

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Сагін Арсеній Сергійович

УДК 629.5

ДИСЕРТАЦІЯ


**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПАЛИВОПОДАЧІ ДИЗЕЛІВ РІЧКОВИХ
ТА МОРСЬКИХ СУДЕН**

Спеціальність 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 Арсеній САГІН

Науковий керівник:
Заблоцький Юрій Вікторович,
кандидат технічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Сагін А.С. Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Морський та внутрішній водний транспорт (галузь знань 27 – Транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2024.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки.

Головною мотивацією проведених досліджень є наявність сьогоденних **запитів практики:**

- підтримання експлуатаційних показників дизелів річкових та морських суден під час використання палива з низьким вмістом сірки;
- забезпечення функціональних показників паливної апаратури високого тиску під час використання палива з низьким вмістом сірки.

Головне завдання наукового дослідження управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях палива з низьким вмістом сірки.

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

- 1) забезпечення змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки;
- 2) підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску, що забезпечує впорскування палива з низьким вмістом сірки;

3) визначення оптимальних фаз паливоподачі під час використання палива з низьким вмістом сірки.

Як результат розв'язання завдань дослідження сформульовано **наукове положення**: забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки досягається керованим впливом на процес впорскування, що гарантує підтримання їх екологічної, теплової та динамічної стійкості.

Наукове положення обґрунтоване **науковими результатами, вперше**:

- визначено, що оптимальні фази подачі палива з низьким вмістом сірки відповідають кутам впорскування, за якими забезпечуються максимальні енергетичні та економічні показники роботи дизелів;

- запропоновано комплексний критерій оцінки ефективності використання в дизелях морських та річкових суден палив з низьким вмістом сірки, який включає:

- екологічну стійкість, що визначається як відносна різниця поточного та максимального можливого значення емісії оксидів азоту з випускними газами;

- теплову стійкість, що визначається як відносна різниця поточного значення температури випускних газів відповідної змінним кутам випередження палива та максимального значення температури випускних газів, яке відповідає експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки без додаткової зміни кутів випередження палива;

- динамічну стійкість, яка відповідає відносному зменшенню ступеня підвищення тиску під час згоряння палива.

Удосконалено:

- технологію визначення енергетичних втрат у прецизійних парах паливної апаратури високого тиску під час використання палива з низьким вмістом сірки;

- технологію гідродинамічної оборки вуглеводних рідин, яка сприяє активації їх міжмолекулярних зв'язків та підвищенню їх структурних характеристик;

- технологію визначення показників, що характеризують гідравлічну щільність елементів паливної апаратури високого тиску дизелів морських та річкових суден.

Отримала подальший розвиток:

- технологія визначення енергетичних, економічних та екологічних показників роботи дизелів морських та річкових суден;

- технологія підготовки паливної системи дизелів до використання палива з низьким вмістом сірки під час експлуатації морських та річкових суден у зонах екологічного контролю.

Практичне значення отриманих результатів полягає в такому:

- забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден під час використання палива з низьким вмістом сірки (через керований вплив на кути впорскування палива) призводить до зменшення теплових та динамічних навантажень на деталі циліндро-поршневої групи та кривошипно-шатунного механізму, а також сприяє зменшенню емісії оксидів азоту з випускними газами;

- підвищення гідравлічної щільності паливної апаратури високого тиску сприяє зменшенню протічок палива та перешкоджає збільшенню витрати палива, а також сприяє підтриманню потужності дизеля;

- технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива гарантує підтримання енергетичних та екологічних показників роботи дизелів морських та річкових суден.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива, яка забезпечує зниження тиску згоряння та температури випускних газів, а також сприяє зниженню емісії оксидів азоту з випускними газами – для суднового дизеля 7S50ME-B9.3-ТІІ MAN-Diesel & Turbo під час його переведення з

палива, вміст сірки в якому досягав 0,5 %, на паливо, вміст сірки в якому не перебільшував 0,1 %;

- технологія переналаштування паливної апаратури високого тиску, яка дозволяє виконувати поступову зміну кутів впорскування палива в рекомендованому фірмою виробником діапазоні – для суднового дизеля 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo, що сприяло зменшенню навантаження на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму дизеля, забезпечувала зменшення негативного впливу на довкілля та покращувала технічний стан деталей дизеля;

- технологія керованого впливу на елементи паливної апаратури високого тиску, яка забезпечувала зменшення викидів оксидів азоту та підвищення економічних показників – для суднового дизеля 6S60ME-C8.2-TII MAN-Diesel & Turbo;

- технологія визначення екологічної, динамічної та теплової стійкості – для суднових дизелів 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo та 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo;

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

технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива, яка забезпечує зниження тиску згоряння та температури випускних газів, а також сприяє зниженню емісії оксидів азоту з випускними газами, та технологія переналаштування паливної апаратури високого тиску, яка дозволяє виконувати поступову зміну кутів впорскування палива в рекомендованому фірмою виробником діапазоні – під час викладання освітнього компонента «Суднові двигуни внутрішнього згоряння» (для здобувачів наукового ступеня бакалавр);

технологія забезпечення гідравлічної щільності паливної апаратури високого тиску – під час викладання освітнього компонента «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія визначення структурних характеристик моторних мастил – під час викладання освітнього компонента «Дослідницький практикум» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Ключові слова: впорскування палива, гідродинамічні процеси, діагностика, змінні режими, індикаторна потужність, індикаторні показники дизеля, малообертвий дизель, моніторинг робочого процесу, моторне мастило, оксиді сірки, паливна апаратура, паливний насос високого тиску, питома витрата палива, процес згоряння, система мащення, система моніторингу, система подачі палива, суднове паливо, судновий дизель, циліндр дизеля.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті в наукових фахових виданнях України (категорії Б), 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. Zablotskyi Yu.V. Applying of fuel additives in marine diesel engines / Yu.V. Zablotskyi, A.S. Sagin // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-17. doi : 10.31653/smf43.2021.5-17.

2. Сагін С.В. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі / С.В. Сагін, В.В. Мадей, А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. doi: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

3. Заблоцький Ю.В. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів / Ю.В. Заблоцький, А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

4. Сагін А.С. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації судових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 17-30. doi : 10.31653/smf45.2022.17-30.

5. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення судових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

6. Сагін С.В. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту / С.В. Сагін, А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

7. Sagin S. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines / S. Sagin, A. Sagin // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5(1 (73)). – P. 37-43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198..>

8. Сагін А.С. Корегування процесу подачі палива під час використання в судових дизелях палив з різним вмістом сірки / А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 178-190. doi: 10.31653/smf47.2023.178-190.

9. Сагін А.С. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів / А.С. Сагін, С.В. Сагін // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

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

10. Sagin S. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe / S. Sagin,

O. Kuropyatnyk, A. Sagin, I. Tkachenko, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

11. Sagin S. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels / S. Sagin, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, O. Fomin, P. Kučera // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

12. Sagin S. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines / S. Sagin, S. Karianskyi, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, I. Tkachenko // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

Статті в іноземних виданнях країни ЄС:

13. Sagin A.S. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels / A.S. Sagin, Yu.V. Zablotskyi // *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>.

Статті у збірках матеріалів наукових конференцій

14. Сагін А.С. Оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів / А.С. Сагін // *Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми»*, 4-5 листопада 2021 р. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 266-269.

15. Сагін А.С. Зниження втрат енергії під час експлуатації паливної апаратури високого тиску суднових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // *Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування»*, 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 163-165.

16. Сагін А.С. Обеспечение надежности топливной аппаратуры транспортных дизелей / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцкий // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 95-96.

17. Заблоцький Ю.В. Забезпечення економічної ефективності судових дизелів / Ю.В. Заблоцький, А.С. Сагін // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021 -26.03.2021. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2021. – С. 91-93.

18. Сагін А.С. Забезпечення енергетичної ефективності суден відповідно новітнім вимогам Додатку VI МАРПОЛ / А.С. Сагін // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022.– Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 66-68.

19. Сагін А.С. Аналіз способів підвищення надійності паливної апаратури високого тиску під час використання в судових дизелях палив з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали 14-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 16-18 березня 2023 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – С. 208-210.

20. Сагін А.С. Підвищення ефективності роботи паливної апаратури високого тиску дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 – 23.03.2023.– Одеса: НУ «ОМА», 2023. – С. 83-86.

21. Сагін А.С. Забезпечення процесу впорскування палива з наднизьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 р. – Херсон : ХДМА. –2023. – С. 254-257.

22. Сагін А.С. Розробка методу управління процесом паливоподачі під час переведення судових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки /

А.С. Сагін // Збірник матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р. – Київ : Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2023. – С. 82-86.

23. Сагін А.С. Особливості подачі палива в циліндр дизеля під час використання палив з різним вмістом сірки / А.С. Сагін // 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>.

24. Сагін А.С. Особливості налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на використання палива з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2024 – 21.03.2024.– Одеса: НУ «ОМА», 2024. – С. 72-75.

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

[1], [2], [6] – розробка технології проведення експериментальних досліджень, визначення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів, обробка та аналіз отриманих експериментальних значень;

[3], [15] – проведення експериментальних досліджень з визначення змашувальних властивостей палива;

[4], [7] – визначення оптимальних режимів роботи суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки та із різними структурними характеристиками;

[9], [16] – проведення експериментальних досліджень для визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів;

[10], [11], [12] – проведення досліджень, розробка рекомендації щодо використання суднових палив, у тому числі біопалив, та визначення їх впливу на довкілля;

[13] – проведення інформаційного пошуку, визначення основних експлуатаційних характеристик суднових палив та вимог до них;

[17], [19], [20] – аналіз способів підвищення надійності паливної апаратури високого тиску під час використання в суднових дизелях палив з низьким вмістом сірки.

ANNOTATION

Sagin A.S. Ensuring the process of fuel injection in diesel engines of river and sea transport vessels.

Dissertation for the scientific level of Doctor of Philosophy for specialties 271 – Maritime and inland water transport (Part of knowledge 27 – Transport). – National University "Odessa Maritime Academy" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024.

The dissertation research is aimed at solving a scientific and applied problem – ensuring the operational performance of marine diesel engines when using low-sulfur fuel.

The main motivation for the conducted research is the current **demands of practice:**

- maintaining the operational performance of river and sea vessels' diesel engines when using low-sulfur fuel;
- ensuring the functional performance of high-pressure fuel equipment during the use of low-sulfur fuel.

The main task of the scientific research is to manage the injection process during the use of low-sulfur fuel in marine diesel engines. To solve the main task, the following **auxiliary tasks** were addressed:

- 1) ensuring the lubricating properties of marine motor fuels with low sulfur content;
- 2) maintaining hydraulic tightness in the contact nodes of high-pressure fuel equipment, ensuring fuel injection with low sulfur content;
- 3) determining the optimal fuel injection phases when using low-sulfur fuel.

As a result of solving the **research tasks, the scientific position** is formulated: ensuring the operational performance of marine diesel engines when

using low-sulfur fuel is achieved by controlled influence on the injection process, guaranteeing their ecological, thermal, and dynamic stability.

The scientific position is substantiated by scientific results, including:

- determination that optimal fuel injection phases correspond to injection angles that ensure maximum energy and economic performance of the diesel engines;

- proposal of a comprehensive criterion for assessing the efficiency of using low-sulfur fuels in marine and river vessel engines, which includes ecological stability, thermal stability, and dynamic stability.

Improved technologies include:

- technology for determining energy losses in precision pairs of high-pressure fuel equipment during the use of low-sulfur fuel;

- hydrodynamic treatment technology of hydrocarbon fluids, enhancing their intermolecular bonds and increasing their structural characteristics;

- technology for determining indicators characterizing the hydraulic tightness of high-pressure fuel equipment elements of marine and river vessel diesel engines.

Further developed technologies include:

- technology for determining energy, economic, and ecological indicators of marine and river vessel diesel engine operation;

- technology for preparing the fuel system of diesel engines for the use of low-sulfur fuel during the operation of marine and river vessels in ecological control zones.

The practical significance of the obtained results lies in:

- ensuring the fuel supply process of river and sea vessel diesel engines during the use of low-sulfur fuel (through controlled influence on fuel injection angles), leading to reduced thermal and dynamic loads on cylinder-piston group details and crank-connecting rod mechanism, as well as reducing nitrogen oxide emissions with exhaust gases;

- increasing the hydraulic tightness of high-pressure fuel equipment contributes to reducing fuel leaks and preventing increased fuel consumption, as well as maintaining diesel power;

- technology of determining optimal fuel injection angles ensures the maintenance of energy and ecological performance indicators of marine and river vessel diesel engines.

The results of the dissertation research have been implemented:

- technology for determining optimal fuel injection angles, which ensures reduced combustion pressure and exhaust gas temperature, as well as reducing nitrogen oxide emissions with exhaust gases – for the marine diesel engine 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo during its transition from fuel with sulfur content reaching 0.5% to fuel with sulfur content not exceeding 0.1%;

- technology for readjusting high-pressure fuel equipment allowing gradual adjustment of fuel injection angles within the range recommended by the manufacturer – for the marine diesel engine 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo, reducing the load on cylinder group parts and crank-connecting rod mechanism, reducing negative environmental impact, and improving the technical condition of diesel engine parts;

- technology for controlled influence on high-pressure fuel equipment elements, reducing nitrogen oxide emissions and increasing economic indicators – for the marine diesel engine 6S60ME-C8.2-TII MAN-Diesel & Turbo;

- technology for determining ecological, dynamic, and thermal stability – for marine diesel engines 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo and 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo;

- in the educational process of the National University "Odessa Maritime Academy," namely:

technology for determining optimal fuel injection angles, which ensures reduced combustion pressure and exhaust gas temperature, as well as reducing nitrogen oxide emissions with exhaust gases, and technology for readjusting high-pressure fuel equipment allowing gradual adjustment of

fuel injection angles within the range recommended by the manufacturer – during the teaching of the educational component "Marine Internal Combustion Engines" (for bachelor's degree seekers);

technology for ensuring hydraulic tightness of high-pressure fuel equipment – during the teaching of the educational component "Processes of transformation of energy of marine power plants" (for master's degree seekers);

technology for determining structural characteristics of motor oils – during the teaching of the educational component "Research Workshop" (for doctoral degree seekers).

