_{TBN}$  та швидкості зміни концентрації металевих домішок  $V_{C_{Fe}}$ . З появою критичного чи надкритичного відхилення цих величин починається процедура прогнозування технічного стану. При цьому система аналізує попередні тимчасові ряди з метою визначення збігу відхилень з аналогічними значеннями попередніх часових рядів.

Тимчасовий ряд параметра  $X(t_j)$ ,  $j=1, \dots, t$  як випадковий процес, що характеризується нерівномірністю, піддається згладжуванню із застосуванням інтегральних операторів  $k$ -кратності:

$$I[X(t)] = \left[ \int_{t_n}^{t_k} X(t) dt \right]_k ;$$

$$L[X(t)] = \left[ \int_{t_n}^{t_k} X(t) dt + tX(t) \right]_k ;$$

де  $t_n$  і  $t_k$  – час початку та кінця періоду проведення прогнозу відповідно.

Виконання операції послідовного інтегрального згладжування часового ряду забезпечує отримання двох додаткових множин:  $\{I(X_j); t_j\}$  та  $\{L(X_j); t_j\}$ . Додаткові множини дозволяють прийняти до розгляду фазові площини  $\{X_j, I(X_j)\}$  та  $\{X_j, L(X_j)\}$ , на яких будуть розміщуватися точки з відповідними координатами [172]. У багатьох випадках розміщування точок у фазових площинах досить точно представлена лінійними залежностями

$$X(t) = a_0 + a_1 I[X(t)]_k ; \quad (5.1)$$

$$X(t) = a_0 + a_1 L[X(t)]_k ; \quad (5.2)$$

де оцінки коефіцієнтів  $a_0$  та  $a_1$  обчислюються методом найменших квадратів.

Залежності (5.1) і (5.2) є інтегральними рівняннями, розв'язання яких за  $k=1$  мають, відповідно, вигляд

$$\tilde{X}(t) = a_0 \exp(a_1 t); \quad (5.3)$$

$$\tilde{X}(t) = \frac{a_0}{(1 - a_1 t)^2}. \quad (5.4)$$

Отримані вирази (5.3), (5.4) є математичними моделями згладжування часового ряду, які можна використовувати як апроксимуючі функції. Їхні коефіцієнти мають такий фізичний сенс:  $a_0$  – величина початкового «дефекту», що ініціює процес деградації технічного стану енергетичного обладнання;  $a_1$  – параметр тренда, що характеризує інтенсивність процесу.

Далі необхідно вибрати найкращу апроксимуючу тимчасовий ряд функцію за критерієм мінімуму квадратів відхилень:

$$\sum_{j=1}^m \Delta_j^2 = \sum_{j=1}^m [X(t_j) - \tilde{X}(t_j)]^2 \rightarrow \min.$$

Далі виконується прогноз часу досягнення контрольованим параметром гранично допустимого значення. За результатами прогнозу приймається рішення про продовження експлуатації енергетичного обладнання або необхідність виконання технічного обслуговування.

Безперечною перевагою екстраполяційного методу є те, що для його застосування не потрібне попереднє дослідження якісних та кількісних характеристик фізико-хімічних процесів деградації технічного стану об'єкта. Метод розрахований на мінімальну кількість контрольованих параметрів об'єкта. Недоліком є те, що для формування прогнозу потрібен період попереднього спостереження за об'єктом, протягом якого відбувається накопичення часового ряду. Метод ефективний тільки за монотонною зміною в часі та щодо малої флуктуації контрольованого діагностичного параметра. Відсутність контролю умов експлуатації обмежує можливість коректного застосування екстраполяційного методу лише однорежимними об'єктами або об'єктами, у яких частота зміни режимів істотно вища за частоту вимірів параметра, завдяки чому вплив режиму вдається послабити застосуванням інтегрального згладжування часового ряду. Певною мірою вдається підвищити достовірність екстраполяційного прогнозування за рахунок застосування спеціальних методик коригування часового ряду за допомогою методу Ейлера, лінійних та нелінійних регресійних моделей.

Наголошуючи на порівняльно простій реалізації алгоритму прогнозування, що передбачає моніторинг лише одного діагностичного параметра, не можна не відзначити і його істотний недолік – непристосованість до моніторингу багаторежимних об'єктів. При цьому експлуатаційні режим роботи об'єкта або експлуатаційні характеристики

його компонентів (наприклад, для розглянутих завдань вміст вологи в моторному мастилі або в'язкість моторного масла) у моменти чергових вимірів діагностичного параметра (наприклад, загального лужного числа) можуть істотно впливати на результати вимірювань. Ця обставина робить актуальною модернізацію екстраполяційного алгоритму для пристосування його до моніторингу багаторежимних об'єктів.

Однією з характерних рис алгоритму моніторингу діагностичного параметра, що застосовується в однопараметричному методі прогнозування, є обчислення часу проведення чергового виміру з урахуванням аналізу вже накопиченого часового ряду. У разі реалізації цього алгоритму за допомогою системи діагностування, саме в ці моменти часу будуть проводитися вимірювання діагностичного параметра, а отримані результати доповнюватимуть часовий ряд. У цьому випадку алгоритм передбачає виявлення заздалегідь очікуваних неадекватних результатів вимірювань шляхом їхнього порівняння з попередніми повноцінними вимірюваннями та заміну їх на значення, що обчислені за методом Ейлера (тобто з використанням тренду, обчисленого за попередніми вимірами) [173].

Щодо проведених у дисертаційному дослідженні експериментів, такий підхід може бути проілюстрований на прикладі даних таблиці 3.2 та рис. 3.2. При цьому кориговані значення  $X_i^{\text{кор}}$  контрольованих параметрів визначаються за виразом

$$X_i^{\text{кор}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\text{вим}}}{n};$$

де  $X_i^{\text{вим}}$  – вимірюване значення контрольованого параметра;

$n$  – кількість вимірювань на часовому ряді.

Відповідно до значень загального лужного числа ТВН щодо ММ № 1 з таблиці 3.2, кориговані значення  $X_i^{\text{кор}}$  для відповідних часових рядів розраховуються як:

для часового ряду 100–200 год

$$X_1^{\text{кор}} = \frac{28,1 + 32,2}{2} = 30,2;$$

для часового ряду 100–900 год

$$X_9^{\text{кор}} = \frac{28,1 + 32,2 + 29,8 + 26,3 + 28,1 + 33,0 + 31,6 + 32,3 + 27,9}{9} = 29,7.$$

Отримані в такий спосіб значення узагальнені у вигляді таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Прогнозування контрольованих показників за допомогою часових рядів

Час, год	ММ № 1			
	ТВН, мгКОН/г		C <sub>Fe</sub> , ppm	
	виміряне	кориговане	виміряне	кориговане
100	28,1	30,2	62,1	60,2
200	32,2	30,0	58,2	57,9
300	29,8	29,1	53,3	57,4
400	26,3	28,9	55,9	55,5
500	28,1	29,6	48,2	55,1
600	33,0	29,9	52,6	54,3
700	31,6	30,2	49,8	54,8
800	32,3	29,9	58,4	55,6
900	27,9	29,7	62,1	56,1
1000	27,4	30,2	60,0	60,2

Візуалізація результатів, що наведені в таблиці 5.1, подана у вигляді рис. 5.5.

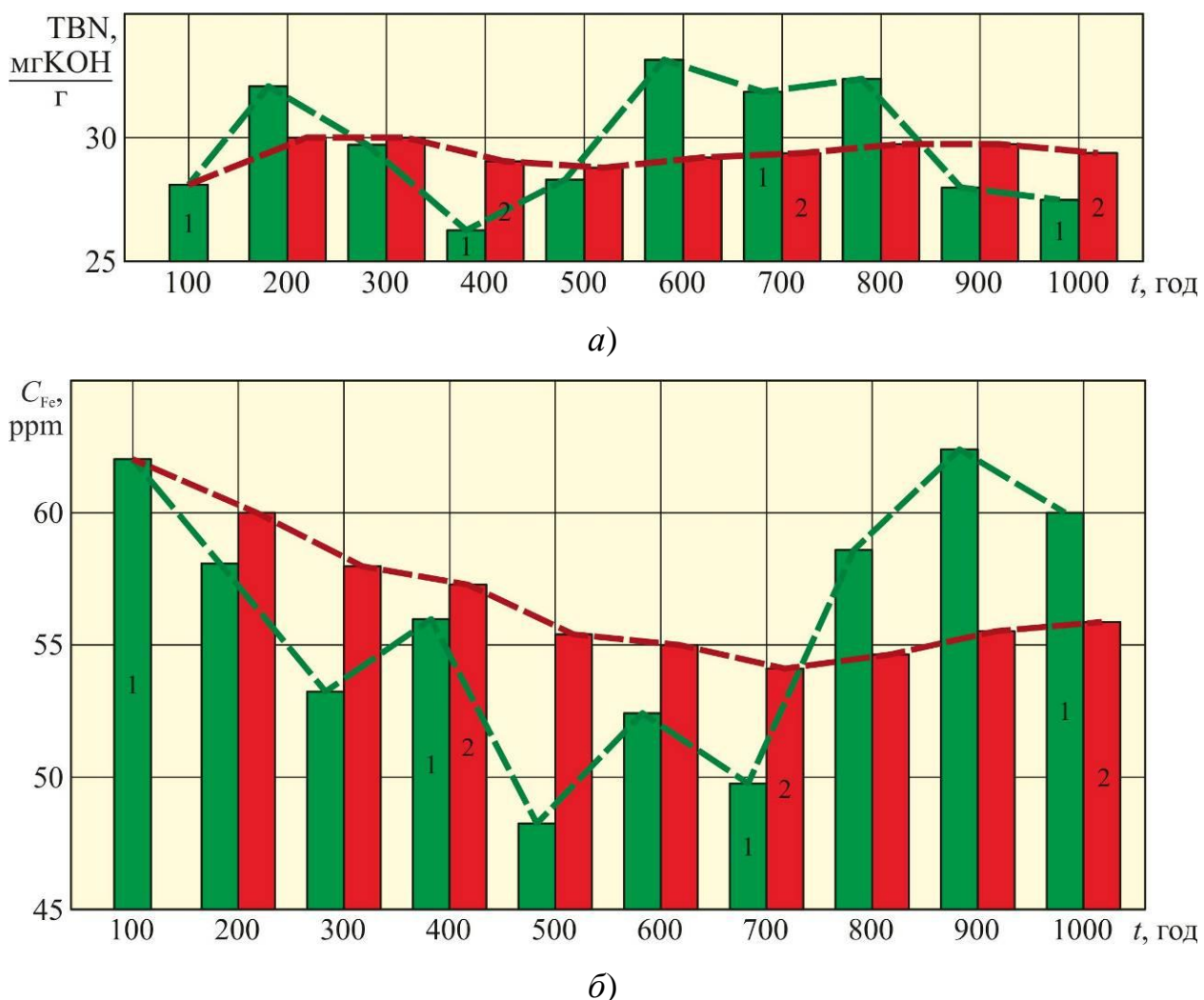


Рис. 5.5. Застосування екстраполяційного прогнозуючого алгоритму з корекцією часового ряду за методом Ейлера:

*а* – загальне лужне число моторного мастила, *б* – концентрація металевих домішок у мастилі:

1 – виміряні значення (відповідно до таблиці 3.2); 2 – кореговані значення

Розбіжності вимірюваних та корегованих значень та дисперсії можуть бути визначені за формулами

$$\Delta_B = Y_B - A_B;$$

$$\Delta_K = Y_K - A_K;$$

$$D_B = \frac{\sum \Delta_B^2}{i_{BP}};$$

де  $Y_B$ ,  $Y_K$  – виміряні та кориговані за методом Ейлера значення діагностичного параметра;

$A_B$ ,  $A_K$  – значення діагностичного параметра, отримані в результаті апроксимації виміряного та коригованого часового ряду;

$D$  – дисперсія;

$i_{BP}$  – кількість вимірів часового ряду [174].

Для оцінки довговічності обладнання з урахуванням можливих змін режимів його експлуатації може бути використаний методологічний підхід, який передбачає реєстрацію хронології зміни контрольованих параметрів та подальше обчислення еквівалентного напрацювання та залишкового ресурсу на основі гіпотези лінійного підсумовування ушкоджень. Суть його полягає в тому, що замість екстраполяції часового ряду вимірних значень діагностичного параметра  $S(t_1)$ ,  $S(t_2)$ ,  $S(t_3)$  пропонується оцінювати темп розвитку дефекту

$$Y = \frac{dZ}{dt}.$$

У разі коли до початку експлуатації об'єкта провести аналітичне та експериментальне дослідження фізико-хімічних механізмів експлуатаційної деградації технічного стану об'єкта, можна отримати в результаті аналітичну залежність темпу розвитку дефекту  $Y$  від параметрів  $X$ , що визначають режим експлуатації об'єкта:

$$Y = f[X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)].$$

Маючи таку функцію й задаючи плановану модель експлуатації об'єкта (тобто функції  $X_1(t)$ ,  $X_2(t)$ , ...,  $X_n(t)$ ), можна прогнозувати очікуваний розмір дефекту  $Z(T)$  за напрацюванням  $T$  і відносно досягнення призначеного ресурсу  $R(T)$  з урахуванням граничного ресурсу  $Z_{\text{гран}}$

$$Z(T) = \int_0^T Y[X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)] dt.$$

$$R(T) = \frac{Z(T)}{Z_{\text{гран}}} \cdot 100\%.$$

Реалізація цього методу передбачає послідовне виконання низки етапів:

- аналіз фізико-хімічних процесів, що спричиняють під час експлуатації об'єкта деградацію його технічного стану, та виділення режимних параметрів, що визначають інтенсивність цієї деградації;
- експериментальне визначення регресійної математичної моделі, що пов'язує темп накопичення експлуатаційних пошкоджень з режимними параметрами;
- завдання передбачуваного на прогнозований період графіка зміни в часі режимів експлуатації об'єкта;
- обчислення за допомогою регресійної моделі накопичень експлуатаційних пошкоджень на кожному з планованих режимів та оцінка сумарного пошкодження протягом прогнозного періоду;
- оцінка залишкового ресурсу шляхом зіставлення обчисленого та гранично допустимого змін технічного стану об'єкта.

### 5.3. Управління експлуатаційними характеристиками моторних мастил систем циліндрового та циркуляційного мащення суднових дизелів

Як було визначено та запропоновано в попередніх розділах, забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів можливо через діагностування експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в його системах мащення (циліндрової – для двотактних дизелів, або циркуляційної – для чотиритактних). При цьому як такі характеристики доцільно використовувати значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{\text{ТВН}}$  та швидкість концентрації металевих домішок у моторному мастилі  $V_{\text{СFe}}$ . Для систем циліндрового мащення ці показники вимірюються та розраховуються для моторного мастила, що потрапляє до підпоршневого простору дизеля, для систем циркуляційного мащення – для мастила, що знаходиться в картері дизеля. Часовий проміжок, коли ці показники потрапляють до критичних, надкритичних або аварійних значень, відповідає технологічній операції з обов'язкового збільшення подачі моторного мастила в циліндр дизеля (для системи циліндрового мащення) або додавання «свіжого» мастила в картер дизеля (для системи циркуляційного мащення). Це сприятиме зниженню інтенсивності окислювальних процесів в циліндрі дизеля (результатом чого стає збільшення значення загального лужного числа моторного мастила, що забезпечує мащення ЦПГ дизеля та потрапляє до підпоршневого простору дизеля – для системи циліндрового мащення, або повертається до картеру дизеля – для системи циркуляційного мащення), а також зменшенню контактних взаємодій та механічних втрат під час забезпечення зворотно-поступального руху поршня та поршневих кілець у циліндрі дизеля або обертального руху валу в підшипниках ковзання (результатом чого стає зменшення вмісту металевих домішок у мастилі).

З метою підтвердження такого способу управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила та забезпечення через це ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів була подовжена серія експериментальних досліджень на суднових двотактних дизелях 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W Yichang Marine Diesel Engine Co. Ltd, а також суднових чотиритактних дизелях 6DE-18 Daihatsu Diesel та 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo.

У системі циліндрового мащення дизелів 6S50ME використовувались моторні мастила Exxon Mobil Mobilgard 540 та Shell Rimula R4X 15W40 (характеристики яких надані в таблиці 3.1). У системі циркуляційного мащення дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel та 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo використовувались моторні мастила Exxon Mobil Mobilgard 412 та Exxon Mobil Mobilgard SHC (характеристики яких надані в таблицях 3.7 та 3.10).

Відповідно до технологічної послідовності, що викладена у пп. 3.3, 3.4, під час досліджень вимірювались та розраховувались наступні експлуатаційні показники моторних мастил: загальне лужне число TBN, швидкість зміни загального лужного числа  $V_{TBN}$ , градієнт швидкості зміни загального лужного числа  $\vec{V}_{TBN}$ , вміст металевих домішок у моторному мастилі  $C_{Fe}$ , швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі  $V_{C_{Fe}}$ . Вказані показники визначались для кожного з дизелів (та, відповідно, кожного з моторних мастил) для за певний проміжок часу. Результати цих експериментів надані в таблицях 5.2, 5.3 (стосовно дизелів 6S50ME та моторних мастил Exxon Mobil Mobilgard 540 та Shell Rimula R4X 15W40) та таблицях 5.3, 5.4 (стосовно дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel, 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo та моторних мастил Exxon Mobil Mobilgard 412, Exxon Mobil Mobilgard SHC). У таблицях 5.2-5.5 жовтим кольором виділені часові ряди, за якими значення контрольованих показників належали до критичних.

Таблиця 5.2

Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила  
 Exxon Mobil Mobilgard 540 системи циліндрового мащення суднового дизеля  
 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W

Час, год	TBN, мгКОН/Г	$V_{\text{TBN}}^{2\tau}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\tau}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$C_{\text{Fe}}, \text{ppm}$	$V_{C_{\text{Fe}}}, \text{ppm/год}$
0	40	—	—	—	—
100	27,3	0,127	—	57,3	—
200	31,3	0,087	0,04	53,2	-0,041
300	30,8	0,092	-0,005	56,8	0,036
400	26,3	0,137	-0,045	64,6	0,078
500	31,5	0,085	0,052	55,8	-0,088
600	30,8	0,092	-0,007	58,3	0,025
700	31,2	0,088	0,004	56,6	-0,017
800	30,6	0,094	-0,006	59,6	0,03
900	26,3	0,137	-0,043	64,7	0,051
1000	31,1	0,089	0,048	57,6	-0,071

Таблиця 5.3

Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила  
 Shell Rimula R4X 15W40 системи циліндрового мащення суднового дизеля  
 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W

Час, год	TBN, мгКОН/Г	$V_{\text{TBN}}^{2\tau}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\tau}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$C_{\text{Fe}}, \text{ppm}$	$V_{C_{\text{Fe}}}, \text{ppm/год}$
0	40	—	—	—	—
100	27,7	0,123	—	56,2	—
200	28,8	0,112	0,011	55,1	-0,011
300	25,2	0,148	-0,036	63,8	0,087
400	31,1	0,089	0,059	56,8	-0,070
500	29,6	0,104	-0,015	58,3	0,015
600	27,3	0,127	-0,023	59,6	0,013
700	29,3	0,107	0,020	56,2	-0,034
800	28,9	0,111	-0,004	57,0	0,008
900	25,1	0,149	-0,038	62,3	0,053
1000	31,6	0,084	0,065	55,6	-0,067

Таблиця 5.4

Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила  
 Exxon Mobil Mobilgard 412 системи циркуляційного мащення суднового  
 дизеля 6DE-18 Daihatsu Diesel

Час, год	ТВН, мгКОН/Г	$V_{\text{ТВН}}^{4\text{т}}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$\bar{V}_{\text{ТВН}}^{4\text{т}}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$C_{\text{Fe}}, \text{ppm}$	$V_{C_{\text{Fe}}}, \text{ppm/год}$
0	20	—	—	9,2	—
50	19,8	-0,004	-0,004	10,6	0,028
100	19,4	-0,008	-0,008	12,1	0,030
150	18,8	-0,012	-0,012	14,1	0,040
200	18,6	-0,004	-0,004	14,8	0,014
250	18,3	-0,006	-0,006	16,6	0,036
300	18,1	-0,004	-0,004	18,0	0,028
350	17,6	-0,01	-0,01	20,3	0,046
400	17,3	-0,006	-0,006	20,9	0,012
450	17,1	-0,004	-0,004	22,2	0,026
500	16,9	-0,004	-0,004	23,3	0,022

Таблиця 5.5

Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила  
 Exxon Mobil Mobilgard SHC системи циркуляційного мащення суднового  
 дизеля 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo

Час, год	ТВН, мгКОН/Г	$V_{\text{ТВН}}^{4\text{т}}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$\bar{V}_{\text{ТВН}}^{4\text{т}}, \frac{\text{мгКОН/Г}}{\text{ГОД}}$	$C_{\text{Fe}}, \text{ppm}$	$V_{C_{\text{Fe}}}, \text{ppm/год}$
0	20	—	—	9,2	—
50	19,8	-0,004	-0,004	10,6	0,028
100	19,4	-0,008	-0,008	12,1	0,030
150	18,8	-0,012	-0,012	14,1	0,040
200	18,6	-0,004	-0,004	14,8	0,014
250	18,3	-0,006	-0,006	16,6	0,036
300	18,1	-0,004	-0,004	18,0	0,028
350	17,6	-0,01	-0,01	20,3	0,046
400	17,3	-0,006	-0,006	20,9	0,012
450	17,1	-0,004	-0,004	22,2	0,026
500	16,9	-0,004	-0,004	23,3	0,022

Як критичні значення для моторних мастил системи циліндрового мащення були прийняті значення  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\text{T}} \geq 0,03 \frac{\text{мгКОН/г}}{\text{год}}$ ;  $V_{\text{C}_{\text{Fe}}} \geq 0,04 \frac{\text{ppm}}{\text{год}}$ ; для

моторних мастил системи циркуляційного мащення  $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\text{T}} \geq 0,09 \frac{\text{мгКОН/г}}{\text{год}}$ ;

$V_{\text{C}_{\text{Fe}}} \geq 0,04 \frac{\text{ppm}}{\text{год}}$ . У разі фіксації критичних значень контрольованих величин

або значень, що перебільшували критичні значення, здійснювалось примусове збільшення подачі мастила в циліндр дизеля, або поповнення обсягу моторного мастила в системі циркуляційного мащення. У першому випадку це забезпечувалось підвищенням дозування моторного мастила за допомогою лубрикатора; у другому – доливанням мастила в картер дизеля до максимального рівня (зазначимо, що ця операція була не обов'язковою, та обсяг мастила в системі знаходився в регламентованому рівні).

Примусове збільшення кількості моторного мастила, що потрапляє до циліндрів дизеля, або знаходиться в об'ємі системі циркуляційного мащення, сприяло покращенню процесів мащення, що виявлялось у зниженні окислювальних процесів та зменшенні контактних взаємодій та механічних втрат. Це підтверджувалось зниженням градієнту швидкості зміни загального лужного числа та швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі у наступний часовий ряд.

Візуалізації розрахункових значень, що наведені в таблицях 5.2-5.5, надана на рис. 5.6-5.9, при цьому червона пунктирна лінія на діаграмах відповідає збільшенню подачі циліндрового мастила в циліндр дизеля (для системи циліндрового мащення дизелів 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W) або доливанню мастила в картер дизеля (для системи циркуляційного мащення дизелів 6DE-18 Daihatsu Diesel, 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo).

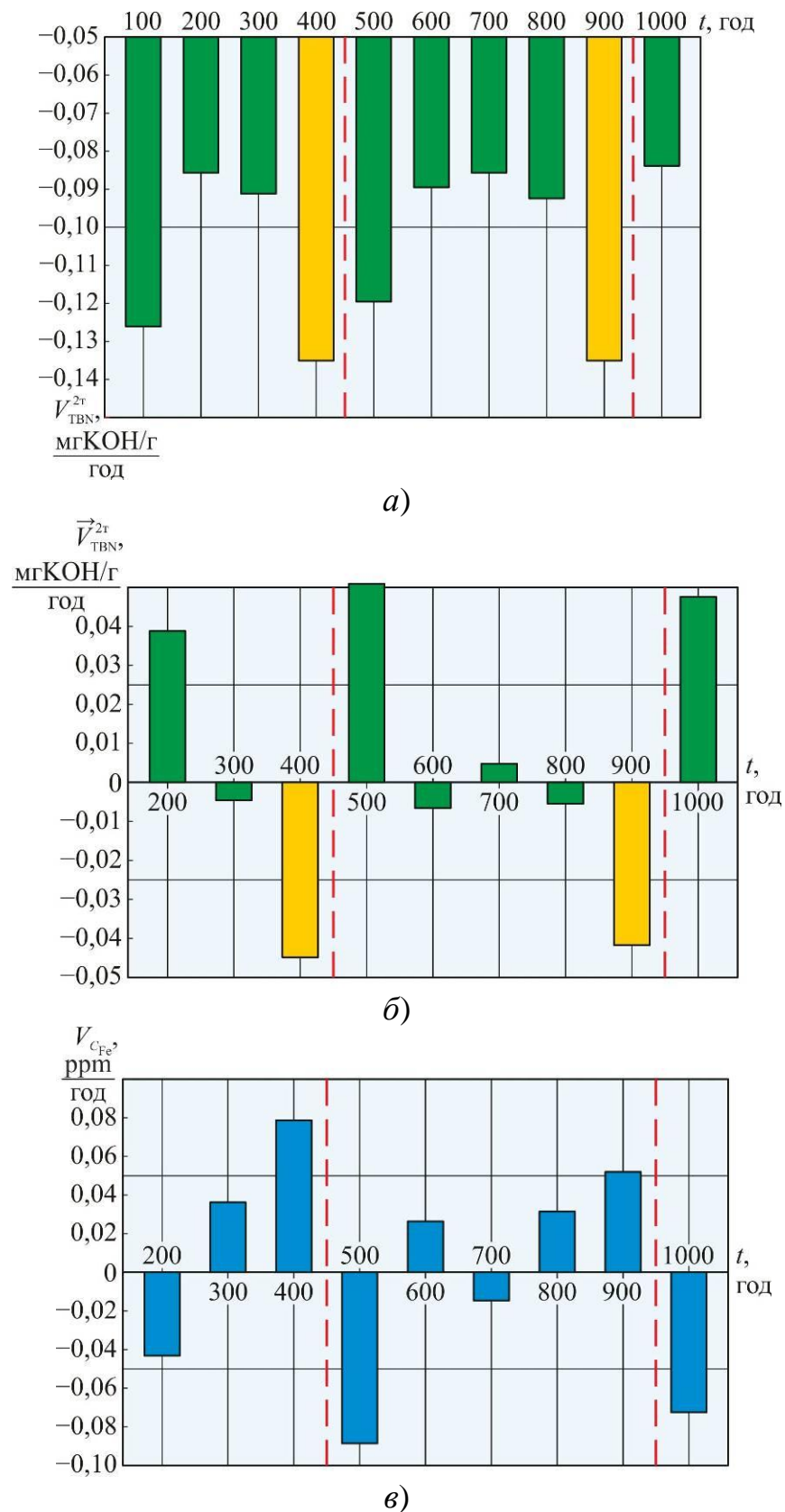
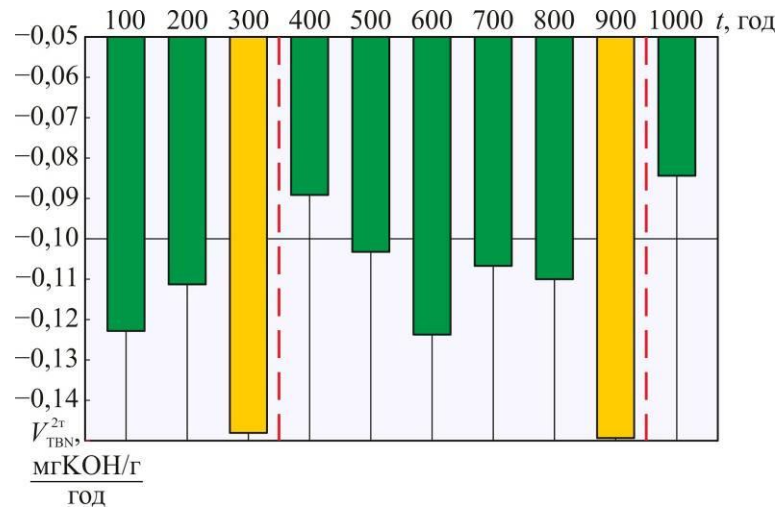
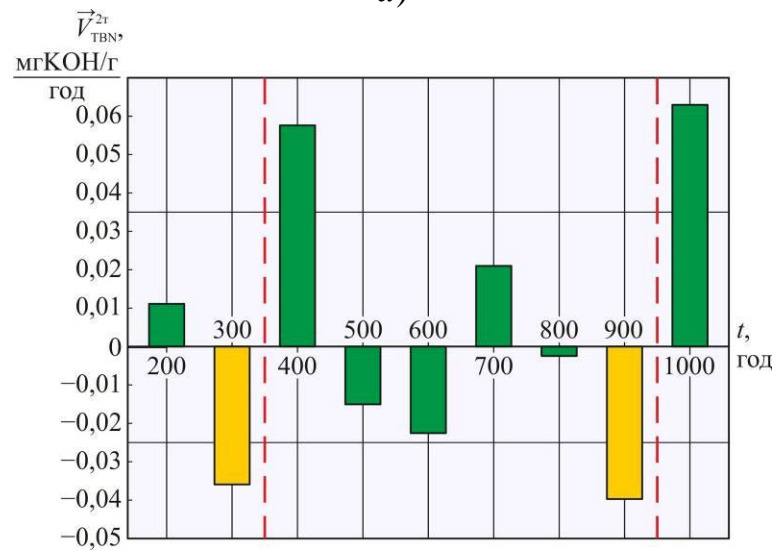