Key words: combustion process, diagnostics, diesel cylinder, diesel indicator indicators, engine lubricant, fuel equipment, fuel injection, fuel supply system, high-pressure fuel pump, hydrodynamic processes, indicator power, low-speed diesel, lubrication system, marine diesel, marine fuel, specific fuel consumption, sulfur oxides, system monitoring, variable modes, work process monitoring.

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. Zablotskyi Yu.V. Applying of fuel additives in marine diesel engines / Yu.V. Zablotskyi, A.S. Sagin // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-17. doi : 10.31653/smf43.2021.5-17.

2. Сагін С.В. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі / С.В. Сагін, В.В. Мадей, А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. doi: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

3. Заблоцький Ю.В. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів / Ю.В. Заблоцький, А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

4. Сагін А.С. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 17-30. doi : 10.31653/smf45.2022.17-30.

5. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

6. Сагін С.В. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту / С.В. Сагін, А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

7. Sagin S. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines / S. Sagin, A. Sagin // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5(1 (73)). – P. 37-43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>..

8. Сагін А.С. Корегування процесу подачі палива під час використання в суднових дизелях палив з різним вмістом сірки / А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 178-190. doi: 10.31653/smf47.2023.178-190.

9. Сагін А.С. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів / А.С. Сагін, С.В. Сагін // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

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

10. Sagin S. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, A. Sagin, I. Tkachenko, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

11. Sagin S. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels / S. Sagin, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, O. Fomin, P. Kučera // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

12. Sagin S. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines / S. Sagin, S. Karianskyi, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, I. Tkachenko // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

Articles in foreign publications of the EU:

13. Sagin A.S. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels / A.S. Sagin, Yu.V. Zablotskyi // 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>.

Articles in collections of materials of scientific conferences

14. Сагін А.С. Оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів / А.С. Сагін // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та

проблеми», 4-5 листопада 2021 р. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 266-269.

15. Сагін А.С. Зниження втрат енергії під час експлуатації паливної апаратури високого тиску суднових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 163-165.

16. Сагин А.С. Обеспечение надежности топливной аппаратуры транспортных дизелей / А.С. Сагин, Ю.В. Заблоцкий // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 95-96.

17. Заблоцький Ю.В. Забезпечення економічної ефективності суднових дизелів / Ю.В. Заблоцький, А.С. Сагін // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021 -26.03.2021. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2021. – С. 91-93.

18. Сагін А.С. Забезпечення енергетичної ефективності суден відповідно новітнім вимогам Додатку VI МАРПОЛ / А.С. Сагін // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022.– Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 66-68.

19. Сагін А.С. Аналіз способів підвищення надійності паливної апаратури високого тиску під час використання в суднових дизелях палив з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали 14-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 16-18 березня 2023 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – С. 208-210.

20. Сагін А.С. Підвищення ефективності роботи паливної апаратури високого тиску дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали міжнародної науково-технічної

конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 – 23.03.2023.– Одеса: НУ «ОМА», 2023. – С. 83-86.

21. Сагін А.С. Забезпечення процесу впорскування палива з наднизьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 р. – Херсон : ХДМА. –2023. – С. 254-257.

22. Сагін А.С. Розробка методу управління процесом паливоподачі під час переведення судових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Збірник матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р. – Київ : Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2023. – С. 82-86.

23. Сагін А.С. Особливості подачі палива в циліндр дизеля під час використання палив з різним вмістом сірки / А.С. Сагін // 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>.

24. Сагін А.С. Особливості налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення судових дизелів на використання палива з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2024 – 21.03.2024.– Одеса: НУ «ОМА», 2024. – С. 72-75.

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

[1], [2], [6] – development of technology for conducting experimental research, determination of operational performance indicators of marine diesel engines, processing and analysis of obtained experimental data;

[3], [15] – conducting experimental research to determine the lubricating properties of fuel;

[4], [7] – determination of optimal operating modes of marine diesel engines when using low-sulfur fuel with different structural characteristics;

[9], [16] – conducting experimental research to determine the optimal fuel injection phases into the cylinder of marine diesel engines.

[10], [11], [12] – conducting research, developing recommendations for the use of marine fuels, including biofuels, and determining their impact on the environment;

[13] – conducting information search, determining the main operational characteristics of marine fuels and their requirements;

[17], [19], [20] – analysis of methods to increase the reliability of high-pressure fuel equipment during the use of low-sulfur fuels in marine diesel engines.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	24
ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАВДАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПАЛИВОПОДАЧІ ДИЗЕЛІВ РІЧКОВИХ ТА МОРСЬКИХ СУДЕН.....	34
1.1. Суднові дизелі та їх основні експлуатаційні показники	34
1.2. Паливні системи суднових дизелів, їх склад та призначення основних елементів	36
1.2.1. Паливні системи низького тиску	39
1.2.2. Паливні системи високого тиску	41
1.3. Аналіз основних експлуатаційних властивостей суднових палив	43
1.4. Аналіз причин зміни характеристик процесів подачі палива під час використання палив різного структурного і фракційного складу.....	49
1.5. Висновки за розділом 1 та постановка завдання дослідження.....	52
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	53
2.1. Вибір теми наукового дослідження та визначення шляхів досягнення завдань дослідження	53
2.2. Обґрунтування мети, головного та допоміжних завдань дослідження	55
2.3. Застосування системного підходу під час планування, проведення та визначення результатів наукового дослідження	57
2.4. Організація та забезпечення проведення експериментальних досліджень	60
2.5. Обладнання та пристрої під час проведення експериментів.....	62
2.6. Висновки за розділом 2	64

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В ПАЛИВНІЙ АПАРАТУРІ ВИСОКОГО ТИСКУ ПІД ЧАС ПОДАЧІ ПАЛИВА В ЦИЛІНДР ДИЗЕЛЯ	65
3.1 Аналіз комплектації паливних систем високого тиску суднових дизелів	65
3.1.1. Паливні системи високого тиску з механічним приводом паливного насосу	69
3.1.2. Паливні системи високого тиску з електронним керуванням процесом паливоподачі	71
3.2. Аналіз взаємозв'язку параметрів стану паливної апаратури високого тиску та параметрів робочого процесу дизеля	75
3.3. Аналіз методів теоретичного розрахунку процесу паливоподачі	82
3.4. Аналіз методів розрахунку процесу паливоподачі за статичними параметрами	91
3.6. Висновки за розділом 3	99
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАЛИВ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	100
4.1. Аналіз експлуатаційних характеристик суднових палив, які використовуються в суднових дизелях	100
4.2. Регенерація змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки	104
4.3. Підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску, що забезпечує впорскування палива з низьким вмістом сірки	115
4.4. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки...	123
4.5. Аналіз впливу палив з низьким вмістом сірки на експлуатаційні характеристики суднових дизелів	130
4.5. Висновки за розділом 4	138

РОЗДІЛ 5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПАЛИВОПОДАЧІ ДИЗЕЛІВ РІЧКОВИХ ТА МОРСЬКИХ СУДЕН	140
5.1. Корегування процесу подачі палива під час використання в суднових дизелях палив з різним вмістом сірки	140
5.2. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів	150
5.3. Висновки за розділом 5	157
ВИСНОВКИ	159
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	163
ДОДАТОК	188

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВВР	– вуглеводними рідинами
ВМТ	– верхня мертва точка
ВОД	– високообертовий дизель
ДВЗ	– двигун внутрішнього згоряння
ІПН	– індекс паливного насосу
ККД	– коефіцієнт корисної дії
МАРПОЛ	– Міжнародна конвенція про запобігання забрудненню з суден
МОД	– малообертовий дизель
ПА	– паливна апаратура
ПКВ	– поворот колінчатого вала
ПНВТ	– паливний насос високого тиску
СЕУ	– суднова енергетична установка
СОД	– середньообертовий дизель
EGR	– Exhaust Gas Recirculation
IMO	– International Marine Organization –
LNG	– скраплений природний газ
SECAs	– Sulphur Emission Control Areas
TBN	– загальне лужне число

ВСТУП

Актуальність теми. Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) є найпоширенішими тепловими двигунами з усіх, що використовуються на транспорті. ДВЗ на суднах морського та внутрішнього водного транспорту виконують функції головних, а також допоміжних двигунів.

Першочергову роль у забезпеченні функціонування та експлуатаційної надійності суднових дизелів відіграють процеси паливоподачі, за допомогою яких гарантується надійне впорскування та подальше згоряння палива в циліндрах дизеля. Використання рідкого палива нафтового походження, яке на сьогодні залишається основним джерелом енергії всіх теплових двигунів суднових енергетичних установок, у тому числі дизелів, призводить до неминучого забруднення довкілля через потрапляння в нього випускних газів. Однією зі шкідливих складових, яку містять випускні гази дизелів морських та річкових суден, є оксиди сірки, які утворюються в циліндрі дизеля в результаті окислення сірки, що входить до складу палива. Кількість сірки в паливі регламентується вимогами Додатку VI Міжнародної конвенції про запобігання забрудненню з суден (МАРПОЛ) та не повинна перевищувати 0,5 % за масою. Одночасно з цим під час знаходження суден у спеціальних зонах екологічного контролю вміст сірки в паливі обмежується значенням 0,1 % за масою. Обов'язковий перехід дизелів на подібні сорти палива у разі експлуатації суден в районах Sulphur Emission Control Areas зумовлює зміну експлуатаційних показників роботи дизелів, що виявляється в збільшенні динамічних та температурних навантажень на деталі циліндро-поршневої групи та кривошипно-шатунного механізму, а також (у зв'язку з підвищенням температури згоряння) сприяє збільшенню утворення іншого шкідливого компонента випускних газів – оксидів азоту. Використання палив із зазначеним вмістом сірки призводить до зміни основних експлуатаційних показників роботи дизелів річкових та морських суден, а також призводить

до відхилень у роботі паливної апаратури високого тиску. За цих умов експлуатації суднових дизелів вкрай важливим стає завдання забезпечення якісного впорскування необхідної кількості палива та подальше забезпечення його ефективного згорання. Викладене підтверджує **актуальність** теми дисертаційного дослідження та мети дослідження, а саме забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки, – яка на початок його проведення мала лише поодинокі, непов'язані між собою рекомендації до розв'язання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року (розп. КМУ 30.03.18 р. № 430-р); а також у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету «Одеська морська академія» «Прогнозування експлуатаційного технічного стану суднової пропульсивної установки на основі контролю її вібраційно-коливальних характеристик» № ДР 0119U001654 (2021–2024 рр.), у яких автор дисертації брав участь у виконанні окремих розділів.

Мета дослідження. Метою дослідження є забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза, що забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки досягається корегуванням процесу впорскування та визначенням оптимальних кутів подачі палива.

Головне завдання наукового дослідження полягає в управлінні процесом впорскування під час використання в суднових дизелях палива з низьким вмістом сірки.

Для розв'язання головного завдання дослідження виконані такі **допоміжні завдання**:

1) забезпечення змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки;

2) підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску, що забезпечує впорскування палива з низьким вмістом сірки;

3) визначення оптимальних фаз паливоподачі під час використання палива з низьким вмістом сірки.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації дизелів річкових та морських суден.

Предмет дослідження – процес впорскування палива з низьким вмістом сірки.

Під час проведення дослідження використовувались такі методи:

- дедукції (під час виконання інформаційного пошуку);
- системного аналізу (під час визначення мети та завдань дослідження, а також під час розробки технологічної карти наукового дослідження);
- математичного моделювання (під час аналізу взаємозв'язку параметрів стану паливної апаратури високого тиску та параметрів робочого процесу дизеля, а також теоретичного розрахунку процесу паливоподачі);
- проведення експериментів (під час визначення структурних характеристик суднових моторних палив та під час випробувань із визначення впливу палив з різним вмістом сірки на експлуатаційні показники дизелів морських суден);
- статистичної обробки даних (при обробці результатів експериментів).

Наукова новизна роботи полягає в тому, що забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки досягається шляхом керованого впливу на процес впорскування палива, а саме визначенням кутів випередження подачі палива за якими гарантуються підвищення теплової, динамічної та екологічної стійкості роботи суднових дизелів.

У результаті дослідження вперше:

- визначено, що оптимальні фази подачі палива з низьким вмістом сірки відповідають кутам впорскування, за якими забезпечуються максимальні енергетичні та економічні показники роботи дизелів;

- запропоновано комплексний критерій оцінки ефективності використання в дизелях морських та річкових суден палив з низьким вмістом сірки, який включає:

 - екологічну стійкість, що визначається як відносна різниця поточного та максимального можливого значення емісії оксидів азоту з випускними газами;

 - теплову стійкість, що визначається як відносна різниця поточного значення температури випускних газів відповідної змінним кутам випередження палива та максимального значення температури випускних газів, яке відповідає експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки без додаткової зміни кутів випередження палива;

 - динамічну стійкість, яка відповідає відносному зменшенню ступеня підвищення тиску під час згоряння палива.