Рис. 5.6. Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила Exxon Mobil Mobilgard 540 системи циліндрового мащення суднового дизеля 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W:

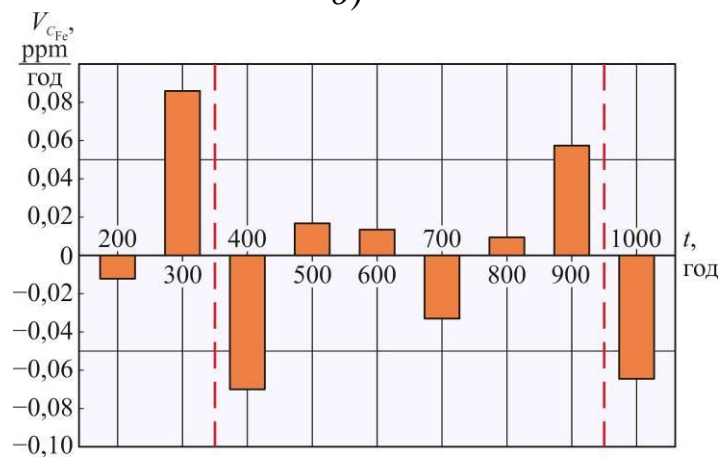
*а* – швидкість зміни загального лужного числа; *б* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; *в* – швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі



а)



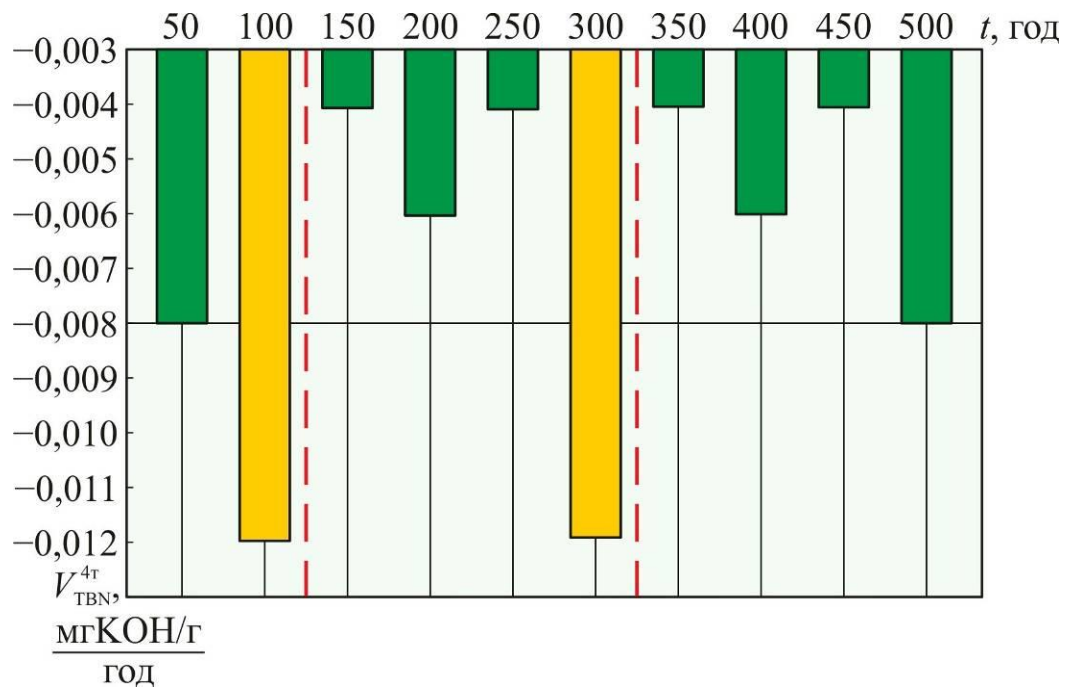
б)



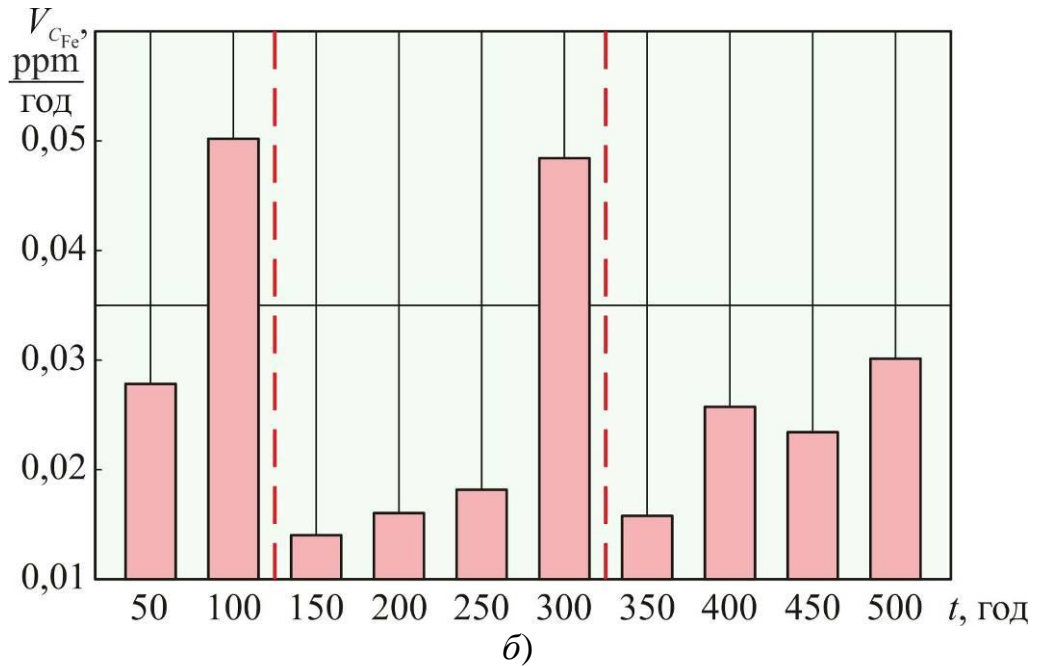
в)

Рис. 5.7. Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила Shell Rimula R4X 15W40 системи циліндрового мащення суднового дизеля 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W:

а – швидкість зміни загального лужного числа; б – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; в – швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі



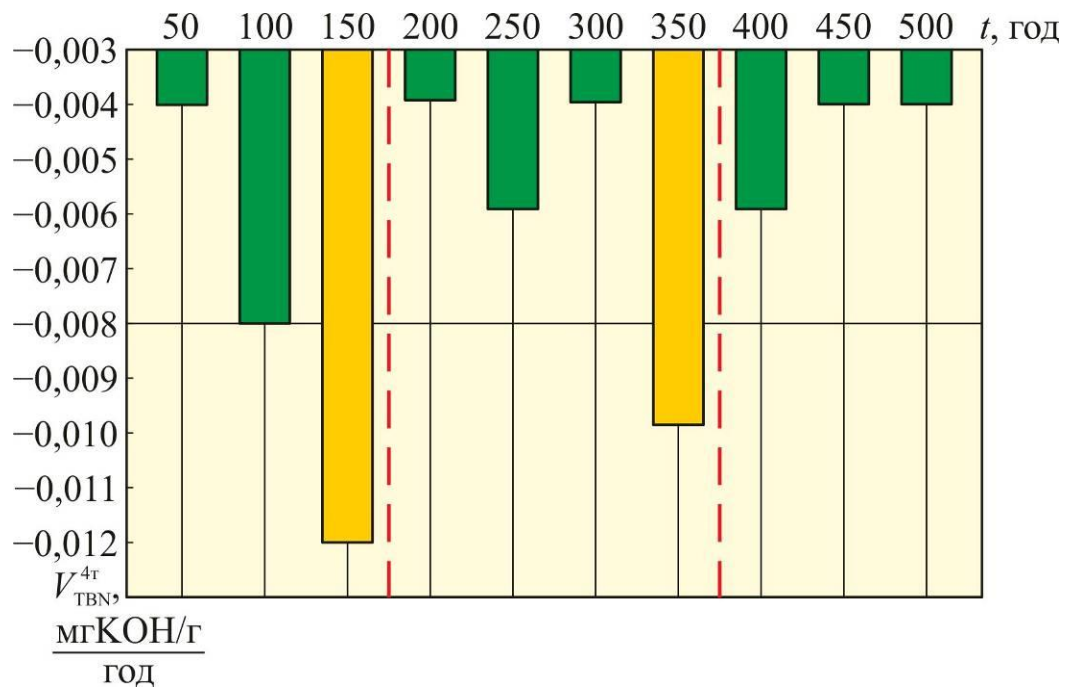
а)



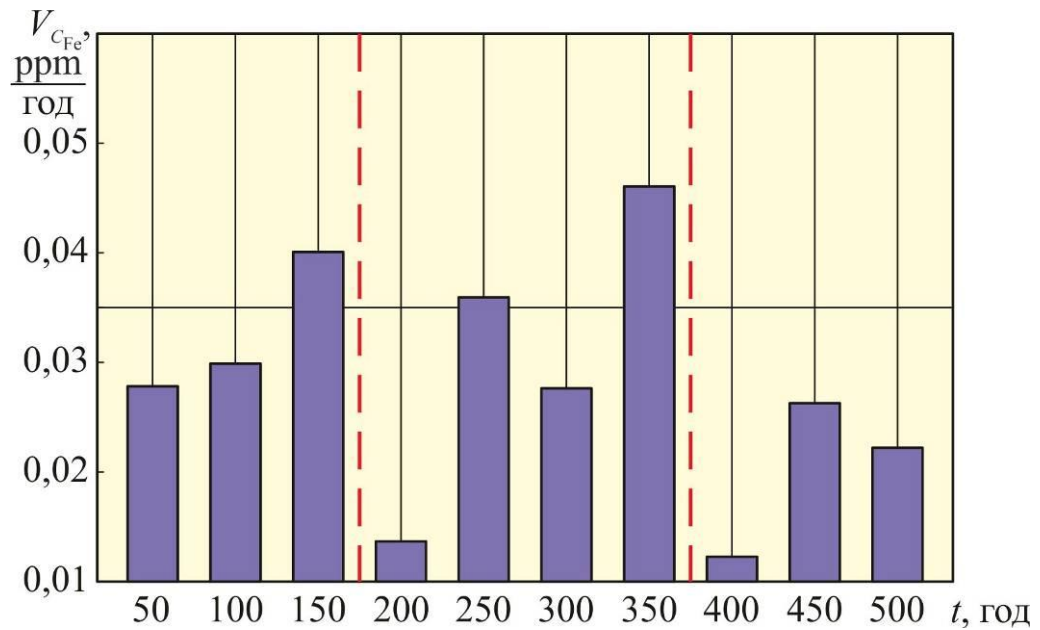
б)

Рис. 5.8. Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила Exxon Mobil Mobilgard 412 системи циркуляційного мащення суднового дизеля 6DE-18 Daihatsu Diesel:

*a* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; *б* – швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі



а)



б)

Рис. 5.9. Управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила Exxon Mobil Mobilgard SHC системи циркуляційного мащення суднового дизеля 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo:

*a* – градієнт швидкості зміни загального лужного числа; *б* – швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі

#### 5.4. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів шляхом діагностики та управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила

Експлуатація суднових дизелів пов'язана з багатьма факторами, до яких перш за все відноситься підтримання в діапазоні, що регламентується фірмою-виробником, основних енергетичних та економічних показників його роботи: середнього індикаторного тиску, ефективної потужності, частоти обертання валу, питомої та годинної витрати палива. Також, відповідно до правил та вимог технічної експлуатації, обов'язковим є підтримання основних параметрів робочого циклу (тиску наприкінці згоряння, максимального тиску згоряння, температури випускних газів), параметрів системи наддуву (тиску повітря після ГТН, температури та вологості повітря в продувному ресивері), параметрів в системах охолодження та мащення (температури прісної води на вході до дизеля, температури мастила на виході з дизеля, тиску мастила на вході до дизеля). Також зазначимо, що інструкції з експлуатації деяких дизелів вимагають контролю та підтримання інших експлуатаційних показників.