Удосконалено:

- технологію визначення енергетичних втрат у прецизійних парах паливної апаратури високого тиску під час використання палива з низьким вмістом сірки;

- технологію гідродинамічної оборки вуглеводних рідин, яка сприяє активації їх міжмолекулярних зв'язків та підвищенню їх структурних характеристик;

- технологію визначення показників, що характеризують гідравлічну щільність елементів паливної апаратури високого тиску дизелів морських та річкових суден.

Отримала подальший розвиток:

- технологія визначення енергетичних, економічних та екологічних показників роботи дизелів морських та річкових суден;

- технологія підготовки паливної системи дизелів до використання палива з низьким вмістом сірки під час експлуатації морських та річкових суден у зонах екологічного контролю.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден під час використання палива з низьким вмістом сірки (через керований вплив на кути впорскування палива) призводить до зменшення теплових та динамічних навантажень на деталі циліндро-поршневої групи та кривошипно-шатунного механізму, а також сприяє зменшенню емісії оксидів азоту з випускними газами;

- підвищення гідравлічної щільності паливної апаратури високого тиску сприяє зменшенню протічок палива та перешкоджає збільшенню витрати палива, а також сприяє підтриманню потужності дизеля;

- технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива гарантує підтримання енергетичних та екологічних показників роботи дизелів морських та річкових суден.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива, яка забезпечує зниження тиску згоряння та температури випускних газів, а також сприяє зниженню емісії оксидів азоту з випускними газами – для суднового дизеля 7S50ME-B9.3-III MAN-Diesel & Turbo під час його переведення з палива, вміст сірки в якому досягав 0,5 %, на паливо, вміст сірки в якому не перебільшував 0,1 %;

- технологія переналаштування паливної апаратури високого тиску яка дозволяє виконувати поступову зміну кутів впорскування палива в рекомендованому фірмою виробником діапазоні – для суднового дизеля 8K80ME-8.2-III MAN-Diesel & Turbo, що сприяло зменшенню навантаження на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму дизеля, забезпечувала зменшення негативного впливу на довкілля, та покращувала технічний стан деталей дизеля;

- технологія керованого впливу на елементи паливної апаратури високого тиску, яка забезпечувала зменшення викидів оксидів азоту та підвищення економічних показників – для суднового дизеля 6S60ME-C8.2-ТII MAN-Diesel & Turbo;

- технологія визначення екологічної, динамічної та теплової стійкості – для суднових дизелів 7S50ME-B9.3-ТII MAN-Diesel & Turbo та 8K80ME-8.2-ТII MAN-Diesel & Turbo.;

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

технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива, яка забезпечує зниження тиску згоряння та температури випускних газів, а також сприяє зниженню емісії оксидів азоту з випускними газами, та технологія переналаштування паливної апаратури високого тиску, яка дозволяє виконувати поступову зміну кутів впорскування палива в рекомендованому фірмою виробником діапазоні – під час викладання освітнього компонента «Суднові двигуни внутрішнього згоряння» (для здобувачів наукового ступеня бакалавр);

технологія забезпечення гідравлічної щільності паливної апаратури високого тиску – під час викладання освітнього компонента «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія визначення структурних характеристик моторних мастил – під час викладання освітнього компонента «Дослідницький практикум» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Особистий внесок здобувача полягає у:

- виконанні аналізу літературних джерел із розв’язання завдання забезпечення процесів паливоподачі дизелів річкових та морських суден;

- проведенні досліджень із визначення впливу гідродинамічної активації на зміну структурних та експлуатаційних характеристик суднових моторних палив з різним вмістом сірки;

- проведення досліджень та розробці рекомендацій щодо підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску під час забезпечення впорскування палива з низьким вмістом сірки;

- визначення оптимальних фаз паливоподачі під час використання палива з низьким вмістом сірки;

- розробка та впровадження критеріїв з оцінки ефективності використання технології переналаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення дизелів морських та річкових суден на використання палива з низьким вмістом сірки.

Роботи [107], [108], [111], [138], [160], [162], [163], [171] виконані автором самостійно.

У роботах, які опубліковані в співавторстві, здобувачеві належать особисто:

[20], [137] – проведення експериментальних досліджень з визначення змащувальних властивостей палива;

[46], [74], [157] – проведення досліджень, розробка рекомендації щодо використання суднових палив, у тому числі біопалив, та визначення їх впливу на довкілля;

[71], [153], [164] – розробка технології проведення експериментальних досліджень, визначення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів, обробка та аналіз отриманих експериментальних значень;

[146], [165] – визначення оптимальних режимів роботи суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки та із різними структурними характеристиками;

[150], [169], [172] – аналіз способів підвищення надійності паливної апаратури високого тиску під час використання в суднових дизелях палив з низьким вмістом сірки;

[166] – проведення інформаційного пошуку, визначення основних експлуатаційних характеристик суднових палив та вимог до них;

[167], [170] – проведення експериментальних досліджень для визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів.

Апробація результатів роботи. Основні результати досліджень за темою дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на низці міжнародних та Всеукраїнських наукових конференцій, зокрема:

11-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 08-10 вересня 2020 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

X-й Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4–5 листопада 2021 року, Миколаїв, Націон. ун-т кораблебудування;

12-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

Першій міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології засобів транспорту», 23-24 вересня 2021 р., Харків-Миргород, УкрДУЗТ

науково-технічній конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021-26.03.2021 р., Одеса, Національний університет «Одеська морська академія»;

науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022-25.03.2022 р., Одеса, Національний університет «Одеська морська академія»;

14-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 16-18 березня 2023 р., Херсон : Херсонська державна морська академія;

міжнародній науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023-23.03.2023 р., Одеса, Національний університет «Одеська морська академія»;

міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

IV-й міжнародній науково-практичній конференції «Дніпровські читання-2023», 07 грудня 2023 р., Київ, Державний університет інфраструктури та технологій;

V-й міжнародній морській науково-практичній конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2024», 05 березня 2024 р., Одеса, Одеський національний морський університет;

міжнародній науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2024-21.03.2024 р., Одеса, Національний університет «Одеська морська академія»;

Публікації. За темою дисертації опубліковано 24 наукові праці, з яких 9 – 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; 3 – в іноземних виданнях другого квартилю Q2, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 1 – в іноземному виданні країни ЄС (Австрія); 11 – у збірках доповідей Міжнародних наукових та науково-практичних конференцій, що проводились у провідних закладах вищої освіти України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатка (в якому надано акти впровадження результатів дослідження). Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 192 сторінки, зокрема: основний текст 140 сторінок з анотацією на 19 сторінках, перелік використаних джерел із 177 найменувань на 25 сторінках, додаток на 5 сторінках, 22 рисунки, 15 таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПАЛИВОПОДАЧІ ДИЗЕЛІВ РІЧКОВИХ ТА МОРСЬКИХ СУДЕН

1.1. Суднові дизелі та їх основні експлуатаційні показники

Суднові двигуни внутрішнього згоряння відіграють ключову роль у сучасному морському транспорті, забезпечуючи привід для руху суден та їхню роботу. Основні експлуатаційні показники цих двигунів визначають їхню продуктивність, ефективність та надійність у різних умовах експлуатації.

Першим і одним з ключових показників є потужність двигуна. Вона визначається здатністю двигуна виробляти енергію, необхідну для руху судна з певною швидкістю. Потужність зазвичай вимірюється у кінських силах або кіловатах і є важливим параметром під час вибору двигуна для конкретного судна [1, 2].

Другим важливим показником є енергоефективність. Це відношення корисної роботи, яку виконує двигун, до енергії, яку він споживає. Чим вище цей показник, тим ефективніше працює двигун, використовуючи менше палива для досягнення того ж результату [3, 4].

Третім показником є надійність. Суднові ДВЗ повинні працювати безперебійно протягом тривалого часу без серйозних відмов або поломок. Цей показник особливо важливий у віддалених морських умовах, де доступ до сервісного обслуговування може бути обмеженим [5, 6].

Ще одним показником є витрати палива. Це кількість палива, яка споживається двигуном для вироблення певної кількості енергії. Зниження витрат палива дозволяє зменшити витрати на експлуатацію судна та впливає на його конкурентоспроможність на ринку [7, 8].

Надсучасним показником є екологічні характеристики – один з найважливіших аспектів сучасних суднових дизелів, а також морських суден.

Забруднення атмосфери від викидів суднових енергетичних установок (СЕУ) стає все більшою проблемою, в зв'язку з цим виробники постійно вдосконалюють свої технології, щоб відповідати нормам та стандартам екологічної безпеки [9, 10]. Оксиди азоту та сірки є основними шкідливими речовинами, що викидаються в результаті роботи дизельних двигунів. Тому важливо розробляти та впроваджувати ефективні технології очищення випускних газів, щоб зменшити вплив суднових викидів на довкілля. Однією з таких технологій є використання систем відновлення енергії випускних газів, що дозволяють зменшити кількість викидів та одночасно підвищити енергоефективність двигуна. Інші методи включають в себе використання каталізаторів для зменшення оксидів азоту та систем фільтрації для зменшення вмісту часток у випускних газах. Розвиток альтернативних джерел енергії також може допомогти зменшити екологічний вплив суднових дизельних двигунів. Наприклад, використання скрапленого природного газу (LNG) або електричної енергії може знизити кількість викидів шкідливих речовин і зменшити забруднення морського середовища. Крім того, важливо регулярно проводити моніторинг та аналіз викидів суднових дизельних двигунів, щоб вчасно виявляти будь-які надмірні викиди та вживати заходів для їх зменшення. Загалом розвиток технологій зменшення викидів та покращення екологічних характеристик суднових дизельних двигунів є актуальним завданням для виробників, органів регулювання та всієї морської галузі. Спільні зусилля у цьому напрямку допоможуть зберегти навколишнє середовище для майбутніх поколінь та зробити судноплавство більш екологічно стабільним і безпечним [11, 12].

Додатковими показниками є технічні характеристики, управління та автоматизація. Сучасні суднові ДВЗ оснащені різноманітними системами управління та контролю, що дозволяють автоматизувати процеси їх роботи та підтримувати оптимальні режими експлуатації.

1.2. Паливні системи суднових дизелів, їх склад та призначення основних елементів

Паливні системи суднових дизельних двигунів є невід'ємною складовою частиною суднового обладнання та відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективної роботи судна. Вони складаються з ряду різноманітних елементів, кожен з яких відповідає за певні функції та має своє важливе призначення.

Основне завдання суднових інженерів під час експлуатації двигунів морських суден – забезпечити потрібну потужність та прийнятну економічність двигуна, не перевищуючи при цьому допустимий рівень механічної та теплової напруженості та регламентовану розбіжність параметрів робочого процесу по циліндрах.

Експлуатаційні показники роботи суднових дизелів характеризується:

- навантаження кожного циліндра – значенням середнього індикаторного тиску p_{mi} [13, 14];
- механічна напруженість – тиском згоряння p_z та «жорсткістю» робочого циклу $\Delta p / \Delta \varphi$ [15, 16];
- тепла напруженість – температурами стінок циліндра $t_{ст}$ та температурою випускних газів $t_{вг}$ [17, 18];
- економічність – індикаторним / ефективним коефіцієнтом корисної дії (ККД) η_i / η_e та питомою індикаторною / ефективною витратою палива b_i / b_e [19, 20].

Ці показники, що характеризують роботу циліндрів, визначаються параметрами регулювання паливної апаратури. Для конкретного нового технічно справного дизеля, у якого закон упорскування палива може бути прийнятий ідентичним по різних циліндрах, функціональний зв'язок цих залежностей може бути визначений наступним чином:

$$p_{mi} = f(h_a); \quad \Delta p / \Delta \varphi = f(\varphi_{\text{нпн}}); \quad t_{\text{ст}} = f(h_a); \quad \eta_i = f(h_a);$$

де h_a – активний хід плунжера;

$\varphi_{\text{нпн}}$ – кут випередження подачі паливним насосом (у разі традиційної паливної апаратури).

Таким чином, умови роботи кожного циліндра дизеля визначаються двома параметрами регулювання паливної апаратури – активним ходом h_a та кутом випередження подачі $\varphi_{\text{нпн}}$. Підтримка цих параметрів на встановленому рівні при експлуатації нового дизеля гарантуватиме необхідну потужність дизеля, економічність роботи, рівномірний розподіл навантаження по циліндрах, відсутність теплової та механічної напруженості. Однак до цих найважливіших параметрів регулювання слід додати ще один параметр регулювання, що визначає надійність роботи приводу паливного насоса. Цей параметр – хід плунжера від його нижнього положення до початку подачі $h_{\text{нп}}$.

Сучасні дослідження свідчать, що малообертові дизелі (МОД) мають трапеційний або близький до нього закон руху плунжера. Основна паливоподача відбувається за умови постійної швидкості руху плунжера. На розгін плунжера до повної швидкості потрібно зазвичай 4...5 мм ходу плунжера. Якщо організувати початок подачі на цій ділянці ($h_{\text{нп}} \leq 4...5$ мм), це створить додаткову напругу в приводі насоса.

У процесі експлуатації технічний стан паливної апаратури погіршується. Це зниження рівня стану має компенсуватися зміною параметрів регулювання. Функціональний зв'язок параметрів роботи циліндрів з параметрами регулювання може бути представлений у вигляді:

$$p_{mi} = f(h_a + \Delta h_a); \quad \Delta p / \Delta \varphi = f(\varphi_{\text{нпн}}); \quad t_{\text{ст}} = f(h_a + \Delta h_a); \quad \eta_i = f(h_a + \Delta h_a)$$

де Δh_a – збільшення активного ходу плунжера для забезпечення попереднього значення p_{mi} ;

$\Delta\varphi_{\text{нпн}}$ – збільшення кута випередження подачі з метою компенсації зниження рівня технічного стану паливної апаратури.

З цього випливає, що за умови погіршення стану системи впорскування палива додатково до параметрів регулювання h_a , $\varphi_{\text{нпн}}$ та $h_{\text{нп}}$ повинні братися до уваги параметри Δh_a та $\Delta\varphi_{\text{нпн}}$.

Система перекачування та підготовки палива відіграє важливу роль у забезпеченні безперебійної роботи двигуна. Ця система включає в себе насоси та фільтри, які забезпечують подачу та очищення палива перед тим, як воно потрапить до двигуна. Насоси забезпечують потрібний тиск і об'єм палива для ефективної роботи двигуна, а фільтри видаляють забруднення та інші домішки, що можуть негативно впливати на роботу системи впорскування палива [21, 22].

Підсистеми низького та високого тиску палива також є невід'ємними частинами паливної системи суднової енергетичної установки (СЕУ). Ця система відповідає за розпилення палива в камері згорання двигуна та забезпечення оптимальних умов для ефективного горіння. Паливо спочатку проходить підготовку в системі низького тиску, де воно очищується від забруднень та набуває необхідної дисперсності та за допомогою систему високого тиску впорскується в циліндри двигуна для згорання [23, 24].

Система впорскування палива відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного згорання та роботи двигуна. Ця система включає в себе різноманітні компоненти, такі як паливні насоси високого тиску (ПНВТ), форсунки, розподільні насоси, датчики тиску та інші. Форсунки відповідають за впорскування палива в камеру згорання з необхідною швидкістю та довжиною факелу для забезпечення ефективного горіння. Розподільні насоси керують подачею палива в кожний циліндр двигуна з необхідними фазами паливоподачі.

Паливні системи обладнані системами очищення палива від забруднень та води, потрапляння яких до паливної апаратури високого тиску може негативно впливати на роботу двигуна. Ці системи фільтрації та сепарації

допомагають забезпечувати високу якість палива та запобігають пошкодженню двигуна від непридатного палива [25, 26].

Не менш важливим елементом є система керування паливною системою, яка включає в себе електронні компоненти, датчики та програмне забезпечення. Це дозволяє автоматизувати та оптимізувати роботу паливної системи, забезпечуючи ефективну та економічну експлуатацію суднового двигуна.

Отже, паливні системи суднових дизельних двигунів складаються з ряду важливих елементів, які спільно забезпечують надійне та ефективне постачання палива до двигуна. Їх правильний вибір, монтаж, регулювання та обслуговування є важливими аспектами для забезпечення безперебійної роботи суднового обладнання і забезпечення безпеки плавання [27, 28].

1.2.1. Паливні системи низького тиску

Паливні системи низького тиску в суднових двигунах є важливою складовою частиною суднового обладнання, що відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного та надійного функціонування судна. Ці системи відповідають за подачу палива до двигуна з необхідним тиском та об'ємом, а також за забезпечення правильного співвідношення палива та повітря для ефективного згоряння.

У зв'язку з важливістю паливних систем низького тиску для суднових двигунів, необхідно розглянути їхню будову, принцип дії, технічні характеристики та використання у сучасних морських суднах [29, 30].

Паливні системи низького тиску в суднових двигунах складаються з ряду ключових компонентів, кожен з яких виконує свою функцію у процесі подачі та обробки палива. Основними компонентами такої системи є:

- насоси підкачування палива: відповідають за подачу палива з баків до двигуна з необхідним тиском та об'ємом;
- фільтри палива: призначені для очищення палива від забруднень та інших домішок, що можуть негативно впливати на роботу двигуна;
- клапани та автоматичні перемикачі використовуються для регулювання потоку палива в системі та контролю подачі палива до двигуна.

Принцип дії паливних систем низького тиску полягає у подачі та підготовці палива з баків до двигуна через систему насосів підкачування та ліній подачі палива. Потім паливо проходить через фільтри, які видаляють забруднення, та подається до системи впорскування для подальшого розпилення та впуску в камеру згоряння двигуна. Принцип дії системи полягає в стабільній та надійній подачі палива з мінімальними втратами тиску та безпекою експлуатації [31, 32].

Технічні характеристики паливних систем низького тиску можуть варіюватися залежно від типу та розміру судна, а також від типу та потужності двигуна. Однак основні показники, які важливі для оцінки ефективності та надійності паливної системи, включають:

- максимальний тиск подачі палива: визначає максимальний тиск, з яким паливо може бути подане до двигуна без пошкоджень системи;
- об'єм та потужність насосів підкачування: визначає об'єм та швидкість подачі палива з бака до двигуна;
- температуру та в'язкість палива перед ПНВТ;
- кількість палива, то спрямовується до циліндрів дизеля та повертається в систему магістраллю відсічного палива;
- ресурс та ефективність фільтрів палива: визначає час між обслуговуваннями та ефективність фільтрації палива;
- матеріали та конструкція ліній подачі палива: визначає міцність та стійкість до корозії [33, 34].

1.2.2. Паливні системи високого тиску

Суднові паливні системи високого тиску є ключовим компонентом суднових дизельних установок, які використовуються в різних типах морських суден – від великих контейнеровозів до річкових суден малої водотоннажності. Ці системи відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного згоряння палива та необхідної потужності двигунів. Основне функціональне призначення компонентів суднових паливних систем високого тиску полягає в наступному.

Паливні системи високого тиску в суднових двигунах відповідають за подачу палива в циліндр дизеля з необхідним тиском та об'ємом для забезпечення ефективного згоряння. Вони відіграють ключову роль у забезпеченні стабільної та надійної роботи двигуна в умовах морської експлуатації.

Паливні системи високого тиску включають ряд ключових компонентів, кожен з яких виконує важливу функцію у процесі подачі та обробки палива. Основні компоненти таких систем включають:

- насоси високого тиску – забезпечують подачу палива до форсунок з необхідним тиском для ефективного розпилення палива в камері згоряння;
- форсунки – забезпечують розпилення палива в камері згоряння під високим тиском, що сприяє ефективному згорянню палива та перетворенню енергії газів в корисну роботу двигуна;
- регулятори тиску – використовуються для контролю тиску палива в системі та забезпечення оптимальних умов для роботи ПНВТ та форсунок.

Принцип дії паливних систем високого тиску полягає у подачі палива з системи низького тиску через насоси високого тиску до форсунок з необхідним тиском для ефективного розпилення в камері згоряння. Паливо піддається стисненню та підвищенню тиску перед тим, як потрапити в камеру згоряння, що забезпечує ефективне згоряння [35, 36].

Забруднення та використання неякісного палива є серйозною проблемою, оскільки це може призвести до засмічення системи подачі палива в судових двигунах. Такі проблеми можуть впливати на ефективність роботи двигунів та призводити до серйозних збоїв.

Неякісне паливо може містити домішки, включаючи воду, відкладення та інші забруднення. Ці домішки можуть осідати у системі подачі палива, утворюючи засмічення. Це може перешкоджати нормальному руху палива до двигуна та призводити до його зупинки або зниження продуктивності.

Поганий стан системи подачі палива може спричинити збої в роботі двигуна, включаючи перебої у подачі палива, нерівномірне згорання або повне припинення роботи двигуна. Це може призвести до зниження ефективності роботи двигуна, збільшення витрат палива та негативно позначитися на загальній ефективності судна. Засмічення системи подачі палива може вимагати додаткових витрат на обслуговування та ремонт судового двигуна. Виправлення таких проблем може включати очищення системи подачі, заміну фільтрів та інші витратні процедури [37, 38].

Отже, забруднення та використання неякісного палива можуть призвести до серйозних проблем із системою подачі палива, що може впливати на ефективність роботи судових двигунів та загальну безпеку судна. Ретельне контролювання якості палива та регулярне технічне обслуговування є важливими для попередження таких проблем. Це свідчать про важливість ретельного контролю та оптимізації процесів підготовки, подачі та використання палива в судових двигунах для забезпечення ефективної, екологічної та безпечної роботи суден. Також важливим завданням є підтримання необхідного технічного стану основних компонентів паливної системи високого тиску – ПНВТ та форсунок.

1.3. Аналіз основних експлуатаційних властивостей суднових палив

Аналіз основних експлуатаційних властивостей суднових палив є важливим завданням на сучасних морських суднах, оскільки від якості та характеристик палива залежить ефективність та безпека експлуатації суден. Основні експлуатаційні властивості суднових палив включаються в такі аспекти, як: якість палива, вміст сірки, калорійність, в'язкість, температурні характеристики, стійкість до окислення та інші.

Якість палива визначається його хімічним складом та властивостями. Це включає в себе вміст вуглеводнів, сірки, метану, бензолу, ароматичних вуглеводів та інших складових [39, 40]. Чисте паливо з мінімальним вмістом домішок і шлаків сприяє ефективному згорянню та підвищує ресурс двигуна. Рівень забруднення палива є критичним параметром, оскільки від нього залежить ефективність роботи двигуна та його тривалість служби. Наявність твердих часток, води, в'язких речовин може спричинити засмічення фільтрів, знос елементів системи підкачування та інших проблем.

Високий вміст сірки у паливі може призвести до утворення сіркових оксидів при згорянні, що є шкідливими для навколишнього середовища. Тому сучасні стандарти обмежують вміст сірки у судовому паливі.

Калорійність палива визначає його енергетичну цінність. Висока калорійність палива сприяє підвищенню ефективності роботи двигуна та зменшенню споживання палива [41, 42].

В'язкість палива впливає на його текучість і рівень споживання палива двигуном. Відповідно до цього параметра вибирається необхідна температура попереднього нагріву палива [43, 44].

Температурні характеристики палива визначають, як воно реагує на зміни температури навколишнього середовища. Деякі палива можуть втрачати свої властивості при низьких температурах, що може спричинити блокування системи та проблеми з подачею [45, 46].

Загальний аналіз цих експлуатаційних властивостей дозволяє підтримувати найвищий рівень ефективності та безпеки експлуатації суден. Вибір правильного палива та його належне обслуговування є ключовими факторами для забезпечення успішної роботи суднового обладнання [47, 48].

Високий вміст сірки у судновому паливі є серйозною проблемою, оскільки він може призвести до негативних екологічних наслідків. При згорянні палива з високим вмістом сірки утворюються сіркові оксиди, які є шкідливими для навколишнього середовища і здоров'я людей. Оксиди сірки сприяють утворенню кислотних дощів, забруднюють повітря та можуть мати негативний вплив на флору та фауну [49, 50].

Саме тому сучасні стандарти та вимоги до якості палива встановлюють обмеження на вміст сірки. Ці обмеження спрямовані на зменшення викидів сіркових оксидів в атмосферу та покращення екологічної ситуації в морських районах. Наприклад, Міжнародна морська організація (International Marine Organization – IMO) встановлює стандарти для вмісту сірки у судновому паливі, зокрема в рамках Додатку VI МАРПОЛ [51, 52].

Згідно з цими вимогами, вміст сірки у судновому паливі обмежується на рівні, що забезпечує мінімальний вплив на довкілля. Наприклад, в окремих районах, таких як спеціальні райони з обмеженням викидів сірки (Sulphur Emission Control Areas – SECA), де екологічні вимоги особливо високі, допускається лише використання низько-сіркового палива з вмістом сірки не більше 0,1 %. Для інших районів встановлюються менш жорсткі, але все ж обов'язкові обмеження.

Обмеження на вміст сірки у судновому паливі є важливою складовою міжнародних стандартів та вимог щодо охорони довкілля. Ці вимоги спрямовані на зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу та покращення якості повітря в морських районах.

У деяких морських районах, таких як SECA, обмеження на вміст сірки у паливі особливо суворі. Згідно Додатку VI МАРПОЛ, в SECA допускається лише використання низько-сіркового палива з вмістом сірки не більше 0,1 %.

Це спрямовується на зменшення викидів сіркових оксидів та покращення якості повітря в цих районах [53, 54].

Поза SECA також існують глобальні обмеження на вміст сірки у судовому паливі. З 2020 року набули чинності обмеження, згідно з якими вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,5 % для всіх суден, що плавають по всьому світу. Ці міжнародні стандарти розроблені з метою зменшення негативного впливу судових викидів на довкілля та здоров'я людей.

Одним із методів зменшення викидів сіркових оксидів є використання спеціальних систем очищення випускних газів. Ці системи здатні знижувати концентрацію сіркових оксидів у викидах, що допомагає досягти вимог щодо вмісту сірки у вихлопах суден [55, 56].

Розвиток та поширення використання палив з низьким вмістом сірки та альтернативних палив, зокрема скрапленого природного газу та біодизеля, є актуальними та перспективними напрямками, орієнтованими на зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу та поліпшення екологічної ситуації.

LNG вважається одним з найбільш екологічно чистих палив, оскільки має низький вміст сірки та інших забруднюючих речовин. Використання LNG дозволяє значно зменшити викиди сіркових оксидів, а також зменшити кількість викидів парникових газів, таких як вуглекислий газ CO₂. Останнім часом спостерігається значний розвиток інфраструктури для зберігання, транспортування та розподілу LNG. Будівництво нових LNG-терміналів у морських портах та розширення LNG-флоту сприяють зростанню доступності цього палива для суден у всьому світі [57, 58].