Усі фірми-виробники встановлюють гарантований термін експлуатації дизелів, при цьому обов'язково обговорюються умови за якими цей термін може бути досягнутий. Лише суворе виконання цих умов може забезпечити надійну та безаварійну експлуатацію на необхідний ресурс роботи суднових дизелів. До однієї з таких умов є підтримання заздалегідь встановлених показників роботи систем мащення та моторного мастила, яке в них використовується. Відхилення в той чи інший бік експлуатаційних показників моторного мастила, тимчасові або тривалі порушення режимів роботи обладнання систем мащення та умов подачі моторного мастила до контактних поверхонь призводять до погіршення технічного стану дизелів, що виявляється в забрудненні та підвищеному зносі його вузлів та деталей,

погіршенню перебігу робочого процесу в його циліндрах, збільшенню механічних втрат під час перетворення корисної роботи циклу в ефективну потужність, зменшенню енергетичних характеристик допоміжного обладнання або швидкісних характеристик судна. Запобігання цим негативним явищам та збереження ресурсу судових дизелів можливо шляхом постійної діагностики та управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила, що використовується в системах їхнього циліндрового та циркуляційного мащення.

У більшості випадків діагностування стану моторного мастила та оцінка його здібності до виконання покладених на нього функцій мащення та охолодження виконується за значеннями в'язкості, температури спалаху, вмісту води, вмісту механічних домішок та загальному лужному числі. Саме ці показники встановлюються як контрольні в більшості інструкцій та рекомендацій з технічного використання моторних мастил в системах мащення судових дизелів. Зазначимо, що всі згадані показники відображають зміни експлуатаційних характеристик моторного мастила за певний час та, на жаль, не висвітлюють раптове погіршення умов мащення дизелів, пов'язане з короткочасним, але небезпечним відхиленням контрольованих показників від регламентованих значень.

Комплексними науковими та експериментальними дослідженнями, результати яких наведені в дисертаційній роботі, як критерії, за якими більш доцільно та ефективно діагностувати технічний стан судових дизелів, визначені градієнт швидкості зміни загального лужного числа мастила та швидкість зміни концентрації металевих домішок у мастилі. Разом з визначенням технічного стану дизеля ці показники також впливають на ресурс його роботи та, відповідно, визначають його ресурсозберігаючу експлуатацію [175].

Послідовність методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила наведена в вигляді таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Методика ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила, що використовується в системах циліндрового або циркуляційного мащення

Тип системи мащення	
циліндрова	циркуляційна
визначення експлуатаційного режиму дизеля	
визначення експлуатаційних показників моторного мастила відповідно до технічного паспорту на його отримання	
фіксація початкових параметрів моторного мастила, що потрапляє до лубрикатора	фіксація початкових параметрів моторного мастила, що знаходиться в картері дизеля
визначення подачі моторного мастила в циліндр дизеля	визначення кількості моторного мастила в картері дизеля
встановлення часових рядів зі визначення експлуатаційних показників моторного мастила	
встановлення діапазону допустимих, критичних, надкритичних та аварійних значень експлуатаційних показників моторного мастила (відносно швидкості зміни загального лужного числа $V_{\text{ТВН}}$ , градієнту швидкості зміни загального лужного числа $\bar{V}_{\text{ТВН}}$ , швидкості зміни концентрації металевих домішок $V_{\text{СFe}}$ )	
відбір проб моторного мастила з кожного з підпоршневих просторів циліндрів дизеля	відбір проб моторного мастила з 4...6 точок картера дизеля
визначення загального лужного числа моторного мастила ТВН для кожної з відібраних проб	
усереднення отриманих результатів	
порівняння значень загального лужного числа моторного мастила ТВН за окремими циліндрами та середнього значення за всіма циліндрами	порівняння значень загального лужного числа моторного мастила ТВН за окремими пробами та середнього значення за всіма пробами

## Продовження таблиці 5.6

Тип системи мащення	
циліндрова	циркуляційна
визначення швидкості зміни загального лужного числа мастила $V_{\text{TBN}}^{2\tau}$ для кожного з циліндрів дизеля	визначення швидкості зміни загального лужного числа мастила $V_{\text{TBN}}^{4\tau}$
визначення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила $\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\tau}$ для кожного з циліндрів	визначення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\tau}$
порівняння значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила $\vec{V}_{\text{TBN}}$ з діапазоном допустимих, критичних, надкритичних та аварійних значень	
подовження експлуатації дизеля з чинною подачею моторного мастила в циліндр дизеля (у разі допустимого значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила $\vec{V}_{\text{TBN}}^{2\tau}$ ) або збільшення подачі моторного мастила у циліндр дизеля (у разі критичного, надкритичного чи аварійного значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила)	подовження експлуатації дизеля з чинною кількістю моторного мастила системі (у разі допустимого значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила $\vec{V}_{\text{TBN}}^{4\tau}$ ) або додавання моторного мастила в картер дизеля (у разі критичного, надкритичного чи аварійного значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа мастила)
визначення концентрації металевих домішок у моторному мастилі $C_{\text{Fe}}$ для кожної зі відібраних проб	
усереднення отриманих результатів	

Закінчення таблиці 5.6

Тип системи мащення	
циліндрова	циркуляційна
порівняння значень концентрації металевих домішок у моторному мастилі за окремими циліндрами та середнього значення за всіма циліндрами	порівняння значень концентрації металевих домішок у моторному мастилі за окремими пробами та середнього значення за всіма пробами
визначення швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі $V_{C_{Fe}}$ для кожного з циліндрів дизеля	визначення швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі $V_{C_{Fe}}$
порівняння значення швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі $V_{C_{Fe}}$ з діапазоном допустимих, критичних, надкритичних та аварійних значень	
подовження експлуатації дизеля з чинною подачею моторного мастила у циліндр дизеля (у разі допустимого швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі $V_{C_{Fe}}$ ) або збільшення подачі моторного мастила у циліндр дизеля (у разі критичного, надкритичного чи аварійного значення швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі $V_{C_{Fe}}$ )	подовження експлуатації дизеля з чинною кількістю моторного мастила системі (у разі допустимого значення зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі $V_{C_{Fe}}$ ) або додавання моторного мастила у картер дизеля (у разі критичного, надкритичного чи аварійного значення зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі $V_{C_{Fe}}$ )

### 5.5. Мобільне діагностування моторного мастила систем мащення суднових дизелів як метод забезпечення їх ресурсозберігаючої експлуатації

Під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту постійно постає завдання забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів, що на них встановлені та виконують функції головних та допоміжних двигунів. Виникнення цього завдання зумовлюється процесами тертя та зношування, що виникають та відбуваються під час зворотно-поступального руху поршня в циліндрі дизеля та обертального руху колінчатого валу. У першому випадку відбувається знос у трибологічній системі поршневі кільця – втулка циліндра, у другому – у трибологічній системі колінчатий вал – вкладиш підшипника ковзання.

Як визначено в попередніх розділах, найбільш розповсюдженим варіантом діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів, а саме циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників та поверхонь колінчатого валу, є аналіз моторного мастила, що забезпечує мащення цих вузлів. Для суднових двотактних дизелів, що komponуються системами циліндрового мащення, виконується аналіз проб циліндрового (лубрикаторного) мастила, при цьому проби мастила відбираються з підпоршневого простору дизеля. Для чотиритактних дизелів, що мають одну загальну систему циркуляційного мащення (яка забезпечує подачу моторного мастила до циліндрової групи та до підшипників ковзання) виконуються аналіз мастила, проби якого відбираються з картера дизеля. Виконання цих аналізів відбувається або в судновій експрес лабораторії, або в берегових дослідницьких лабораторіях. У першому випадку виконується визначення основних експлуатаційних характеристик моторного мастила – його в'язкості, загального лужного числа та рівня механічних домішок, які потрапили до його обсягу. У другому – виконується більш повний аналіз

моторного мастила, з визначенням вмісту окремих хімічних елементів, що характеризують знос контактних поверхонь та потрапляння до мастила забруднюючих речовин, що утворюються під час згоряння палива. Недолік першого методу – обмежена інформація щодо стану моторного мастила. Недолік другого – відносна тривалість часу від відправлення проб мастила до дослідницької лабораторії до моменту отримання результатів аналізу.

Сучасні засоби діагностування надають можливість проведення безпосередньо на судні під час здійснення навігаційних переходів поширеного аналізу стану та експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в системах мащення суднових дизелів. Прикладом цього є результати досліджень, що виконувались на спеціалізованому судні дедвейтом 9600 тонн до складу енергетичної установки якого входили судові дизелі 6R26 Wartsila. Основні характеристики дизелів наведені у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

## Основні характеристики судового дизеля 6R26 Wartsila

Показник, позначення, розмірність	Чисельне значення
Діаметр циліндру, $d$ , мм	260
Хід поршню, $s$ , мм	320
Частота обертання, $n$ , об/хв	900
Механічний коефіцієнт корисної дії у діапазоні навантаження 90...95 %, $\eta_m$ , %	0,89...0,90
Коефіцієнт корисної дії генератору, $\eta_{ег}$ , %	0,95...0,96
Діапазон в'язкості палива, рекомендованого до використання, $\nu$ , сСт за 50°C	до 730
Питома витрата палива для експлуатаційних режимів, що відповідають діапазону навантаження 35...95 %, $b_e$ , г/(кВт·год)	192...186
Ефективна потужність, $N_e$ , кВт	1950

Під час експлуатації дизелів з метою забезпечення процесу мащення його основних елементів використовувалось моторне мастило Castrol 15W20.

Зміна експлуатаційних характеристик мастила контролювалась членами судової машинної команди за допомогою діагностичного обладнання фірми Unitor. При цьому визначались кінематична в'язкість, загальне лужне число, вміст води та загальний вміст механічних домішок. Періодичність контролю вказаних показників коливалась в діапазоні 4...24 години та залежала від експлуатаційних режимів роботи дизелів та результатів попередніх вимірювань. Експрес діагностування експлуатаційних характеристик мастила дозволяло робити висновки про роботу очисного обладнання (мастильних фільтрів та мастильного сепаратора), перебіг робочого процесу (вдосконаленості процесів згоряння), ефективність роботи та налаштування паливної апаратури високого тиску, а також технічний стан контактних поверхонь дизеля (поршневих кілець, циліндрових втулок, вкладишів підшипників ковзання). За результатами експрес аналізу приймалися рішення щодо зміни режимів мащення та охолодження, переналаштування паливної апаратури, а також поповнення об'єму моторного мастила [176, 177].

Після кожних 500 годин експлуатації виконувався відбір проб моторного мастила з метою його подальшого аналізу в береговій дослідницькій лабораторії. Основними показниками, які при цьому визначались, були компоненти мастила, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля та відносяться до категорії Wear Elements (якими є Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb), а також такі, що характеризують забруднення моторного мастила та відносяться до категорії Contaminant Elements (якими є B, Na, Si, V, Mo, Ni). Як правило, визначення та відсотковий вміст цих елементів в моторному мастилi виконується шляхом спектрального аналізу.

Як було вказано раніше, недоліком контролю показників в береговій дослідницькій лабораторії є певна затримка отримання його результатів. У деяких випадках (до яких може бути віднесені порушення в логістиці між судном та дослідницької лабораторії, тимчасова завантаженість лабораторії,

тривале знаходження судна в районах обмеженого зв'язку та комунікації) це може привести до затримання інформації та несвоєчасне прийняття управлінських рішень або виконання відповідних технологічних операцій.

Через це, як додатковий спосіб контролю експлуатаційних характеристик мастила безпосередньо на судні та, відповідно, більш швидкого отримання результатів, виконувався аналіз спектрів горіння моторного мастила. Цей спосіб дозволяє визначити основні складові моторного мастила, у тому числі вказані раніше хімічні елементи, які характеризують знос контактних поверхонь та забруднення моторного мастила. З цією метою використовувався спектральний газовий аналізатор FlirX6530sc з вбудованою інфрачервоною камерою контролю. При цьому забезпечувався контроль таких самих характеристик (Wear Elements та Contaminant Elements), визначення яких виконувалось у береговій дослідницькій лабораторії. Результати виконаних досліджень наведено на рис. 5.10, 5.11.

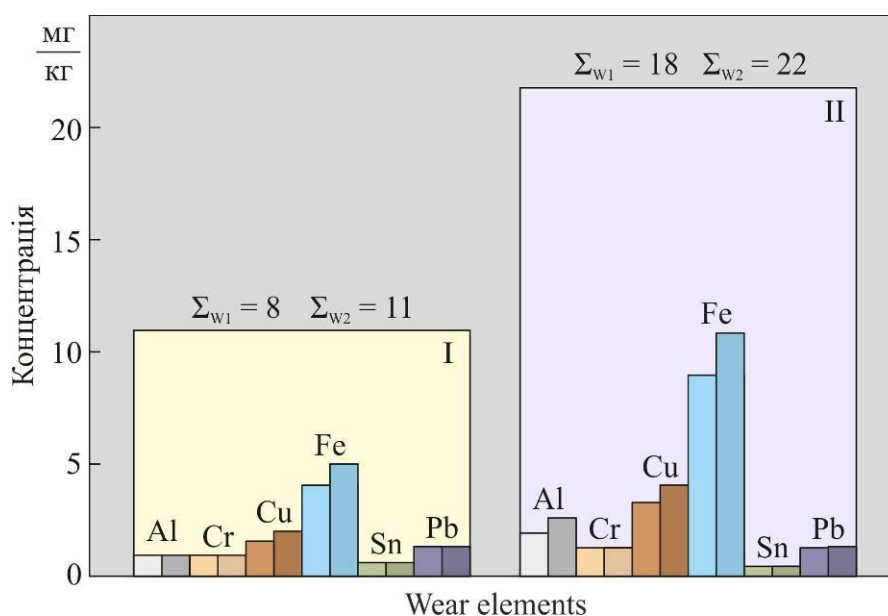


Рис. 5.10. Вміст механічних домішок у моторному мастилі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: I – після 500 годин; II – після 1000 годин;

$\Sigma_{w1}$  – вимірювання на судні;  $\Sigma_{w2}$  – вимірювання в лабораторії

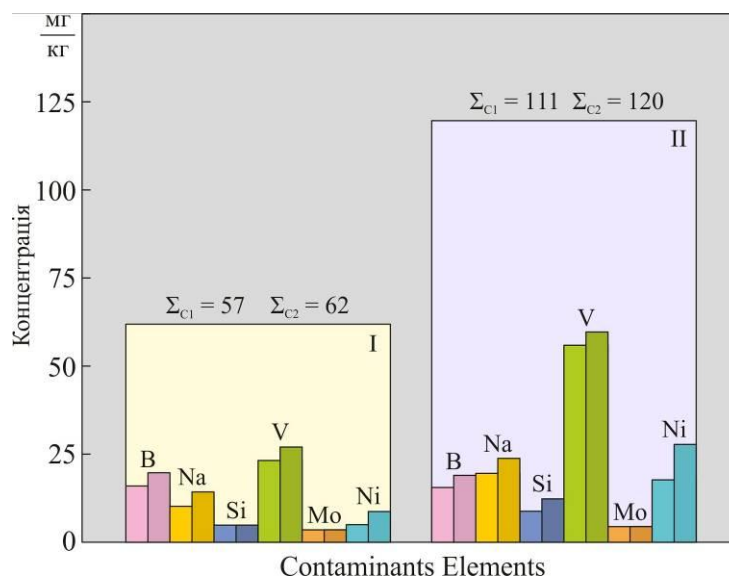


Рис. 5.11. Вміст забруднюючих речовин у моторному мастилі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: I – після 500 годин; II – після 1000 годин;  
 $\Sigma_{C1}$  – вимірювання на судні;  $\Sigma_{C2}$  – вимірювання у лабораторії

На рис. 5.10, 5.11 з парних стовпчиків, що відповідають вмісту в моторному мастилі механічних домішок (Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb) та забруднюючих речовин (B, Na, Si, V, Mo, Ni), перший відповідає вимірюванням, які виконувались у береговій дослідницькій лабораторії, другий – які виконувались на судні з використанням спектрального газового аналізатору FlirX6530sc.