Біодизель виготовляється з відновлюваних джерел, таких як рослинні олії або відходи рослинництва та тваринництва. Використання біодизелю сприяє зменшенню використання вуглеводнів та покращенню екологічної стійкості. Біодизель виробляється з олій, що отримують із насіння рослин (наприклад, сої, рапсу, соняшнику), а також із відходів сільськогосподарського виробництва та тваринництва, таких як жири та олії

тваринного походження. Використання цих відновлюваних джерел дозволяє зменшити залежність від вуглеводнів, що видобуваються з нерухомих джерел, таких як нафта. Біодизель є одним із перспективних напрямків в розвитку альтернативних палив, оскільки він базується на відновлюваних джерелах сировини, таких як рослинні олії або відходи рослинництва та тваринництва. Використання біодизелю сприяє зменшенню викидів парникових газів та інших шкідливих речовин в атмосферу. При згорянні біодизельних палив утворюються менші кількості вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин порівняно з традиційними паливами нафтового походження [59, 60].

Розвиток та використання низько-сіркових альтернативних палив стимулює інновації та технологічний прогрес у сфері морської промисловості. Це сприяє розробці нових технологій та методів, спрямованих на зменшення викидів та поліпшення якості екології в морських районах.

Загалом обмеження на вміст сірки у судновому паливі відіграють ключову роль у забезпеченні екологічної сталості морського транспорту та зменшенні його впливу на довкілля. Ці вимоги зобов'язують інженерів суден та виробників палива прийняття заходів для використання чистіших паливних джерел та впровадження ефективних технологій очищення викидів. Впровадження таких обмежень вимагає від операторів суден та виробників палива здійснення заходів щодо використання та виробництва низько-сіркових альтернатив, а також впровадження технологій очищення викидів сіркових оксидів. Такий підхід сприяє зниженню негативного впливу суднових палив на довкілля та допомагає зберегти морське середовище для майбутніх поколінь [61, 62].

Забезпечення екологічних та енергетичних норм є критично важливим для сучасних ДВЗ з урахуванням вимог МАРПОЛ та резолюцій ІМО. Вимоги МАРПОЛ і резолюції ІМО спрямовані на зменшення викидів забруднюючих речовин у морське середовище. Це включає обмеження викидів шкідливих

речовин, насамперед оксидів сірки та азоту, а також незгорілих вуглеводнів [63, 64].

Досягнення енергоефективності є ключовою складовою для забезпечення оптимального використання палива та зменшення викидів CO₂. Це може включати впровадження енергоефективних технологій та оптимізацію енергетичних процесів [65, 66].

СЕУ повинні відповідати суворим стандартам якості та ефективності, встановленим міжнародними організаціями, щоб забезпечити безпеку судноплавства та охорону довкілля. Впровадження новітніх технологій у СЕУ є важливим кроком у досягненні екологічних та енергетичних цілей. Це може включати використання альтернативних палив, вдосконалення систем очистки викидів, а також оптимізацію систем підготовки та подачі палива.

Для успішного впровадження екологічних та енергетичних ініціатив потрібна співпраця між міжнародними організаціями, урядами, галузевими лідерами та іншими зацікавленими сторонами. Регулювання та стимулювання інновацій у цій галузі також відіграє ключову роль. Усі ці аспекти підкреслюють важливість дотримання екологічних та енергетичних показників у сучасних СЕУ для забезпечення сталого розвитку морського транспорту та охорони довкілля.

За визначенням, ефективність оцінюється співвідношенням між досягнутим результатом та використаними ресурсами. Щодо енергетичної установки судна ефективність експлуатації може бути повною мірою оцінена надійністю та економічністю роботи головного двигуна. Ці чинники пов'язані між собою та багато в чому визначають безпеку експлуатації енергетичної установки та всього судна. Вирішується проблема ефективності експлуатації спільними зусиллями проєктантів, виробників двигунів та обслуговуючого персоналу [67, 68]. Можна виділити три основні фактори, які визначають ефективність, призводять до зниження надійності, економічності роботи двигуна та рівня безпеки:

- 1) технологічні та конструктивні недоробки тієї чи іншої моделі дизеля;

2) людський фактор, який визначається помилками або неправильними діями персоналу;

3) рівень експлуатації, що залежить від кваліфікації та рівня знань екіпажу [69, 70].

Для виробника двигуна після випуску моделі ринку на першому місці стоїть проблема надійності. На сьогодні дизелі досягли настільки високої надійності, що двигуни працюють роками без будь-яких аварійних зупинок чи висновків з експлуатації. Виявлені недоробки дизеля, що визначають надійність, оперативно усуваються постачальниками та проектантами. Прикладом можуть бути модифікації дизелів фірм Wartsilf-Sulzer і MAN-Diesel&Turbo.

Фірми постійно повідомляють про досвід експлуатації випущених моделей двигунів, змінюють інструкції з експлуатації з метою підвищення надійності. Слід відзначити велику консервативність провідних фірм-виробників головних суднових дизелів у частині вдосконалення методик регулювання та діагностики стану паливної апаратури двигунів за їх тривалої експлуатації.

За умовою високої культури виробництва рекомендації виробників щодо регулювання паливної апаратури дозволяють забезпечити паспортні параметри дизеля під час його введення в експлуатацію. Однак зміна стану елементів дизеля під час подальшої експлуатації залишається поза увагою виробників, що позначається на показниках їх економічності та надійності. Усунення цих неузгодженостей стає завданням суднових інженерів, що виконують технічну експлуатацію, обслуговування та ремонт дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту.

1.4. Аналіз причин зміни характеристик процесів подачі палива під час використання палив різного структурного і фракційного складу

Аналіз причин зміни характеристик процесів подачі палива під час використання палив різного структурного і фракційного складу дозволяє краще зрозуміти вплив компонентів палива на роботу двигуна та оптимізувати його функціонування. Різноманітність складу палива може впливати на ряд параметрів подачі палива, таких як тиск, температура, об'єм і час подачі, що може впливати на ефективність роботи двигуна, споживання палива та навіть його знос [71, 72].

Передусім, структурний і фракційний склад палива впливає на його фізичні та хімічні властивості. Наприклад, різниця у в'язкості палива може впливати на швидкість та ефективність подачі палива через трубопровідну систему. Це може призвести до зміни тиску палива на вході в форсунки та, відповідно, до зміни процесу впорскування, що впливає на характеристики згоряння палива в циліндрах двигуна.

Додатково, різниця у фракційному складі може впливати на температуру спалаху палива, що своєю чергою може впливати на процеси запалювання палива та згоряння в циліндрах. Паливо з різним структурним складом може вимагати різних умов управління системою впорскування палива для досягнення оптимального згоряння, що вимагає налаштування параметрів подачі палива [73-75].

Також важливо враховувати можливість забруднення палива, що може виникнути через його недостатню якість або довгострокове зберігання. Забруднення може призвести до утворення відкладень або засмічення системи подачі палива, що може призвести до збоїв в роботі двигуна та зниження його ефективності.

Таким чином, аналіз причин зміни характеристик процесів подачі палива під час використання різних типів палива дозволяє покращити ефективність

роботи двигуна, забезпечуючи оптимальне співвідношення між споживанням палива та ефективністю роботи. Аналіз якості процесів подачі палива залежно від типу палива є важливою складовою оцінки роботи суднових двигунів. Різні типи палива мають різні фізичні властивості, які можуть впливати на процеси подачі палива та, відповідно, на ефективність роботи двигуна [76-78].

Хімічний склад палива може впливати на його згоряння та ефективність подачі. Наприклад, вміст сірки в паливі може впливати на утворення сіркових оксидів та корозію в системі подачі палива [79-81]. Високий вміст сірки в паливі може мати серйозні наслідки для середовища та роботи двигуна. Під час згоряння палива з високим вмістом сірки утворюються сіркові оксиди, які є шкідливими для навколишнього середовища та можуть спричиняти корозію в системі подачі палива. Різні хімічні сполуки в паливі можуть мати різний вплив на його згоряння та характеристики згоряння, при цьому деякі складові можуть покращувати згоряння, зменшувати викиди та підвищувати ефективність роботи двигуна [82-84].

Невідповідна чистота палива також може впливати на його згоряння та ефективність подачі. Наявність забруднень або домішок, таких як вода чи тверді частки, може призвести до засмічення фільтрів та зниження ефективності системи подачі [85-87].

Деякі типи палива можуть вимагати спеціального обслуговування та обробки перед використанням, щоб забезпечити їхню безпечну та ефективну роботу в системі подачі. Наприклад, деякі палива можуть вимагати обробки або додавання антикорозійних або антиоксидантних добавок [88-90].

Якість палива, включаючи його ступінь очищення від забруднень та відмінностей, може впливати на ефективність подачі палива. Забруднення в системі подачі може призвести до засмічення фільтрів, зносу компонентів та зниження ефективності роботи двигуна.

Температурні умови навколишнього середовища та самого двигуна можуть впливати на термічні процеси подачі палива. Наприклад, при низьких

температурах може виникати розшарування або загущення палива, що може ускладнити його подачу [91, 92].

Операційні умови, такі як швидкість, навантаження та режим роботи двигуна, також можуть впливати на якість процесів подачі палива. Наприклад, велике навантаження може вимагати більшого обсягу подачі палива, тоді як низькі швидкості можуть вимагати більш точного контролю над подачею палива для забезпечення стійкої роботи двигуна [93-95].

Високий вміст сірки у паливі може призвести до утворення сіркових оксидів та корозії, що негативно впливає на роботу двигуна та довкілля. Високий вміст сірки у паливі є серйозною проблемою, оскільки може мати негативний вплив на роботу суднових двигунів і навколишнє середовище.

Під час згоряння палива з високим вмістом сірки утворюються оксиди сірки SO_x . Ці сполуки є шкідливими для здоров'я людини та довкілля і можуть спричиняти такі проблеми, як кислотний дощ та забруднення повітря. Оксиди сірки можуть також призводити до корозії в системах підготовки та подачі палива. Це може призвести до пошкодження та збоїв у роботі паливних насосів, фільтрів та інших компонентів системи. Оксиди сірки можуть впливати на ефективність роботи двигуна, знижуючи його продуктивність та тривалість служби. Це може призвести до збільшення витрат палива та викидів шкідливих речовин у повітря [96-98].

Викиди оксидів сірки мають серйозні екологічні наслідки, особливо для морського середовища. Вони можуть призводити до забруднення повітря та води, загибелі морських організмів і порушення екологічної рівноваги в морських екосистемах [99, 100].

Аналіз якості процесів подачі палива враховує всі ці фактори для забезпечення оптимальної ефективності роботи суднових двигунів у різних умовах експлуатації.

1.5. Висновки за розділом 1 та постановка завдання дослідження

Як результат аналізу літературних джерел з розв'язання завдання забезпечення процесів паливоподачі дизелів річкових та морських суден, що виконано в 1-му розділі визначимо наступне.

1. Безвідмовна робота, експлуатаційна надійність та досягнення необхідної потужності дизелів річкових та морських суден неможлива без забезпечення впорскування палива в циліндр дизеля.

2. Прагнення до підвищення екологічних показників дизелів річкових та морських суден, а також необхідність виконання вимог міжнародних конвенцій та класифікаційних товариств щодо попередження забруднення з боку морських суден та їх енергетичних установок змушує до використання в судових дизелях моторних палив з низьким (до 0,1 % за масою) та наднизьким (0,03...0,08 % за масою) вмістом сірки.

3. Використання палив в зазначеним вмістом сірки призводить до зміни основних експлуатаційних показників роботи дизелів річкових та морських суден, а також призводить до відхилень в роботі паливної апаратури високого тиску.

4. У визначних умовах експлуатації судових дизелів вкрай важливим стає завдання забезпечення якісного впорскування необхідної кількості палива та подальше забезпечення його ефективного згорання.

5. З урахуванням викладеного, метою наукового дослідження визначено забезпечення експлуатаційних показників судових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки, як головне завдання прийнято управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях палива з низьким вмістом сірки.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір теми наукового дослідження та визначення шляхів досягнення завдань дослідження

Наукові дослідження у галузі «Транспорт» в Начально-науковому інституті інженерії Національного університету «Одеська морська академія» ґрунтуються на основних розробках та працях доктора технічних наук, професора В.А. Голікова – заслуженого працівника народної освіти України. Саме він розробив власний підхід до наукових досліджень, який ґрунтується на філософському методі, що передбачає рух від загального до особистого через часткове.

Визначення теми наукового дослідження та розробка стратегій досягнення поставлених завдань є критичним етапом у виконанні наукової роботи. Цей процес вимагає від дослідника ретельної уваги та системного підходу для визначення оптимального напрямку дослідження та досягнення його цілей [101].

Першим кроком у цьому процесі є проведення аналізу потенційних тем, що передбачає докладне вивчення актуальних проблем або питань, що потребують подальшого дослідження. Важливо оцінювати наукову, соціальну та практичну значимість кожної теми, а також її потенційний внесок у вирішення важливих проблем галузі.

Під час вибору теми необхідно враховувати особисті інтереси та мотивації дослідника, оскільки це допомагає забезпечити пильність та зацікавленість у дослідженні протягом всього процесу. Також важливо оцінити наявні ресурси, включаючи доступні обладнання, літературу, фінансові можливості та підтримку колег або наукових керівників.

Крім того, при виборі теми необхідно враховувати потенційну важливість дослідження для наукового або професійного співтовариства. Це

може включати вплив результатів дослідження на практику, розвиток теоретичних концепцій або вирішення конкретних проблем у сфері діяльності. Отже, визначення теми та стратегій досягнення поставлених завдань є важливим етапом у виконанні наукової роботи, який вимагає уважного аналізу, систематичного підходу та врахування різноманітних факторів, що впливають на успішність дослідження.

Після вибору теми наукового дослідження наступним етапом є уважне формулювання завдань дослідження. Це включає визначення конкретних цілей, які дослідник має намір досягти у своїй роботі. Сформульовані завдання повинні бути специфічними, вимірюваними, досяжними, реалістичними та часово обмеженими. Після цього слід розглянути різні методи та підходи для досягнення поставлених цілей, оцінити їх ефективність та обрати найбільш прийнятні для конкретного дослідження. Ключовим є розробка чіткого плану дій, який дозволить систематично та ефективно працювати над дослідженням і досягати поставлених цілей.

У процесі визначення теми наукового дослідження та розробки стратегій досягнення поставлених завдань необхідно приділяти особливу увагу кожному етапу. Аналіз потенційних тем вимагає досконалого зрозуміння актуальних проблем, що потребують детального розгляду та подальшого дослідження. Вибір теми повинен враховувати не лише особисті інтереси дослідника, але й наявні ресурси та важливість теми для наукової або професійної спільноти.

Формулювання завдань дослідження є ключовим аспектом у визначенні шляхів досягнення мети. Ці завдання мають бути конкретними, вимірюваними, досяжними, реалістичними та часово обмеженими, щоб забезпечити ефективне виконання дослідження.

З урахуванням викладеного темою наукового дослідження обрано «Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден».

2.2. Обґрунтування мети, головного та допоміжних завдань дослідження

Обґрунтування мети, головних та допоміжних завдань дослідження є важливим етапом у процесі планування та виконання наукової роботи. Мета дослідження визначає загальну мету дослідника, його намір, що він прагне досягти під час проведення дослідження. Обґрунтування мети полягає у встановленні значимості теми, її актуальності та визначенні внеску, який дослідження може зробити у розв'язанні відповідних проблем або покращенні існуючих знань у відповідній галузі.

Для ефективного обґрунтування мети дослідження важливо провести аналіз актуальності обраної теми. Це передбачає дослідження сучасного стану питання, виявлення проблем, що потребують уваги та можливостей для подальшого вдосконалення чи вирішення. Також важливо визначити конкретні цілі, яких дослідник прагне досягти, та способи, якими він планує їх досягти. Після визначення мети дослідження необхідно сформулювати головні та допоміжні завдання. Головні завдання є тими, що спрямовують дослідження до досягнення основної мети, тоді як допоміжні завдання допомагають розкрити аспекти теми дослідження та забезпечити повноту та об'єктивність його результатів. Таким чином, обґрунтування мети, головних та допоміжних завдань дослідження є важливим етапом, що допомагає належно спрямувати та структурувати наукову роботу, а також забезпечити її відповідність актуальним потребам та вимогам наукової спільноти.

Головні завдання дослідження визначають специфічні цілі та завдання, які потрібно розв'язати для досягнення мети дослідження. Вони часто є ключовими етапами у дослідженні та мають напрямок досягнення цілей.

Допоміжні завдання дослідження визначають конкретні кроки, які потрібно зробити на шляху досягнення головних завдань. Ці завдання можуть включати збір даних, аналіз літератури, виконання експериментів,

розробку методології, а також інші дії, необхідні для успішного виконання дослідження. Усі ці аспекти допомагають досліднику структурувати свою роботу, визначити напрямок дослідження та забезпечити досягнення запланованих результатів.

Метою виконаного дослідження було забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки, яка на початок його проведення мало лише поодинокі, непов'язані між собою рекомендації до розв'язання.

Визначена мета дослідження базувалась на сучасних запитах практики, якими були:

- підтримання експлуатаційних показників дизелів річкових та морських суден під час використання палива з низьким вмістом сірки;
- забезпечення функціональних показників паливної апаратури високого тиску під час використання палива з низьким вмістом сірки.

Об'єктом дослідження є процес експлуатації дизелів річкових та морських суден.

Предметом дослідження є процес впорскування палива з низьким вмістом сірки в циліндри дизелів річкових та морських суден.

Стосовно виконаного дослідження як головне завдання визначено управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях палива з низьким вмістом сірки.

Його розв'язання запропоновано шляхом розв'язання трьох допоміжних завдань, якими є:

- 1) забезпечення змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки;
- 2) підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску, що забезпечує впорскування палива з низьким вмістом сірки;
- 3) визначення оптимальних фаз паливоподачі під час використання палива з низьким вмістом сірки.

2.3. Застосування системного підходу під час планування, проведення та визначення результатів наукового дослідження

Застосування системного підходу у науковому дослідженні є ключовим для ефективного планування, проведення та визначення результатів дослідження. Системний підхід у науці полягає в розгляді об'єкту дослідження як розгалуженої системи, що складається із взаємопов'язаних елементів, процесів та взаємодій. Цей підхід полягає тому, що об'єкт не можна розглядати ізольовано, оскільки його властивості та поведінка визначаються взаємозв'язками з іншими елементами системи [102].

Основна ідея системного підходу полягає в тому, щоб розглядати об'єкт як цілісну систему, а не сукупність окремих складових. Це дозволяє дослідникам отримати глибше розуміння об'єкта дослідження та розкрити складні взаємозв'язки, що існують у ньому. Застосування системного підходу дозволяє враховувати взаємодію між різними аспектами досліджуваної проблеми та враховувати їх вплив на результати дослідження.

Системний підхід також допомагає впоратися зі складністю та невизначеністю, які часто властиві науковим дослідженням. Шляхом аналізу системи в її цілісності дослідники можуть виявити невидимі на перший погляд взаємодії та фактори, які впливають на результати дослідження [103].

Отже, застосування системного підходу в науковому дослідженні є важливим для досягнення цілей дослідження та отримання надійних та об'єктивних результатів. Він дозволяє розглядати об'єкт дослідження у всій його складності та враховувати всі аспекти, що впливають на його поведінку та властивості.

Під час планування наукового дослідження системний підхід допомагає ідентифікувати всі складові системи, які потрібно врахувати в процесі дослідження. Це включає визначення ключових факторів, взаємозв'язків між ними та впливу цих факторів на результати дослідження. На цьому етапі

важливо враховувати всі аспекти системи, а також їх взаємодії, щоб забезпечити повне та об'єктивне дослідження.

Проведення наукового дослідження з використанням системного підходу передбачає аналіз усіх взаємодій та взаємозалежностей між компонентами системи. Дослідник повинен враховувати не лише окремі елементи системи, але й їх взаємодію та вплив одного елементу на інший. Це допомагає зрозуміти систему в цілому та виявити потенційні проблеми або можливості для подальшого вдосконалення.

Під час планування наукового дослідження системний підхід допомагає ідентифікувати всі складові системи, які потрібно врахувати в процесі дослідження. Це включає визначення ключових факторів, взаємозв'язків між ними та впливу цих факторів на результати дослідження. На цьому етапі важливо враховувати всі аспекти системи, а також їх взаємодії, щоб забезпечити повне та об'єктивне дослідження [104].

Це допомагає зрозуміти систему в цілому та виявити потенційні проблеми або можливості для подальшого вдосконалення.

Під час визначення результатів дослідження системний підхід допомагає зіставити отримані дані з вихідними цілями та гіпотезами. Дослідник аналізує не лише окремі результати, але й їх взаємозв'язок та відповідність вихідним цілям дослідження. Це дозволяє зробити висновки про досягнення мети дослідження та визначити подальші напрямки розвитку або вдосконалення системи [105].

Усе вищезазначене підтверджує важливість застосування системного підходу в науковому дослідженні. Він допомагає отримати комплексне та об'єктивне розуміння об'єкта дослідження, забезпечує ефективне планування та проведення дослідження та дозволяє досягти достовірних та значущих результатів.

Враховуючі основні принципи системного підходу була розроблена технологічна карта наукового дослідження, яка надана на рис. 2.1.

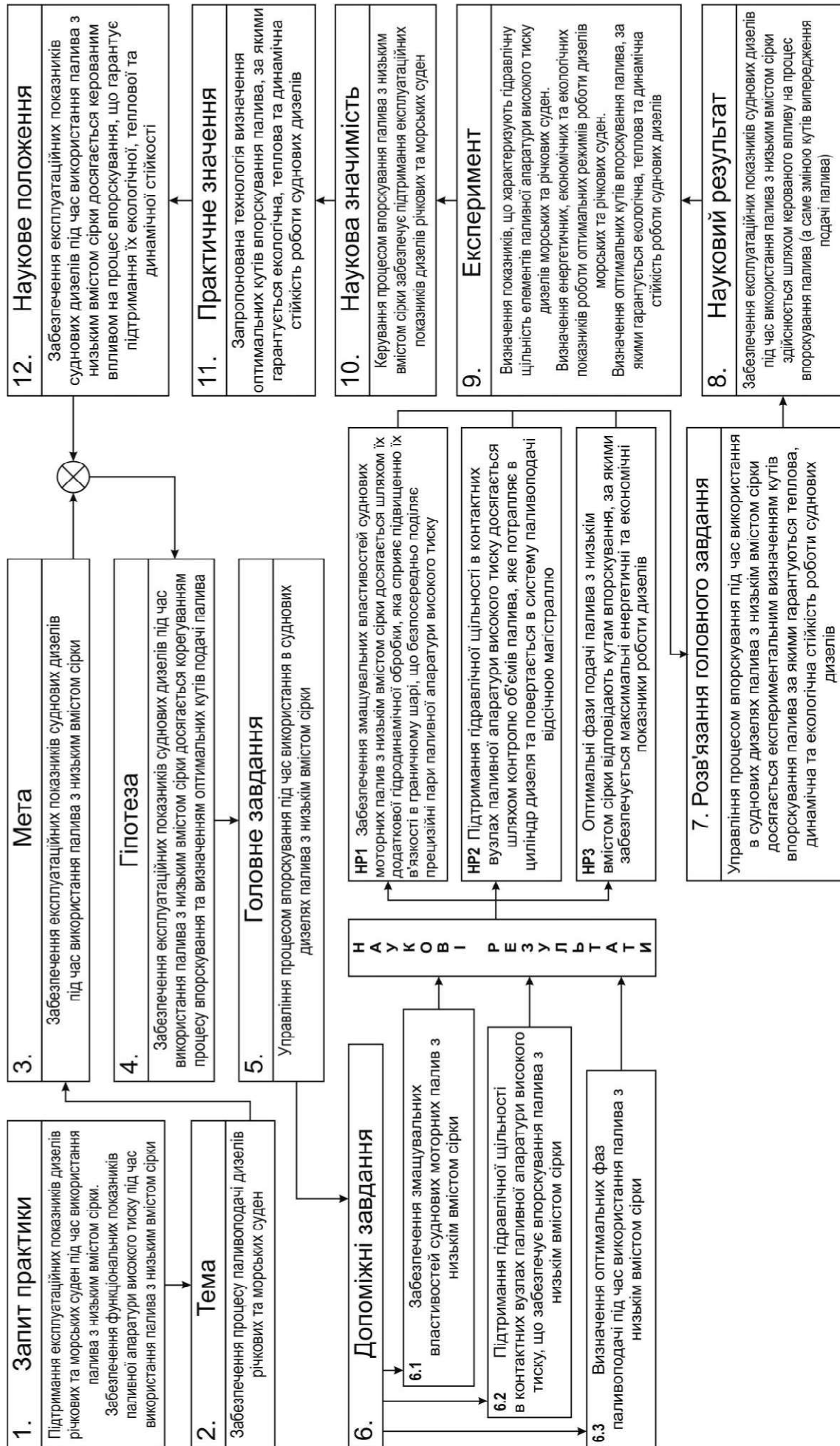


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

2.4. Організація та забезпечення проведення експериментальних досліджень

Організація та забезпечення проведення експериментальних досліджень є важливими етапами наукової роботи, що вимагають уважного планування та дотримання специфічних методологічних та технічних аспектів. Експерименти є ключовим інструментом для перевірки гіпотез, отримання нових даних та підтвердження чи спростування теоретичних припущень.

Першим кроком в організації експериментальних досліджень є ретельне планування. Це включає визначення мети дослідження, формулювання конкретних гіпотез, розробку методики експерименту та вибір необхідного обладнання та матеріалів. Важливо також урахувати етичні аспекти дослідження та можливі ризики для учасників експерименту [101].

Далі необхідно налаштувати експериментальне обладнання та забезпечити необхідні ресурси. Це може включати налаштування роботи приладів, виготовлення експериментальних зразків, підготовку лабораторних приміщень та інше. Дослідник повинен також забезпечити документацію та журнали для запису результатів та спостережень під час проведення експерименту.

Експерименти дозволяють отримати конкретні дані, які можна проаналізувати для формування висновків. Аналіз результатів експерименту дозволяє перевірити відповідність отриманих даних вихідним гіпотезам та зробити відповідні висновки. Усе це є важливим етапом наукової роботи, що сприяє розвитку знань та відкриттю нових перспектив у відповідній галузі.

Під час забезпечення проведення експериментів вирішальну роль відіграє налаштування експериментального обладнання та забезпечення необхідних ресурсів. Це включає налагодження роботи приладів, установок або інших технічних засобів, які будуть використовуватися під час досліджень. Важливо перевірити їх коректну роботу та забезпечити

відповідність параметрів налаштування вимогам експериментального плану. Цей процес охоплює низку кроків, спрямованих на забезпечення ефективності та точності проведення досліджень.