Збіг результатів діагностування стану моторного мастила, що виконувався за допомогою запропонованого спектрального газового аналізатору та результатів, що були отримані під час досліджень у береговій лабораторії, дозволяє рекомендувати метод визначення експлуатаційних характеристики моторного мастила за допомогою судового спектрального газового аналізатору як метод попереднього аналізу. Результати, які при цьому можуть бути отримані, з високою точністю характеризують показники моторного мастила. Безпосередньо метод діагностування моторного мастила за допомогою газового аналізу сприяє забезпеченню ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів.

## 5.6. Висновки за розділом 5

Як результат досліджень, що виконані у розділі 5, визначимо наступне.

1. Одним із типових методів розрахункової оцінки показників надійності та, зокрема, ресурсозберігаючої експлуатації дизелів суден морського транспорту є застосування масиву статистичних даних, що узагальнюють результати тривалих випробувань однотипних вузлів чи деталей. При цьому разом з поточним контролем та діагностуванням експлуатаційних показників повинен передбачатися статистичний аналіз та прогнозування цих показників з урахуванням згладжування їхніх окремих значень протягом відповідних часових рядів. Даний алгоритм сприяє попередженню виникнення критичних відхилень контрольованих показників, якими для забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів є градієнт швидкості зміни загального лужного числа та швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі.

2. Запропонована система моніторингу технічного стану судових дизелів на основі аналізу послідовних даних (задачі є загальне лужне число моторного масла й кількість металевих домішок, які в ньому знаходяться – що вимірюються безпосередньо під час аналізу моторного мастила) виконує розрахунок градієнта зміни швидкості загального лужного числа та швидкості зміни концентрації металевих домішок. З появою критичного чи надкритичного відхилення цих величин починається процедура прогнозування технічного стану. При цьому система аналізує попередні тимчасові ряди з метою визначення збігу відхилень з аналогічними значеннями попередніх часових рядів та створює управляючу на процес мащення основних контактних вузлів дизелів суден морського транспорту.

3. Встановлення діапазону допустимих, критичних, надкритичних та аварійних значень експлуатаційних показників моторного мастила (відносно швидкості зміни загального лужного числа, градієнту швидкості зміни

загального лужного числа, швидкості зміни концентрації металевих домішок); встановлення часових рядів зі визначення експлуатаційних показників моторного мастила забезпечили розробку методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила, що використовується в системах циліндрового або циркуляційного мащення.

4. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів можливе завдяки діагностуванню експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в його системах мащення (циліндрової – для двотактних дизелів, або циркуляційної – для чотиритактних). При цьому як такі характеристики доцільно використовувати значення градієнту швидкості зміни загального лужного числа та швидкість концентрації металевих домішок у моторному мастилi. Часовий проміжок, коли ці показники потрапляють до критичних, надкритичних або аварійних значень, відповідає технологічній операції з обов'язкового збільшення подачі моторного мастила в циліндр дизеля (для системи циліндрового мащення) або додавання «свіжого» мастила в картер дизеля (для системи циркуляційного мащення).

5. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів здійснюється шляхом моніторингу та подальшого управління експлуатаційними характеристиками моторних мастил, що використовуються в їхніх системах циліндрового та циркуляційного мащення (а саме, градієнтом зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкістю зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилi).

## ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми – забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів суден морського транспорту.

Моторне мастило, що використовується в системах циліндрового та циркуляційного мащення судових дизелів, є однією з надважливих складових, що впливають, забезпечують та гарантують ресурс їхньої роботи, а також сприяють підтриманню їхніх енергетичних та економічних показників та технічного стану.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є визначення методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів, яка, на відміну від існуючих, заснована на діагностуванні та подальшому управлінні експлуатаційними характеристиками моторного мастила систем циліндрового та циркуляційного мащення, якими є градієнт швидкості зміни загального лужного числа та швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилi.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Під час експлуатації моторного мастила (як будь-якої робочої речовини, що використовується в дизелях суден морського транспорту) здійснюються постійні зміни його експлуатаційних характеристик – ці зміни здійснюються в негативний бік та характерні для моторних мастил як для циліндрових, так і для циркуляційних систем мащення.

Загальне лужне число моторного мастила та значення концентрації металевих домішок у моторному мастилi, як найбільш визнані показники моторного мастила, за якими здійснюється оцінка його функціональності, характеризують поточний стан процесу мащення контактних вузлів судового дизеля та не надають оцінки його комплексному перебігу. Для виконання такої оцінки найбільш доцільним є визначення швидкості зміни

цих показників, а також градієнту швидкості зміни загального лужного числа.

2. Швидкість зміни загального лужного числа моторного мастила характеризується негативними значеннями для всіх режимів та інтервалів експлуатації дизелів. Збільшення швидкості зміни загального лужного числа свідчить про виникнення додаткових процесів та явищ, що призвели до підвищення кислотного середовища в циліндрі дизеля та, відповідно, до зменшення загального лужного числа моторного мастила на певних проміжках часу.

3. Для систем циліндрового мащення поточне та попереднє зменшення загального лужного числа під час експлуатації характеризується коливальним характером. Через це коливальним характером характеризується також швидкість зміни загального лужного числа. Поточне значення цієї величини порівняно з попереднім може змінюватися або в бік зменшення, або в бік збільшення за певний проміжок часу. Це дає підставу для оцінки процесу мащення ввести додаткове поняття «градієнт швидкості зміни загального лужного числа». Позитивні значення цієї величини відповідають уповільненню зменшення загального лужного числа (та, відповідно, зменшенню окислювальних процесів в циліндрі дизеля та покращення перебігу процесу мащення), негативні – прискоренню зменшення загального лужного числа (та, відповідно, погіршенню перебігу процесу мащення). Саме «градієнт швидкості зміни загального лужного числа» є показником, що може бути прийнятий як якісний критерій моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів.

4. Через збіг динаміки зміни вмісту в мастилi компонентів, що характеризують знос його трибосполучень, а також потрапляння до мастила забруднюючих речовин, з градієнтом швидкості зміни загального лужного числа мастила саме градієнт швидкості зміни загального лужного числа рекомендується як параметр, за яким доречно виконувати експрес-

діагностику технічного стану трибосполучень дизелів суден морського транспорту. До таких трибосполучень перш за все відносяться поршневі кільця та втулка циліндра, а також вкладиш підшипника та колінчатий вал. Збільшення градієнту швидкості зміни загального лужного відповідає збільшенню концентрації в мастилi компонентів, що характеризують знос саме цих елементів дизеля.

5. Швидкість зміни вмісту металевих домішок у моторному мастилi може приймати як позитивні, так і негативні значення. Позитивні значення відповідають режимам тертя, у результаті яких збільшується знос контактних поверхонь (циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників) що відбиваються в підвищенні кількості металевих домішок у пробах моторного мастила та призводить до зменшення ресурсу судового дизеля. Негативні значення свідчать про зменшення металевих домішок у моторному мастилi порівняно з попереднім вимірюванням та характеризують зменшення зносу контактних поверхонь за цей період. Саме «швидкість зміни вмісту металевих домішок у моторному мастилi» є показником, що може бути прийнятий як кількісний критерій моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів.

6. Термодинамічні режими експлуатації судових дизелів та елементарний склад палива, що використовується в дизелі для отримання корисної роботи, впливають на експлуатаційні показники моторного мастила та технічний стан дизелів й через це призводять до зміни їхніх ресурсозберігаючих показників.

Ефективність експлуатації циркуляційних систем мащення судових чотиритактних дизелів залежить як від параметрів безпосередньо в системі мащення (тиску, температури, в'язкості та лужного числа мастила), також і від параметрів в системі охолодження циліндрів дизеля. У рекомендованому діапазоні температур охолоджуючої води існують оптимальні значення, за якими підтримується термодинамічна рівновага в комплексі паливо – продукти згоряння – мастило – деталі дизеля, що сприяє зменшенню зносу

циліндрових втулок та поршневих кілець та відображається меншою концентрацією в моторному мастилі елементів, що впливають на знос деталей дизеля та на забруднення мастила.

7. Встановлення діапазону допустимих, критичних, надкритичних та аварійних значень експлуатаційних показників моторного мастила (відносно швидкості зміни загального лужного числа, градієнту швидкості зміни загального лужного числа, швидкості зміни концентрації металевих домішок); встановлення часових рядів з визначення експлуатаційних показників моторного мастила забезпечили розробку методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила, що використовується в системах циліндрового або циркуляційного мащення.

8. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів здійснюється шляхом моніторингу та подальшого управління експлуатаційними характеристиками моторних мастил, що використовуються в їхніх системах циліндрового та циркуляційного мащення (а саме, градієнтом зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкістю зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі).

9. Наведені в дослідженні теоретично обґрунтовані та експериментально підтвержені наукові результати мають суттєву практичну значимість. Доведена можливість управління експлуатаційними характеристиками суднових моторних мастил, що використовуються в системах циліндрового та циркуляційного мащення суднових дизелів забезпечує гарантований фірмою-виробником ресурс роботи суднових дизелів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A., Zablotskyi Yu. V., Gaichenia O. V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7
2. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
3. Mohamed Ariffin N.A.A., Poy J., Wong K.J., Ng J.-H., Chong W.W.F. Stability and Tribological Performance of Water-Emulsified Engine Oils for Hydrogen-Fuelled Internal Combustion Engines // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 464. <https://doi.org/10.3390/lubricants13100464>.
4. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shcherbina O., Vasalatii N. Simulation-based method for predicting changes in the ship's seaworthy condition under impact of various factors // *Stud. Syst. Decis. Control*. – 2023. – Vol. 481. – P. 653-664. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_37).
5. Budashko V., Shevchenko V. The Synthesis Of Control System To Synchronize Ship Generator Assemblies // *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* – 2021. – Vol. 1. – P. 45-63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225517>.
6. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines // *Pol. Marit. Res.* – 2022. – Vol. 29. – P. 88-96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
7. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine

Diesel Engines. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11(1), 120.  
<https://doi.org/10.3390/jmse11010120>

8. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

9. Budashko V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes // Int. J. of energy and environment. – 2020. – Vol. 14. – P. 5-8. doi: 10.46300/91012.2020.14.2.

10. Onyshchenko S., Shibaev O., Melnyk O. Assessment of potential negative impact of the system of factors on the ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargoes // Trans. Mar. Sci. – 2021. – Vol. 10. – P. 126-134. <https://doi.org/10.7225/toms.v10.n01.009>.

11. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5(1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>

12. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Pířtřek V., Kuřcera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>

13. Dong X., Che X., Tian Z. Contact and Non-Contact Measurements of Chlorophyll-a in Water Based on Laser Spectroscopy // J. Mar. Sci. Eng. – 2025. – Vol. 13. – P. 293. <https://doi.org/10.3390/jmse13020293>.

14. Timmapuram V.S., Dogra S., Kotia A. AI-Driven Rheological and Tribological Performance Modeling of Transmission Oil Blended with Castor Oil and Enhanced with CeO<sub>2</sub> and MWCNTs Additives for Sustainable Lubrication Systems // Lubricants. – 2025. – Vol. 13. – P. 523. <https://doi.org/10.3390/lubricants13120523>

15. Morhard B., Lohner T., Stahl K. Scuffing Calculation of Cylindrical Gears Facing Loss of Lubrication // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 484. <https://doi.org/10.3390/lubricants13110484>

16. Тимощук О.М., Левченко О.В. Аналіз та обґрунтування методів зниження викидів оксидів азоту атмосфери судновими енергетичними установками // *Водний транспорт: збірник наукових праць*. – 2025. – № 3(44). – С. 40-46. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.05](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.05).

17. Тимощук О.М., Левченко О.В. Дослідження методів зниження викидів оксидів сірки в атмосферу // *Водний транспорт: збірник наукових праць*. – 2025. – № 3(44). – С. 116-122. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.11](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.11).

18. Варбанець Р.А., Мінчев Д.С., Залож В.І. Аналіз циклової нерівномірності для суднових дизельних двигунів в режимі реального часу // *Водний транспорт: збірник наукових праць*. – 2025. – № 1(42). – С. 37-45. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06).

19. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40*. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 5-11. DOI : [10.31653/smf340.2020.5-11](https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-11).

20. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // *Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць*, 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. [doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96](https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-87-96).

21. Сагін С.В., Кривий М.О. Визначення розподілу тиску в шарі неньютонівських мастил у суднових енергетичних установках // *Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць*, 2020. – № 2(62). – С. 160-170. DOI [10.47049/2226-1893-2020-1-160-170](https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-160-170).

22. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*.

Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

23. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.

24. Alshammari S., Harvey T., Wang S. Comparative Study of the Tribological Properties of MoSe<sub>2</sub> Coatings Under Dry and Oil-Lubricated Sliding Conditions // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 467. <https://doi.org/10.3390/lubricants13110467>.

25. Zhong X., Tian T. Oil Transport Simulation and Oil Consumption Prediction with a Physics-Based and Data-Driven Digital Twin Model for Internal Combustion Engines // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 463. <https://doi.org/10.3390/lubricants13100463>.

26. Liñeira del Río J.M., Aourdou A., García-Marquínez G., Amado J.M., Tobar M.J. Deep Eutectic Solvents as Green and Novel Lubricant Additives for Castor Oil with High Tribological Performance // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 456. <https://doi.org/10.3390/lubricants13100456>.

27. Johns-Rahnejat P.M., Rahmani R., Rahnejat H. Current and Future Trends in Tribological Research // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11. – P. 391. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090391>.

28. Голубева С.М., Бойко С.О. Метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою // *Водний транспорт: збірник наукових праць*. – 2024. – № 3(41). – С. 167-177. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.18](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.18).

29. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

30. Maryanov D. Control and regulation of the density of technical fluids during their transportation by sea specialized vessels // *Technology Audit and*

Production Reserves. – 2022. – № 1 (2(63)). – P. 19–25. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252336>.

31. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 2(1(64)). – С. 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

32. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 5(1(67)). – P. 22–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>

33. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuřcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10(10), 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>

34. Коваленко І.В., Богач В.М., Мельник О.А., Лебедев Б.В. Вплив навантаження на надійність суднових механізмів і агрегатів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 116-123. DOI: 10.31653/smf45.2022.116-123.

35. Козицький С.В., Дем'яненко І.А. Використання наночастинок оксиду титану (IV)  $TiO_2$  для покращення трибологічних властивостей змащувального мастила // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 134-144. DOI: 10.31653/smf45.2022.134-144.

36. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.

37. Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.

38. Богач В.М., Обертюр К.Л, Довіденко Ю.М. Аналіз умов подачі мастила в циліндри судових ДВЗ // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 15-16. DOI: 10.31653/smf46.2023.5-16.

39. Микоїд Г.В., Корбан В.Х. Підвищення якості контролю циркуляційного мастила високообертового дизеля способом поляризації // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 71-77. DOI : 10.31653/smf341.2020. 71-77.

40. Шерстяников К.А., Кардаш В.П. Управління процесами тертя в судових допоміжних механізмах // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 104-109. DOI : 10.31653/smf341.2020.104-109.

41. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 - 119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

42. Мацкевич Д.В. Забезпечення реологічної стійкості судових моторних мастил // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 17-23. DOI : 10.31653/smf340.2020.17-23.

43. Мацкевич Д.В. Регенерація експлуатаційних властивостей моторних мастил судових дизелів // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 121-130. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-121-130.

44. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – С. 157-171. doi: 10.31653/smf47.2023.157-171.

45. Кривий М.О., Сагін С.В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання судових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 18 - 24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24

46. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз ефективності використання в судових дизелях палив різного фракційного та структурного складу // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 31-42. doi: 10.31653/smf45.2022.31142-42.

47. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

48. Lovska A., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10(16). –P. 5710. <https://doi.org/10.3390/app10165710>.

49. Lu Y., Gu Z., Liu S., Wu C., Shao W. Li C. Research on Main Engine Power of Transport Ship with Different Bows in Ice Area According to EEDI Regulation // J. Mar. Sci. Eng.– 2021. – Vol. 9.– P. 1241). <https://doi.org/10.3390/jmse9111241>.

50. Agocs A., Frauscher M., Ristic A., Dörr N. Impact of soot on internal combustion engine lubrication-oil condition monitoring, tribological properties, and surface chemistry // Lubricants.– 2024. – Vol. 12. – P 401. <https://doi.org/10.3390/lubricants12110401>.

51. Лихогляд К.А., Разінкін Р.О., Журавльов С.В. Альтернативні види палива. Метанол та диметиловий ефір у якості замінників палива для ДВЗ // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 3-4 грудня 2020 р. – С. 253-256. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/12/tezy041220.pdf>.

52. Разінкін Р.О. Особливості експлуатації двохтактних малооборотних ДВЗ на ULSFO (<0.1% S) // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 28 червня 2021 року. – С. 71-73.

53. Fomin O., Lovska A., Kučera P., Pištěk V. Substantiation of improvements for the bearing structure of an open car to provide a higher security during rail/sea transportation // J. Mar. Sci. Eng. – 2021. Vol. 9(8). – P. 873. <https://doi.org/10.3390/jmse9080873>.

54. Du C., Sheng C., Liang X., Rao X., Guo Z. Effects of Temperature on the Tribological Properties of Cylinder-Liner Piston Ring Lubricated with Different Oils // Lubricants. – 2023. – Vol. 11. – P. 115. <https://doi.org/10.3390/lubricants11030115>.

55. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Kalinichenko Y., Rossomakha O., Naleva G., Rossomakha O. Autonomous ships concept and mathematical models application in their steering process control // TransNav. – 2022. – Vol. 16(3). – P. 553-559. <https://doi.org/10.12716/1001.16.03.18>.

56. Khan A.A., Minai A.F., Pachauri R.K., Malik H. Optimal Sizing, Control, and Management Strategies for Hybrid Renewable Energy Systems: A Comprehensive Review // Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 6249. <https://doi.org/10.3390/en15176249>.

57. Nothnagel R.M., Boidi G., Franz R., Frauscher M. Assessing the potential of bio-based friction modifiers for food-grade lubrication // Lubricants. – 2024. – Vol. 12(7). – P. 247. <https://doi.org/10.3390/lubricants12070247>.

58. Богач В.М., Довиденко Ю.М., Слободянюк І.М. Недоліки лубрикаторних систем суднових двигунів MAN-B&W // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 149-156. DOI : 10.31653/smf341.2020.149-156.

59. Богач В.М., Слободянюк І.М., Довіденко Ю.Н. Аналіз умов подачі масла в циліндри дизелів морських суден // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 42. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 16-24. DOI : 10.31653/smf42.2021.16-24.

60. Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз показників системи діагностування моторного мастила суднових довгоходових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 94-106. DOI: 10.31653/51.2025.94-106.

61. Россомаха О.А., Пізінцалі Л.В., Россомаха О.І., Александровська Н.І. Аудитивні технології у суднобудуванні та судноремонті: світовий досвід та перспективи впровадження в Україні // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2025. – № 3(44). – С. 56-79. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.07.

62. Тарасенко Т.В., Мазур Т.М. Основні методи моніторингу для управління енергоефективністю на судні згідно додатку VI МК МАРПОЛ73/78 // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2025. – № 2(43). – С. 117-121. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.10.

63. Разінкін Р.О. Контроль технічного стану циліндрової групи суднових малообертових дизелів // V науково-технічна конференція молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», 26.11.2025 – Одеса: НУОМА, 2025. – С.46-48. <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/IandTMIWT-2025.26.11.25.pdf>.

64. Zhao E., Zhang G., Li Q., Zhu S. Impact of High-Concentration Biofuels on Cylinder Lubricating Oil Performance in Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engines // J. Mar.Sci. Eng. – 2025. – Vol. 13. – P. 1189. <https://doi.org/10.3390/jmse13061189>.

65. Wang J., Teng D., Fan J., Zhang X., Cui Q., Li K., Liew P.J. Investigation of 1,3-Diketone and Nano-Copper Additives for Enhancing Boundary Lubrication Performance // J. Mar. Sci. Eng. – 2025. – Vol. 13. – P. 912. <https://doi.org/10.3390/jmse13050912>

66. Wu D., Xie Y., Wang C., Gu X., Gu F., Li G., Zhang H., An Y., Li R., Gu C. A Method for Aliasing Metal Particle Recognition Based on Three-Coil Sensor Using Frequency Conversion // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2024. – Vol. 12. – P. 2273. <https://doi.org/10.3390/jmse12122273>

67. González-Meza G.M., Rubio-Hernández C.C., López-Pacheco, I.Y., López-Pacheco L.D., Marín-Santibáñez B.M., Medina-Bañuelos E.F., Melchor-Martínez E.M., Farfan-Cabrera L.I. Evaluation of Sargassum spp. Oil as a Potential Additive for Biolubricant Formulations // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2024. – Vol. 12. – P. 2242. <https://doi.org/10.3390/jmse12122242>

68. Тимощук О.М., Шапран Ю.Є. Аналіз методів та засобів нейтралізації вібрації суднового дизель-генератора // *Водний транспорт: збірник наукових праць.* – 2025. – № 1(42). – С. 61-72. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09).

69. Захарченко Л.Л., Остапчук Т.В. Моделювання та управління судовими енергетичними установками на основі інтелектуальних технологій // *Водний транспорт: збірник наукових праць.* – 2025. – № 1(42). – С. 195-202. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.22](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.22).

70. Бузовський В.А., Богач В.М., Драгомир М.В. Тенденції розвитку лубрикаторних систем судових дизелів // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 42. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 25-34. DOI : [10.31653/smf42.2021.25-34](https://doi.org/10.31653/smf42.2021.25-34).

71. Сагін С.В., Бондар С.А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації судових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник.* – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 101-109. doi: [10.31653/smf46.2023.101-109](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.101-109).

72. Zhuravlov Yu.I., Melnik A.A., Kostyuchenko Ye.F. Investigation of patterns of wear of surfaces of connection "shaft-sliding bearing" // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 42. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 35-41. DOI : [10.31653/smf42.2021.35-41](https://doi.org/10.31653/smf42.2021.35-41).

73. Сагін С.В., Куропятник О.А., Разінкін Р.О. Визначення впливу системи рециркуляції випускних газів на експлуатаційні показники роботи суднового малообертового дизеля // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 49. – С. 124-136. doi: DOI: 10.31653/smf49.2024.124-136.

74. Козицький С.В., Швець О.І., Кіріяч С.В. Оцінка втрат кінетичної енергії у кривошипно-шатунному механізмі // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 42. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 42-49. DOI : 10.31653/smf42.2021.42-49.

75. Столярик Т.О. Прогнозування якісних характеристик роботи систем циліндрового мащення суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-141. doi:10.31653/smf46.2023.132-141.

76. Заблоцький Ю.В. Аналіз особливостей процесу мащення циліндрової групи суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 67-78. doi: 10.31653/10.31653/smf46.2023. 67-78.

77. Сагін С.В., Побережний Р.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 110-117. doi: 10.31653/smf46.2023.110-117.

78. Wang Z., Wang J., Wang J., Tian H., Zhang B., Grinkevych K., Xu J. Tribological Properties of Nano-Scale Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles with Different Shapes as Lubricating Oil Additives // J. Mar. Sci. Eng. – 2024. – Vol. 12. – P. 1069. <https://doi.org/10.3390/jmse12071069>

79. Bai C., Ding J., Zhang H., Xu Z., Liu H., Li W., Li G., Wei Y., Wang J. Research on Abrasive Particle Target Detection and Feature Extraction for Marine Lubricating Oil // J. Mar. Sci. Eng. – 2024. – Vol. 12. – P. 677. <https://doi.org/10.3390/jmse12040677>

80. Bricín D., Špirit Z., Gilík H., Kaufman J. Effect of laser shock peening on the microstructure of P265GH steel and X6CrNiTi18-10 stainless steel dissimilar welds // *Manuf. Techn.* – 2024. – Vol. 24(1). – P. 9-14. <https://doi.org/10.21062/mft.2024.020>.

81. Zheng J., Zhao Y., Li J., Zhang S., Zhang J., Sun D. Study on microstructure and tribological mechanism of Mo incorporated (AlCrTiZr)N high-entropy ceramics coatings prepared by magnetron sputtering // *Nanomaterials.* – 2024. – Vol. 14(10). – P. 814. <https://doi.org/10.3390/nano14100814>.

82. Chen S., He S., Zhao G., Chen G., Xu Y. Enhancing machinability and sustainability: the effects of hybrid MQL+CO<sub>2</sub> cooling on the drilling of AA7075T6 with TiO<sub>2</sub> and C-reinforced composites // *Machines.* – 2024. – Vol. 12(7). – P. 449. <https://doi.org/10.3390/machines12070449>.

83. Разінкін Р.О., Шумейко М.С. Перспективи використання аміаку як палива для морського транспорту // *Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту»*, м. Ізмаїл, ДІ НУОМА, 6-7 грудня 2024 р. – С. 163-165. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14560948>.

84. Штрибець В.В., Трофименко А.О., Тришин В.В., Лісовський С.В. Метод діагностики несправностей у суднових електроенергетичних системах на основі вдосконаленої згорткової нейронної мережі // *Водний транспорт: збірник наукових праць.* – 2024. – № 3(41). – С. 64-72. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.08](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.08).

85. Abramov G.S., Plotnikov V.I. Mathematical modeling of the processes of increasing the reliability of the navigation complex through redundancy // *Водний транспорт: збірник наукових праць.* – 2024. – № 3(41). – С. 146-158. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.16](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.16).

86. Chybowski L. Study of the Relationship between the Level of Lubricating Oil Contamination with Distillation Fuel and the Risk of Explosion in the Crankcase of a Marine Trunk Type Engine // *Energies.* – 2023. – Vol. 16. – P. 683. <https://doi.org/10.3390/en16020683>.

87. Chybowski L., Szczepanek M., Gawdzińska K., Klyus O. Particles Morphology of Mechanically Generated Oil Mist Mixtures of SAE 40 Grade Lubricating Oil with Diesel Oil in the Context of Explosion Risk in the Crankcase of a Marine Engine // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 3915. <https://doi.org/10.3390/en16093915>.

88. Chybowski L., Szczepanek M., Sztangierski R., Brożek P. Modeling of Selected Parameters of Used Lubricating Oil Diluted with Diesel Oil Using the Characteristics of Fresh Lubricating Oil // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – P. 2047. <https://doi.org/10.3390/en17092047>.

89. Chybowski L. Study of the Relationship between the Level of Lubricating Oil Contamination with Distillation Fuel and the Risk of Explosion in the Crankcase of a Marine Trunk Type Engine // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 683. <https://doi.org/10.3390/en16020683>.

90. Chybowski L., Kowalak P., Dabrowski P. Assessment of the Impact of Lubricating Oil Contamination by Biodiesel on Trunk Piston Engine Reliability // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 5556. <https://doi.org/10.3390/en16135056>.

91. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

92. Ivanov V.S., Frolov S.M., Semenov I.V., Belotserkovskaya M.S. Crankcase Explosions in Marine Diesel Engines: A Computational Study of Unvented and Vented Explosions of Lubricating Oil Mist // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2024. – Vol. 12. – P. 82. <https://doi.org/10.3390/jmse12010082>

93. Zamorano M., Avila D., Marichal G.N., Castejon C. Data Preprocessing for Vibration Analysis: Application in Indirect Monitoring of ‘Ship Centrifuge Lube Oil Separation Systems’ // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2022. – Vol. 10. – P. 1199. <https://doi.org/10.3390/jmse10091199>

94. Razinkin R. Utilising of methanol as marine fuel // *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до*

високоєфективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2023 р. – С. 185-187. [https://drive.google.com/file/d/1NObPGGddzTIE1ytFS0hRD5z6\\_q\\_FeyQO/view](https://drive.google.com/file/d/1NObPGGddzTIE1ytFS0hRD5z6_q_FeyQO/view).

95. Keno W.D., Kalácska Á., Fauconnier D., Ancha V.R., De Baets P. An Experimental Investigation of the Impact of Additive Concentration on the Tribological Performance of Castor Oil Lubrication in Piston Ring–Cylinder Liner Contact // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 206. <https://doi.org/10.3390/lubricants13050206>.

96. Mardonov U., Khasanov S., Jeltukhin A., Ozodova S. Influence of using cutting fluid under the effect of static magnetic field on chip formation in metal cutting with HSS tools (turning operation) // *Manuf. Techn.* – 2023. – Vol. 23(5). – P. 006. <https://doi.org/10.21062/mft.2023.006>.

97. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // *Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць*, 2020. – № 2(62). – С. 106-119. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.

98. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

99. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // *Водний транспорт*. – 2023. – № 1(37). – 59-70. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06).

100. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт*. – 2023. – № 2(38). – 164-175. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18).

101. Dong J., Wen H., Zhu J., Guo J., Zong C. Analysis of Thermo-Hydrodynamic Lubrication of Three-Lobe Semi-Floating Ring Bearing

Considering Temperature–Viscosity Effect and Static Pressure Flow // *Lubricants*. – 2024. – Vol. 12. – P. 140. <https://doi.org/10.3390/lubricants12040140>.

102. Jia D., Li C., Deng W., Ji H., Hao L. Effects of Hyperelliptic Bearings Bush on Connecting Rod Big-End Lubrication and Design Optimization // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11. – P. 293. <https://doi.org/10.3390/lubricants11070293>.

103. Rymar T., Tatarchenko H., Fomin O., Píštěk V., Kučera P., Beran M., Burlutskyy O. The study of manufacturing thermal insulation materials based on inorganic polymers under microwave exposure // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14(15). – P. 3202. <https://doi.org/10.3390/polym14153202>.

104. Madey V.V. Usage of biodiesel in marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 18-21. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-18-21>.

105. Мадей В. В. Використання альтернативного палива в суднових середньооберткових дизелях // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 45-53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.

106. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

107. Столярик Т.О. Аналіз енергетичної ефективності методів, що забезпечують процес мащення суднових дизелів // *Матеріали V міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2024»*, 05 березня 2024 р. – Одеса : ОНМУ, 2024. – С. 157-163. <https://2024.depas.od.ua>.

108. Sagin S., Куропятник О., Tkachenko I. Providing of the Sea Vessels Ecological Exploitation // *Матеріали V міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants &*

Operation MPP&O-2024», 05 березня 2024 р. – Одеса : ОНМУ, 2024. – С. 145-149. <https://2024.depas.od.ua>.

109. Столярик Т.О. Вдосконалення процесів мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 57-69. doi: 10.31653/smf45.2022.57-69.

110. Голяков В.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голяков, М.А. Козьмініх, О.А. Онищенко. – Одеса : ОНМА, 2014. – 164 с.

111. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках. Постанова КМУ від 27.12.2024 р. № 1550. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>

112. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації судових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

113. Козицький С.В., Кіріяч С.В. Властивості наноструктурованих матеріалів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 123-133. DOI: 10.31653/smf45.2022.123-133.

114. Сагін С. В., Кривий М. О. Розрахунок контактного тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 84-92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

115. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил судових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

116. Катренко А.В. Системний аналіз : підручник / А.В. Катренко. – Львів : Новий Світ -2000, 2011. – 396 с.

117. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання / Богомья В.І., Горбань А.В., Павленко М.А., Тимочко О.І., Тимощук О.М. // За заг. ред. О.М. Тимощук. – Київ : Держ. ун-т інфраструктури та технологій. – 2018. – 305 с.

118. Tian B., Shao Y., Zhu F., Hu C., Zhang T., Liu J., Xu H., Cao C., Yu H., Wang W. Simulation Study on the Effect of Molecular Structure Characteristics of Lubricant Base Oils on Lubrication Performance // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 398. <https://doi.org/10.3390/lubricants13090398>.

119. Kryvyi O., Miyusov M.V., Kryvyi M. New mathematical models for the load factor of slip pairs of the ship propulsion complex for non-Newtonian lubricants // *Pomorstvo*. – 2024. – Vol. 38(1). – P. 114-125. <https://doi.org/10.31217/p.38.1.9>.

120. Li Q., Zhang G., Zhao E. A Lightweight Image-Based Decision Support Model for Marine Cylinder Lubrication Based on CNN-ViT Fusion // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2025. – Vol. 13. – P. 1956. <https://doi.org/10.3390/jmse13101956>.

121. Kryvyi O., Miyusov M.V., Kryvyi M. Analysis of known and construction of new mathematical models of forces on a ship's rudder in an unbounded flow // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. – 2023. – Vol. 17(4). – P. 831-839. DOI: 10.12716/1001.17.04.09.

122. Кривий М.О. Визначення характерних кутів пар ковзання суднових енергетичних установок // *Суднові енергетичні установки*. – 2023. – Вип. 47. – С. 32-45. DOI: 10.31653/smf47.2023.32-45.

123. Kryvyi O., Miyusov M.V., Kryvyi M. Construction and analysis of new mathematical models of the operation of ship propellers in different maneuvering modes // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. – 2023. – Vol. 17(1). – P. 95-102. DOI: 10.12716/1001.17.01.09.

124. Ramirez Camba R., Garcia Garcia C., Garcia Tobar M., Fajardo Merchan J. An Integrated Methodological Approach for Interpreting Used Oil

Analysis in Diesel Engines // Lubricants. – 2025. – Vol. 13. – P. 169.  
<https://doi.org/10.3390/lubricants13040169>.

125. Кривий М.О. Вдосконалення критеріїв для визначення режимів роботи підшипників ковзання суднового пропульсивного комплексу /// Суднові енергетичні установки. – 2024. – Вип. 49. – С. 54-68.  
10.31653/smf49.2024.54-68.

126. Сагін С.В., Суворов П.С., Бондар С.А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – С. 122-130. doi: 10.31653/smf47.2023.122-130.

127. Li Q., Zhang G., Zhao E. A Lightweight Image-Based Decision Support Model for Marine Cylinder Lubrication Based on CNN-ViT Fusion // J. Mar. Sci. Eng. – 2025. – Vol. 13. – P. 1956. <https://doi.org/10.3390/jmse13101956>

128. Al-Shan M., Bailey R., Sun Y. Effect of Treatment Time on the Tribological Behavior of Thermally Oxidized Ti-6Al-4V Under Dry and Oil-Lubricated Conditions // Lubricants. – 2025. – Vol. 13. – P. 528.  
<https://doi.org/10.3390/lubricants13120528>

129. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.

130. Тимощук О.М., Шапран Ю.Є. Імпульсно-модуляційне управління судновими електроенергетичними системами // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2024. – № 3(41). – С. 201-206. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.22.

131. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205.  
doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

132. Гончарук І.П., Никифоров Ю.О. Кошарська Л.В. , Головань А.І. Особливості впливу відновлюваної енергетики на ефективність екологічності морського транспорту // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 73-79. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.

133. Чимшир В.І., Даниленко О.Б., Шульга Ю.М. Безпека судноплавства на морському та внутрішньому водному транспорті як об'єкт наукових досліджень // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 231-240. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.24.

134. Головань А.І. Особливості методики моделювання та інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 27-36. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.03.

135. Du F., Li D., Hao M., Yu Y., Wang W. Simulation and Experimental Research on the Failure of Marine Sliding Bearings // J. Mar. Sci. Eng. – 2023 – Vol. 11. – P. 61. <https://doi.org/10.3390/jmse11010061>.

136. Wang Z., Wang J., Wang J., Tian H., Zhang B., Grinkevych K., Xu J. Tribological Properties of Nano-Scale Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles with Different Shapes as Lubricating Oil Additives // J. Mar. Sci. Eng. – 2024. – Vol. 12. – P. 1069. <https://doi.org/10.3390/jmse12071069>.

137. Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Забезпечення експлуатаційних показників моторних мастил судових дизелів // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2025)», 03–04 грудня 2025 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. – С. 264-268.

138. Богач В.М., Довіденко Ю.М., Дуранов О.П. Особливості роботи лубрикаторних систем судових довгоходових двигунів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 53-63. DOI: 10.31653/smf44.2022.53-63.

139. Knaub L.V, Lebediev B.V, Maslich N.Ya. Reduction of toxicity of burnt diesel gases with the additional feeding system // Суднові енергетичні установки

: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 95-100. DOI : 10.31653/smf343.2021.95-100.

140. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

141. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13(3). – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.

142. Разінкін Р.О. Ресурсозберігаюча експлуатація суднових дизелів на основі трибомоніторингу моторного мастила // *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту»*, м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 7 грудня 2017 р. – 196-199. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2018/12/mnpk8.pdf>.

143. Bai C., Ding J., Zhang H., Xu Z., Liu H., Li W., Li G., Wei Y., Wang J. Research on Abrasive Particle Target Detection and Feature Extraction for Marine Lubricating Oil // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2024. – Vol. 12. – P. 677. <https://doi.org/10.3390/jmse12040677>.

144. Coga L., Polajnar M., Kalin M. From Conventional to Environmentally Acceptable Additives: Tribological Behaviour in Volatile Lubricants for Punching Stamping Operations // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13. – P. 446. <https://doi.org/10.3390/lubricants13100446>.

145. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Кочетов Г.А., Дзигар А.К. Аналіз працездатності підшипників шатуна середньообертового двигуна hyundaihimsen h25/33 при експлуатації з допустимими значеннями зазорів без ремонту // *Водний транспорт: збірник наукових праць*. – 2023. – № 2(38). – С. 115-127. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.13](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.13).

146. Савчук В.П., Курносенко Д.В., Білоусов Є.В. Сатулов А.І. Експериментальні дослідження впливу типових несправностей на функціональні параметри систем змащування високообертових дизелів // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 128-141. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.14.

147. Разінкін Р.О. Вплив на показники роботи СДВЗ в умовах підвищених зовнішніх збурень // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 8-9 грудня 2022 р. – С. 106-109. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/conf20122022.pdf>.

148. Li M., Zhang L., Yuan D., Sun X., Tong Q. A Hyperspectral Analysis-Based Approach for Estimation of Wear Metal Content in Lubricating Oil // Lubricants. – 2025. – Vol. 13. – P. 393. <https://doi.org/10.3390/lubricants13090393>.

149. Ouyang H., Li W., Gao F., Huang K., Xiao P. Research on Fault Diagnosis of Ship Diesel Generator System Based on IVY-RF // Energies. – 2024. – Vol. 17. – P. 5799. <https://doi.org/10.3390/en17225799>.

150. Zhang H., Liu X., Gong J., Bai S., Sun K., Jia H. Thermohydrodynamic Lubrication Characteristics of Piston Rings in Diesel Engine Considering Transient Heat Transfer under the Parameterized Surface Texture of Cylinder Liners // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 7924. <https://doi.org/10.3390/en16247924>.

151. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

152. Разінкін Р.О. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів шляхом діагностування моторного мастила // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 3(44). – С. 241-255. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.43.24.

153. Разінкін Р.О. Аналіз впливу низькосірчаного палива на систему лубрикації СДВЗ та превентивні заходи зі зменшення зносу деталей ЦПГ // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 21 квітня 2023 року. – С. 70-73. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/zbyrnyk210423.pdf>.

154. Столярик Т.О. Забезпечення режимів мащення чотиритактних судових дизелів // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 90 – 105. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105.

155. Мадей В.В., Волков О.М., Сторчак О.О. Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 55-68. doi: 10.31653/smf47.2023.55-68.

156. Сорока В.В. Контроль та оцінювання стану підшипників судового валопроводу // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2021. – № 3(34). – С. 31-38. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.04.

157. Laubichler C., Kiesling C., Marques da Silva M., Wimmer A., Hager G. Data-Driven Sliding Bearing Temperature Model for Condition Monitoring in Internal Combustion Engines // Lubricants. – 2022. – Vol. 10. – P. 103. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050103>.

158. Tongyang L., Xuan M., Xiqun L., Chuanjuan W. Lubrication analysis for the piston ring of a two-stroke marine diesel engine taking account of the oil supply // Int. J. Engine Res. – 2021. – Vol. 22. – P. 146808741987211. <https://doi.org/10.1177/1468087419872113>.