Далі може знадобитися виготовлення експериментальних зразків або деталей, необхідних для проведення досліджень. Це може включати в себе виготовлення прототипів, спеціальних конструкцій або інших матеріалів, які будуть використовуватися під час експериментів. Крім того, підготовка лабораторних приміщень або робочих місць є необхідною умовою для успішного проведення експериментів. Важливо забезпечити необхідні умови для роботи, такі як: стабільні температурні умови, необхідне освітлення та вентиляція, щоб забезпечити адекватність умов проведення досліджень. Нарешті, важливо мати належну документацію та журнали для запису результатів та спостережень під час проведення експериментів. Це дозволить систематично фіксувати отримані дані, аналізувати їх та зробити відповідні висновки.

Забезпечення проведення експериментів вимагає комплексного підходу та ретельної підготовки всіх етапів дослідницького процесу. Це дозволяє забезпечити надійність та точність отриманих результатів, що є важливим для подальшого наукового аналізу та висновків.

Після завершення експерименту необхідно аналізувати отримані дані та робити висновки. Це включає обробку даних, статистичний аналіз результатів та порівняння їх з вихідними гіпотезами. Дослідник також повинен визначити можливі фактори, що впливають на результати експерименту та розглянути їхні наслідки.

Організація та забезпечення проведення експериментальних досліджень є складним процесом, який вимагає від дослідника вміння планувати, координувати та аналізувати різноманітну інформацію. Від правильної організації та проведення експериментів залежить достовірність та значущість отриманих результатів, що відіграє ключову роль у розвитку науки та вирішенні важливих проблем.

2.5. Обладнання та пристрої під час проведення експериментів

Під час дослідження використовувалися спеціальні вимірювальні прилади та обладнання, а саме:

1) датчики потоку палива, температурі палива та густини:

- модель Siemens SITRANS F M Flow Sensor;
- модель Honeywell SmartLine ST700 Flow Transmitter;
- модель Endress+Hauser Proline Promass Coriolis Flowmeter;

2) датчики тиску в системі палива:

- модель Ashcroft 1008S Pressure Transmitter;
- модель WIKA S-10 Pressure Transmitter;
- модель Emerson Rosemount 3051S Pressure Transmitter;

3) датчики тиску в циліндрах та температури газів на виході з циліндрів:

- модель: Kistler Piezoelectric Cylinder Pressure Sensor;
- модель: Bosch Automotive Pressure and Temperature Sensor;
- модель: AVL Cylinder Pressure Sensor.

Комп'ютерні системи моніторингу: сучасні суднові двигуни часто обладнані комп'ютерними системами моніторингу, які автоматично збирають та аналізують дані про роботу двигуна, включаючи його потужність.

Основним програмним та технічним забезпеченням, яке використовувалося під час проведення експериментів, була новітня система контролю та управління MAN ME-C CoCoS (Control and Monitoring System). MAN ME-C CoCoS є передовою платформою, розробленою компанією MAN Energy Solutions для оптимізації роботи двигунів і забезпечення найвищої ефективності та надійності їх функціонування.

Ця система пропонує широкі можливості контролю та моніторингу ключових параметрів двигуна, включаючи, але не обмежуючись, такі як час впорскування палива, тиск у циліндрі, температура, склад вихлопних газів та інші. Завдяки вбудованим діагностичним функціям, система здатна

оперативно виявляти можливі несправності або відхилення в параметрах роботи двигуна, що дозволяє проводити швидке та ефективне усунення проблем.

Крім того, MAN ME-C CoCoS забезпечує можливість оптимізації режимів роботи двигуна з метою зменшення споживання палива та викидів, що робить її ідеальним інструментом для проведення експериментів, спрямованих на вдосконалення та інновації у сфері дизельної технології. Таким чином, MAN ME-C CoCoS стає невід'ємною складовою частиною дослідницьких робіт та розвитку нових технологій у сфері двигунобудування і морської індустрії. MAN ME-C CoCoS (Control and Monitoring System) - це передова система управління двигуном, розроблена компанією MAN Energy Solutions для їхніх двотактних дизельних двигунів. Ця система відіграє ключову роль у контролі та регулюванні різних аспектів роботи двигуна, забезпечуючи оптимальну продуктивність, ефективність та контроль викидів.

Під час проведення досліджень система MAN ME-C CoCoS забезпечувала:

- 1) контроль впорскування палива – при цьому точно контролювався час та тривалість впорскування, тиск палива, тиск в циліндри двигуна;
- 2) оптимізацію згоряння – шляхом моніторингу параметрів, таких як тиск у циліндрі, температура та склад випускних газів;
- 3) обробку випускних газів – шляхом використання системи рециркуляція випускних газів (Exhaust Gas Recirculation – EGR);
- 4) моніторинг показників робочого циклу дизеля – шляхом безперервного стеження на надання управляючої дії на процес впорскування палива та випуску газів (Fuel injection and valve actuation valve – FIVA valve), що забезпечується постійним відслідкуванням основних експлуатаційних показників дизеля, насамперед потужності, витрати палива, складу випускних газів.

2.6. Висновки за розділом 2

1. З урахуванням наукової спеціальності 271 – морський та внутрішній водний транспорт, на підставі обов'язкового виконання сучасних вимог щодо екологічних показників роботи морських та річкових та безпосередньо двигунів внутрішнього згорання; враховуючи запити практики, якими визначені підтримання експлуатаційних показників дизелів річкових та морських суден під час використання палива з низьким вмістом сірки, а також забезпечення функціональних показників паливної апаратури високого тиску під час використання палива з низьким вмістом сірки:

сформульована тема наукового дослідження – «Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден»;

визначена мета дослідження – забезпечення експлуатаційних показників судових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки;

встановлено головне завдання дослідження – управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях палива з низьким вмістом сірки, а також наступні допоміжні завдання: 1) забезпечення змащувальних властивостей судових моторних палив з низьким вмістом сірки; 2) підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску, що забезпечує впорскування палива з низьким вмістом сірки; 3) визначення оптимальних фаз паливоподачі під час використання палива з низьким вмістом сірки.

2. Об'єктом дослідження визначено процес експлуатації дизелів річкових та морських суден.

Предметом дослідження обрано процес впорскування палива в циліндри дизелів річкових та морських суден.

3. З урахуванням основних принципів системного підходу розроблена технологічна карта наукового дослідження.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В ПАЛИВНІЙ АПАРАТУРІ ВИСОКОГО ТИСКУ ПІД ЧАС ПОДАЧІ ПАЛИВА В ЦИЛІНДР ДИЗЕЛЯ

3.1. Аналіз комплектації паливних систем високого тиску суднових дизелів

Паливні системи високого тиску відносяться до основних систем, що забезпечують функціонування суднових двигунів та сприяють ефективне спалювання палива та оптимальну ефективність роботи двигуна. Аналіз комплектації цих систем є ключовим етапом у забезпеченні безперебійної та економічно експлуатації суден.

Насамперед, важливо враховувати якість самого палива, яке використовується. Особливо це стосується дизельного палива, оскільки будь-які домішки або забруднення можуть негативно позначитися на роботі системи високого тиску. Тому важливим елементом є наявність системи фільтрації, яка ефективно видаляє тверді частинки та інші домішки з палива перед тим, як воно потрапить у насоси високого тиску.

Регулярне проведення технічного обслуговування системи паливоподачі та вчасна заміна фільтрів також важливі для забезпечення безперебійної роботи. Необхідно підтримувати оптимальний рівень тиску в системі паливоподачі, оскільки недостатній тиск може призвести до неправильного розпилення палива і зниження ефективності роботи двигуна.

Крім того, слід ретельно вивчати рекомендації виробників щодо використання конкретного типу палива та дотримуватися їх, оскільки це може вплинути на експлуатаційну надійність і потужність двигуна.

Другим важливим аспектом є сам насос високого тиску. Його конструкція, матеріали, точність виготовлення та налаштування відіграють ключову роль у забезпеченні оптимального тиску та постачанні палива до

форсунок. Сучасні системи використовують високоефективні електронно-керовані насоси, які забезпечують точну і динамічну подачу палива залежно від потреб двигуна[106, 107].

Існує два основних типи насосів високого тиску: плунжерні та клапані. Плунжерні насоси забезпечують більш точну і динамічну подачу палива, але вони також більш складні і дорогі. Клапані насоси менш точні, але вони більш прості і доступні.

Насоси високого тиску виготовляються з різних матеріалів, таких як сталь, алюміній і композитні матеріали. Вибір матеріалу залежить від декількох факторів, включаючи тиск, температуру і хімічний склад палива. Точність виготовлення: Точність виготовлення насоса має вирішальне значення для його ефективності та надійності. Невеликі дефекти можуть призвести до значних втрат тиску і витоку палива.

Налаштування насосів високого тиску є критичним етапом у забезпеченні оптимальної продуктивності та ефективності двигуна. Правильне налаштування включає в себе регулювання тиску палива, подачі палива та моменту спрацювання форсунок.

Регулювання тиску палива важливе для забезпечення оптимальної кількості палива, яка потрапляє в камеру згоряння. Недостатній тиск може призвести до нестабільної роботи двигуна або недопалу палива, в той час як занадто великий тиск може спричинити перевищення робочого навантаження на двигун.

Подача палива також потребує уваги, оскільки правильне регулювання цього параметру дозволяє досягти оптимального співвідношення повітря та палива для забезпечення ефективного згоряння та максимальної потужності.

Момент спрацювання форсунок визначає час впорскування палива в камеру згоряння. Цей параметр важливий для забезпечення точного впорскування палива під час роботи двигуна в різних режимах роботи.

Усі ці налаштування повинні відповідати чітко визначеним вимогам і характеристикам двигуна, а також бути проведені кваліфікованим

персоналом з урахуванням виробничих стандартів та рекомендацій виробника обладнання. Неправильне налаштування може призвести до збоїв у роботі двигуна, погіршення ефективності споживання палива та збільшення викидів шкідливих речовин.

Сучасні системи впорскування палива використовують високоефективні електронно-керовані насоси, які забезпечують точну і динамічну подачу палива залежно від потреб двигуна. Це дозволяє двигуну працювати більш ефективно, з меншою витратою палива і викидів.

Крім вищевказаного, важливо також зазначити, що система впорскування палива повинна бути інтегрована з іншими системами двигуна, такими як система управління двигуном і система подачі повітря. Це гарантує, що всі компоненти працюють разом для забезпечення оптимальної роботи двигуна.

Вдосконалення систем впорскування палива справді є однією з найважливіших тенденцій у розробці двигунів внутрішнього згорання. Ці системи впливають на кілька ключових аспектів роботи двигуна і мають значний вплив на його ефективність, чистоту та потужність.

По-перше, сучасні системи впорскування палива дозволяють більш точно дозувати та розпилювати паливо у камері згорання. Це покращує ефективність згорання палива, знижує викиди шкідливих речовин і сприяє збільшенню потужності двигуна.

По-друге, сучасні системи впорскування дозволяють здійснювати більш точне управління процесом впорскування палива. Це може включати в себе регулювання часу впорскування, кількості палива та його розподілу між окремими циліндрами. Це сприяє збільшенню продуктивності та ефективності роботи двигуна в різних режимах експлуатації.

Крім того, сучасні системи впорскування палива також використовують передові технології для забезпечення чистоти вихлопних газів, зменшення викидів шкідливих речовин і відповідності вимогам стандартів щодо екологічної безпеки [108].

Форсунки мають вирішальне значення у системі впорскування палива, особливо у двигунах з внутрішнім згорянням. Вони відповідають за розпилення палива у циліндрі двигуна з високою точністю та в необхідний момент. Сучасні форсунки мають досить високу точність роботи, що дозволяє оптимізувати процес згоряння палива та зменшувати викиди шкідливих речовин.

За допомогою сучасних технологій, таких як електронне управління та різні механізми впорскування, форсунки можуть точно дозувати паливо із високою швидкістю та в відповідний момент часу. Це дозволяє підтримувати оптимальне співвідношення повітря та палива в кожному циліндрі, що покращує ефективність згоряння та знижує викиди оксидів азоту та інших шкідливих речовин.

Крім того, сучасні форсунки можуть мати різні режими роботи, що дозволяє їм адаптуватися до різних умов експлуатації та потреб двигуна. Вони можуть змінювати об'єм і час впорскування палива в залежності від швидкісного режиму роботи дизеля, навантаження та інших факторів.

Отже, форсунки є важливим елементом системи впорскування палива, який визначає ефективність та потужність двигуна. Їхнє постійне вдосконалення дозволяє сучасним судновим енергетичним комплексам продовжувати покращувати характеристики двигунів та зменшувати їхні впливи на довкілля.

Аналіз комплектації паливних систем високого тиску судових дизелів є складним процесом, який вимагає уваги до деталей та використання передових технологій для забезпечення оптимальної продуктивності та довговічності двигунів. Таким чином, вдосконалення систем впорскування палива відіграє важливу роль у розвитку сучасних двигунів внутрішнього згоряння, роблячи їх більш ефективними, екологічними та потужними.

3.1.1. Паливні системи високого тиску з механічним приводом паливного насосу

Паливні системи високого тиску з механічним приводом паливного насосу високого тиску дійсно відіграють важливу роль у судновій енергетиці, де надійність та ефективність є критичними умовами для безперебійної роботи суден. Ці системи відповідають за подачу палива з високим тиском у камери згоряння суднових двигунів, щоб забезпечити їх ефективну роботу.