159. Vatulia G., Gerlici J., Fomin O., Lovska A., Fomina Y., Kravchenko K. Analysis of the strength of the supporting structure of a two-section hopper wagon under operating loading conditions // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13(2). – P. 859. <https://doi.org/10.3390/app13020859>.

160. Разінкін Р.О. Забезпечення ефективності експлуатації циркуляційних систем мащення судових чотиритактних дизелів // Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практична конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», ДІ НУОМА – 2025, 5-6 грудня 2025 р. Ізмаїл. – С. 210-213.

161. Razinkin R. Analysis of the possibility for the development of four-cycle engines man for the cruise fleet // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, ДІ НУ «ОМА», 6-7 грудня 2018 р. – С. 191-193. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2018/12/mnpk9.pdf>.

162. Разінкін Р.О. Огляд способів підвищення надійності втулок циліндрів судових дизелів // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУОМА, 2025. – С.179-183 <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEEEA-2025.26.11.25.pdf>.

163. Разінкін Р.О. Підвищення ефективності процесу мащення підшипникових вузлів судових дизелів // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2025)», 03–04 грудня 2025 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. – С. 242-244.

164. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21).

165. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22).

166. Сагін А.С. Особливості подачі палива в циліндр дизеля під час використання палив з різним вмістом сірки // Матеріали V міжнародної

морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2024», 05 березня 2024 р. – Одеса : ОНМУ, 2024. – С. 164-169. <https://2024.depas.od.ua>.

167. Сагін С.В., Сагін А.С., Заблоцький Ю.В., Фомін О.В. Забезпечення технічного стану підшипників суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 138-151. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.13](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.13).

168. Разінкін Р.О. Імітаційна модель накопичення продуктів зносу у відпрацьованій циліндровій оливі // Колективна монографія «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», за редакцією В. Чимшир. – Ізмаїл: ДІ НУ «ОМА», 2020 – Київ: Міленіум, 2020. – С. 182-193. ISBN 978-966-8063-81-6. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf>.

169. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Використання інтегрованих діагностичних моделей для оцінки експлуатаційних характеристик суднового пропульсивного комплексу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15).

170. Qiao L., Zhou B., Li R., Li T., Zhao Y., Zhang X., Lee C.-H. Effects of Sliding Speed on Wear Behavior of High-Velocity Oxygen Fuel-Sprayed FeCrMoNiCuBSiC Metallic Glass Coatings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13. – P. 10. <https://doi.org/10.3390/lubricants13010010>.

171. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення впливу антифрикційних покриттів на технічний стан підшипників ковзання дизелів морських суден // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 49. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 110-123. [doi: 10.31653/smf49.2024.110-123](https://doi.org/10.31653/smf49.2024.110-123).

171. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20).

172. Разінкін Р.О. Використання імітаційного статистичного аналізу даних під час діагностування технічного стану дизелів суден морського транспорту // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 19-20 березня 2026 р., НУОМА. – С. 69-75.

173. Kuřcera O., Piřtěk V., Fomin O., Kuřcera P., Sagin S. Measuring Device for More Precise Mistuning Identification of Integrated Bladed Discs // Symmetry. – 2025. – Vol. 17(5). – P. 717. <https://doi.org/10.3390/sym17050717>.

174. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Piřtěk V., Kuřcera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13(4). – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lub13040146>.

175. Разінкін Р.О., Найдьонов А.І. Ресурсозберігаюча експлуатація судових дизелів на основі трибомоніторингу моторного мастила // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку морської галузі, безпека судноплавства, підготовка моряків у відповідності до національних і міжнародних вимог», 25 травня 2018 р. – Маріуполь: АМІ НУ «ОМА». – С. 229-232.

176. Разінкін Р.О. Діагностування стану циліндрової групи та підшипників ковзання судових дизелів за аналізом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Збірка матеріалів VI міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2025, 5 грудня 2025 р. – Київ: Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, 2025. – С. 43-46.

177. Разінкін Р.О. Діагностування технічного стану судових дизелів за аналізом моторної оливи // Розвиток транспорту. – 2025. – № 4. – С. 71-85. <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.06>.

## ДОДАТОК

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження



**УКРАЇНА**  
**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДУНАЙСЬКИЙ ІНСТИТУТ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**  
**«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»**

68600, Одеська область., м. Ізмаїл, просп. Миру, 15, тел.: (+38 048) 771-61-01, тел.: (+38096) 722-05-30  
 e-mail: [dinuoma@onma.edu.ua](mailto:dinuoma@onma.edu.ua) web site: [www.dinuoma.com.ua](http://www.dinuoma.com.ua)

03.03 2026 № 118  
 на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Директор  
 Дунайського інституту  
 Національного університету  
 «Одеська морська академія»  
 Валентин ЧИМЧИР  
 «03» березня 2026 року

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційного дослідження  
 на тему: «Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила»  
 Разінкіна Романа Олександровича

Комісія у складі: голова комісії: заступник директора з науково-педагогічної роботи Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» (далі ДІНУОМА), доктор педагогічних наук, професор Смирнова Ірина Михайлівна; члени комісії: - заступник директора з науково-методичної роботи ДІНУОМА, кандидат педагогічних наук, доцент Гайдаржи Анжела Ігорівна; завідувач кафедри суднових енергетичних установок і систем ДІНУОМА, кандидат технічних наук, доцент Маслов Ігор Захарович; кандидат технічних наук, доцент кафедри суднових енергетичних установок і систем ДІНУОМА Берестовий Іван Олегович; склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження на тему: «Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила» старшого викладача кафедри суднових енергетичних установок і систем Разінкіна Р.О. були впроваджені в освітній процес ДІНУОМА.

Дослідження виконувалось у рамках державної науково-дослідної роботи ДІНУОМА на теми «Розробка концепції безпечної експлуатації суднових систем та обладнання» (Державний реєстраційний номер 0118U007602 (2018–2021 рр.); «Аналіз і розробка методів та підходів до підвищення ефективності управління та експлуатації судновими системами та комплексами» (Державний реєстраційний номер 0123U101514 (2023–2026 рр.), у яких автор дисертації брав участь у виконанні окремих розділів.

Результати дисертаційного дослідження представлені до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту», використовуються при викладанні навчального матеріалу з дисциплін «Суднові двигуни внутрішнього згоряння», «Технічне обслуговування, діагностика і ремонт суднових технічних засобів» для здобувачів освіти освітньо-професійної програми «Управління судновими технічними системами і комплексами» за спеціальністю «271 Морський та внутрішній водний транспорт», спеціалізації «271.02. Управління судновими технічними системами і комплексами».

В процес освітньої діяльності ДІНУОМА автором впроваджено наукові розробки щодо якісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію суднових дизелів, що визначає градієнт зміни швидкості загального лужного числа моторного



мастила; кількісного критерію моторного мастила, що характеризує ресурсозберігаючу експлуатацію судових дизелів, визначає швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі; визначає критичні значення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкості зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі запобігання яких забезпечує ресурсозберігаючу експлуатацію дизелів суден морського транспорту.

Разінкін Р.О. надав можливості удосконалення технології визначення часових рядів під час діагностування експлуатаційних характеристик моторних мастил систем циліндрового та циркуляційного мащення дизелів суден морського транспорту; технології проведення спектрографічних досліджень складових моторного мастила, що характеризують знос контактних поверхонь судових дизелів та забруднення моторного мастила; технології забезпечення термодинамічних режимів експлуатації дизелів суден морського транспорту.

За результатами дисертаційного дослідження, виділяємо особистий внесок здобувача: виконання інформаційного пошуку та аналіз літературних джерел із розв'язання завдання ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів; визначення основних складових та розробка технологічної карти наукового дослідження; розробка математичної моделі процесів, що характеризують взаємодію контактних поверхонь під час отримання корисної роботи у судових дизелях та перетворення цієї роботи у рух суден морського транспорту; проведення експериментальних досліджень на судах морського транспорту; розробка рекомендації щодо вдосконалення експлуатації систем мащення дизелів морських суден; розробка методики діагностування технічного стану дизелів суден морського транспорту за аналізом моторного мастила, що використовується у їхніх системах циліндрового та циркуляційного мащення.

Використання зазначених вище результатів дисертаційного дослідження в освітньому процесі забезпечує формування у здобувачів освіти практичних навичок розробки методики ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила. Особлива увага приділяється забезпеченню ресурсу роботи судових дизелів, що досягається шляхом діагностування та подальшого управління експлуатаційними характеристиками моторного мастила. Інтеграція методів аналізу, синтезу, моделювання, абстрагування, дедукції та індукції; спостереження, експерименту, вимірювання, порівняння, в навчальні дисципліни сприяє підвищенню якості підготовки майбутніх судових механіків, формує у них компетентності з діагностування моторного мастила та прогнозування технічного стану судових дизелів, а також забезпечує глибоке розуміння практичних аспектів ресурсозберігаючої експлуатації, що підтверджує визначену проблематику вищезазначеного дисертаційного дослідження.

Основні теоретичні положення та практична значущість результатів дисертаційного дослідження представлені здобувачем на засіданні кафедри судових енергетичних установок і систем ДІНУОМА (протокол №7 від 25 лютого 2026 року).

Голова комісії:

заступник директора з науково-педагогічної роботи  
ДІНУОМА, доктор педагогічних наук, професор

Члени комісії:

заступник директора з науково-методичної роботи  
ДІНУОМА, кандидат педагогічних наук, доцент  
завідувач кафедри

судових енергетичних установок і систем ДІНУОМА,

кандидат технічних наук, доцент

кандидат технічних наук,

доцент кафедри судових енергетичних

установок і систем ДІНУОМА



Ірина СМІРНОВА



Анжела ГАЙДАРЖИ



Ігор МАСЛОВ



Іван БЕРЕСТОВИЙ





**INTERUNITY MANAGEMENT CORPORATION S.A.**  
**69 Ethnikis Antistaseos Str., 15231 Athens, Greece**

АКТ

щодо використання результатів дисертаційної роботи  
**«Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів  
 на основі системи діагностування моторного мастила»**  
 на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук  
 Разінкіна Романа Олександровича

Цей акт засвідчує, що запропонована у дисертаційному дослідженні «Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила» **Разінкіним Романом Олександровичем** технологія визначення часових рядів під час діагностування експлуатаційних характеристик моторних мастила була апробована, використана та впроваджена у системі циліндрового мащення на судновому дизелі 9K80ME MAN-Diesel&Turbo (що виконував функції головного двигуна) та системі циркуляційного мащення на суднових дизелях 6L27/38 MAN-Diesel&Turbo (що виконували функції допоміжних двигунів).

При цьому було забезпечено зменшення зносу контактних поверхонь дизеля, що підтверджувалось зниженням концентрації металевих домішок у пробах моторного мастила, які відбирались з підпоршневого простору та картеру дизелів).

Капітан м/в "Aristosi"

Старший механік м/в "Aristosi"



Е. Платов  
26.11.2025

К. Ждеров  
26.11.2025



Olive Shipmanagement Inc.

G. Kondyli 16675, Glyfada, Athens, Greece

MV AQUAVITA TRUST

## АКТ ВПОВАДЖЕННЯ

окремих результатів дисертаційної роботи

Разінкіна Романа Олександровича

«Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила»

Цей акт складений у тому, що запропонована Разінкіним Р.О. технологія визначення часових рядів під час діагностування експлуатаційних характеристик моторних мастила систем та циркуляційного мащення була випробувана та через позитивні результати впроваджена на суднових дизелях 6S50ME-C9.7 MAN-B&W, що використовувались як головний та допоміжні на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 63580 тонн. При цьому було забезпечено зменшення зносу контактних поверхонь дизелів, що підтверджувалось зниженням концентрації металевих домішок у пробах моторного мастила, які відбирались з підпоршневого простору та картеру дизелів).

Результати випробувань були погоджені з відділом безпеки судноплавної компанії "Olive Ship Management" та рекомендовані для використання на інших суднах компанії, а також для подальшого вивчення та розвитку.

QHSE Marine Superintendent



Capt. Stelios Chavredakis



### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

**Разінкіна Романа Олександровича**

на тему «Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила», спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Ми, що нижче підписалися, капітан m/v “Roberta” Nicolas Marichal та старший механік Sander Kommeren склали цей акт, який свідчить, що окремі результати дисертаційної роботи **Разінкіна Романа Олександровича** на тему «Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила» були використані під час експлуатації та діагностування технічного стану суднових дизелів m/v “Roberta”, а саме: технологія визначення градієнту зміни швидкості загального лужного числа моторного мастила та швидкість зміни концентрації металевих домішок у моторному мастилі – на судновому дизелі 6S50ME-C9.7-HPSCR MAN-B&W Yichang Marine Diesel Engine Co.Ltd., та на суднових дизелях 6DE-18 Daihatsu Diesel, що використовувались як головні та допоміжні на вказаному вище судні.

Використання вказаної технології сприяло 2,5...6,8 % зниженню витрати моторного мастила системи циліндрового мащення дизелів та 4,8...8,3 % зниженню витрати моторного мастила системи циркуляційного мащення дизелів.

Результати досліджень були схвалені відділом технічного менеджменту компанії Star Bulk.

Капітан m/v “Roberta”



Nicolas Marichal  
16.07.2025

Старший механік m/v “Roberta”

Sander Kommeren  
16.07.2025

АКТ  
про використання результатів дисертаційної роботи  
**Разінкіна Романа Олександровича**  
**«Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів  
на основі системи діагностування моторного мастила»**  
(спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту)

Цей акт складений 10.12.2025 р. у тому, що окремі технологічні розробки, які запропоновані у дисертаційному дослідженні **«Розробка методики ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів на основі системи діагностування моторного мастила»** Разінкіним Романом Олександровичем, а саме:

- послідовність проведення мобільного спектрографічного аналізу моторного мастила системи циркуляційного мащення;
  - технологія накопичення та аналізу статистичних результатів з визначення експлуатаційних показників моторного мастила;
- були використані на суднових дизелях 6R26 Wartsila.

Зазначене прискорило прийняття рішень зі управління режимами мащення та сприяло 4,6...9,3 % зниженню витрати моторного мастила та покращенню технічного стану контактних поверхонь дизеля.

Старший механік т/х “ARCOLA”



І. Хустов