У судновій енергетиці, де судна можуть працювати в різноманітних умовах, від важких морських штормів до довгих перевезень великими відстанями, паливні системи повинні бути дуже надійними та відповідати високим стандартам ефективності [109, 110].

Механічний привід паливного насосу високого тиску є одним із найпоширеніших типів приводів у суднових паливних системах. Він працює як комплекс деталей який включає в себе: розподільний вал, шестерні та ролики штовхачі та забезпечує постійний тиск на паливний насос, щоб він міг подавати паливо з високим тиском до циліндрів двигуна.

Надійність цих систем є критичною, оскільки будь-який збій у подачі палива може призвести до зупинки двигуна і серйозних проблем для судна. Тому вони проходять суворі перевірки на відповідність міжнародним стандартам та регулярні обслуговування для забезпечення безперебійної роботи.

Таким чином, паливні системи високого тиску з механічним приводом паливного насосу високого тиску є невід'ємною частиною суднових двигунів, що забезпечують їх ефективну та надійну роботу в різних умовах експлуатації.

Механічний привід паливного насосу високого тиску може включати в себе різноманітні механізми, які забезпечують передачу руху від двигуна до насосу з необхідною силою та точністю.

Механічні механізми, що забезпечують привід паливного насосу високого тиску, спільно працюють для забезпечення ефективної роботи паливної системи високого тиску. Вони мають точну конструкцію та забезпечують надійну передачу руху, що дозволяє паливному насосу працювати з високими показниками продуктивності та ефективності.

Основні вимоги до паливних систем високого тиску для суднових двигунів полягають у високій продуктивності, надійності та ефективності під час довгих періодів експлуатації в умовах морського середовища. Ці системи повинні бути здатні забезпечити стабільний тиск палива навіть у важких погодних умовах та під час маневрів судна.

Загалом, висока якість конструкції та надійність механічних механізмів, які забезпечують привід паливного насосу високого тиску, є важливими аспектами для забезпечення безперебійної роботи паливної системи суднових двигунів. Їхня ефективність та надійність є ключовими факторами для успішної експлуатації суден у морському середовищі. Точно так, з урахуванням важливості надійності та ефективності, паливні системи високого тиску для суднових двигунів з механічним приводом паливного насосу високого тиску розробляються з урахуванням вимог суднової індустрії і відповідають найвищим стандартам якості і безпеки.

Під час проектування та виготовлення цих систем враховуються специфічні вимоги суднової експлуатації, такі як: надійність у різних погодних умовах, довговічність під час тривалих періодів роботи та висока ефективність за різних швидкостей та навантажень.

Крім того, у процесі розробки і виробництва враховуються інші важливі аспекти, такі як екологічні стандарти щодо викидів, безпека експлуатації та можливість монтажу та обслуговування.

Отже, паливні системи високого тиску для суднових двигунів з механічним приводом паливного насосу високого тиску підлягають суворому контролю якості на всіх етапах виробництва, щоб забезпечити їхню надійність, ефективність та безпеку в умовах морського середовища.

3.1.2. Паливні системи високого тиску з електронним управлінням процесом паливоподачі

Паливні системи високого тиску для суднових двигунів з електронним управлінням процесом паливоподачі є сучасними та ефективними рішеннями, які використовують передові технології для оптимізації роботи суднових двигунів. Ці системи використовують електронні контролери та сенсори для регулювання подачі палива з точністю і відповідно до поточних умов експлуатації.

За допомогою електронного управління можливе точне регулювання часу впорскування палива, об'єму подачі та інших параметрів впорскування. Це дозволяє оптимізувати роботу двигуна для різних режимів експлуатації, що включає плавний запуск, ефективне прискорення та стабільну роботу на різних швидкостях.

Крім того, електронні системи управління можуть забезпечити більш точну діагностику та моніторинг роботи паливної системи та двигуна в цілому. Вони можуть автоматично коригувати параметри в реальному часі для оптимізації продуктивності та зменшення викидів шкідливих речовин.

Такі системи також можуть бути інтегровані з іншими системами управління судновими двигунами, що дозволяє підтримувати високий рівень автоматизації та дистанційного управління судном.

Основні компоненти паливної системи з електронним управлінням включають в себе: електронний контролер, електронний привід, електронне управління процесом

Електронний контролер є центральним блоком системи управління, який приймає дані від сенсорів і приймає рішення щодо оптимальної подачі палива. Він аналізує різноманітні параметри, такі як швидкість обертання двигуна, температура, тиск палива та інші, щоб визначити потреби двигуна в

паливі та налаштувати процес впорскування палива для оптимальної продуктивності та ефективності.

Цей контролер може використовувати різні алгоритми та стратегії для управління подачею палива в залежності від умов експлуатації та потреб двигуна. Наприклад, він може реагувати на зміни в навантаженні, регулювати час впорскування та кількість палива для забезпечення оптимального співвідношення повітря та палива в камері згоряння.

Крім того, електронний контролер може використовувати дані від сенсорів для діагностики та моніторингу роботи системи впорскування палива та двигуна в цілому. Він може виявляти будь-які аномалії або проблеми та вживати відповідних заходів для їх вирішення. Електронний контролер відіграє важливу роль у роботі системи впорскування палива, забезпечуючи оптимальну подачу палива для суднового двигуна з урахуванням різноманітних умов експлуатації та потреб двигуна.

Електронний привід паливного насосу високого тиску є важливим компонентом системи впорскування палива, який використовує передові електронні технології для управління роботою паливного насосу. Його основна функція полягає в тому, щоб забезпечити точну та ефективну подачу палива з необхідним тиском до циліндрів двигуна. Цей механізм приймає команди від електронного контролера, який аналізує різноманітні параметри роботи двигуна та умов експлуатації. Відповідно до цих даних, електронний привід регулює роботу паливного насосу, контролюючи час впорскування, об'єм палива та тиск, щоб забезпечити оптимальне співвідношення повітря та палива в камері згоряння [111].

Однією з ключових переваг електронного приводу є його здатність до точного та швидкого реагування на зміни в умовах роботи двигуна. Він може динамічно адаптуватися до різних режимів експлуатації, таких як різка зміна обертів до повного навантаження, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу системи впорскування палива. Крім того, електронний привід може забезпечити більш точну та рівномірну подачу палива до кожного циліндра,

що дозволяє підвищити ефективність згоряння, зменшити викиди та підвищити продуктивність двигуна.

Електронний привід паливного насосу високого тиску є сучасним рішенням, яке допомагає підвищити ефективність та надійність систем впорскування палива для сучасних судових двигунів. Його використання дозволяє досягти оптимальних результатів у різних умовах експлуатації та забезпечити безперебійну роботу судових систем.

Електронне управління процесом паливоподачі дозволяє досягти оптимальної ефективності, підвищити точність та реактивність системи у порівняно з механічними системами. Воно також дозволяє забезпечити оптимальний рівень шкідливих викидів та витрати палива, що робить такі системи важливим компонентом для сучасних судових двигунів.

Wartsila-Sulzer RT-flex та MAN-Diesel&Turbo ME є двома різними технологіями двигунів внутрішнього згоряння, які використовуються в судових енергетичних установках. Система управління впорскуванням палива.

Система, що встановлена на дизелях Wartsila-Sulzer RT-flex, – це сучасна система впорскування палива, яка використовує безпосереднє впорскування палива з електронним управлінням. Основною перевагою цієї системи є використання передової електроніки для точного регулювання процесу впорскування палива. Електронна система управління дозволяє забезпечити оптимальну ефективність роботи двигуна та знизити рівень викидів шкідливих речовин. За допомогою цієї системи можна точно контролювати час впорскування палива, його об'єм, тиск та інші параметри, що впливають на процес згоряння [112].

Однією з головних переваг дизелів Wartsila-Sulzer RT-flex є його здатність адаптуватися до різних режимів роботи двигуна та умов експлуатації. Це дозволяє забезпечити оптимальну роботу навіть при змінних умовах, таких як швидкість обертання вала, температура та навантаження.

Крім того, електронне управління дозволяє підтримувати стабільність роботи двигуна та запобігти можливим проблемам, таким як перегрів або перевантаження. Це робить електронну систему управління дизелів Wartsila-Sulzer RT-flex надійним та ефективним рішенням для сучасних суднових двигунів [113].

Wartsila-Sulzer RT-flex являє собою передову технологію в галузі впорскування палива, яка дозволяє досягти високої ефективності та екологічної чистоти в роботі суднових двигунів. Її використання сприяє підвищенню продуктивності та зниженню впливу на навколишнє середовище.

MAN-Diesel&Turbo ME – це ще одна передова система впорскування палива, що використовує безпосереднє впорскування палива, але з електронним управлінням, яке відоме як ME-C (Electronic Control). Ця технологія дозволяє точно контролювати розподіл палива та оптимізувати процес згоряння для досягнення високої ефективності та зниження рівня викидів.

Електронне управління дизелів моделі ME забезпечує точний контроль параметрів впорскування палива, таких як час, об'єм та тиск. Це дозволяє досягти оптимального співвідношення повітря та палива в камері згоряння, що забезпечує ефективне використання палива та зменшення викидів.

Однією з ключових переваг дизелів MAN-Diesel&Turbo ME є його здатність адаптуватися до різних умов експлуатації та навантажень. Це дозволяє забезпечити стабільну та ефективну роботу двигуна навіть при змінних умовах, що сприяє підвищенню продуктивності та зменшенню витрат палива.

Крім того, електронне управління дозволяє системі ME-C забезпечити високий рівень діагностики та моніторингу роботи двигуна. Це дозволяє оперативно виявляти та усувати будь-які проблеми, що можуть виникнути, та забезпечує надійну та безперебійну роботу суднових двигунів.

MAN-Diesel&Turbo ME це технології в галузі впорскування палива, яка дозволяє досягти високої ефективності, економічності та екологічної чистоти в роботі сучасних суднових двигунів.

Обидва типи двигунів мають свої унікальні конструкційні особливості та технічні параметри, які впливають на їхню продуктивність, ефективність та надійність.

У MAN-Diesel&Turbo ME можуть використовуватися деякі технології, такі як газотурбіна регенерація випускних газів, що спрямовані на зниження викидів та підвищення ефективності роботи двигуна.

Обидва типи двигунів є популярними серед операторів суден і використовуються в широкому спектрі суден різних класів і типів.

Вибір між Wartsila-Sulzer RT-flex і MAN-Diesel&Turbo ME зазвичай залежить від конкретних вимог до судна, його експлуатаційних умов та потреб. Кожен з цих типів двигунів має свої переваги і може бути оптимальним у певних ситуаціях.

3.2. Аналіз взаємозв'язку параметрів стану паливної апаратури високого тиску та параметрів робочого процесу дизеля

Регулювання та налаштування суднових дизелів виконується в три етапи:

- 1) під час доведення його показників до необхідних на стенді заводу-будівельника;
- 2) у процесі остаточних випробувань безпосередньо на судні, що передують прийомці судна та його енергетичної установки;
- 3) під час безпосередньої експлуатації дизеля.

Протягом усіх цих етапів розбіжність потужності по циліндрах на повному навантаженні дизеля та повному ходу судна не повинна відрізнятися

більш ніж на $\pm 2,5\%$ [90]. Однакове навантаження циліндрів із нормованим допуском розбіжностей забезпечується за даними індиціювання шляхом відповідної зміни індексу паливного насоса (для дизелів, що обладнані ПНВТ з механічним або гідравлічним приводом) або відповідного відкриття розпилувачів форсунок (для дизелів з електронною системою управління). Це означає – шляхом зміни активного ходу плунжера h_a , хоча такий параметр, як правило, і не використовується на заводах як регульовальний. Якщо у нового добре відрегульованого двигуна виміряти h_a , то виявиться, що цей параметр буде приблизно рівним по всіх циліндрах [114, 115].

З часом у процесі експлуатації технічний стан паливної апаратури погіршується. Задля забезпечення того ж навантаження циліндра необхідно збільшувати індекс паливного насоса, тобто погіршення технічного стану компенсується збільшенням активного ходу плунжера h_a . Що гірший технічний стан, то більший активний хід для забезпечення того ж середнього індикаторного тиску p_{mi} в циліндрі. Отже, параметри h_a та p_{mi} можуть використовуватися для оцінки ступеня зміни стану паливної апаратури.

Сімейство взаємозв'язків $p_{mi}=f(h_a)$, попередньо побудованих з різним технічним станом системи подачі палива, можна використовувати для діагностики її поточного технічного стану. У принципі ці залежності дозволяють розв'язувати також завдання регулювання паливної апаратури за умови її довільного технічного стану, а саме – однозначно відповісти на питання, наскільки потрібно змінити активний хід плунжера, щоб отримати необхідний середній індикаторний тиск у циліндрі технічно справного дизеля. Неодмінною умовою такого підходу є наявність регульовальної статичної характеристики ПНВТ для кожного циліндра конкретного дизеля, що дозволяє знайти активний хід плунжера в будь-якому режимі експлуатації за значенням індексу насоса. Регульовальні характеристики знімаються індивідуально для кожного паливного насоса дизеля за розробленою методикою для насосів клапанного або золотникового типів. Виконання цієї процедури потребує близько однієї години часу.

Еталонна характеристика рис. 3.1 відповідає хорошему технічному стану системи впорскування палива. Припустимо, що двигуна характеризується точкою 1. При погіршенні технічного стану характеристика системи зміщується вниз. Під час роботи на характеристиці за тому ж активному ході плунжера середній індикаторний тиск у циліндрі буде менше (точка 2). Для забезпечення того ж середнього індикаторного тиску активний хід має бути збільшений на величину Δh_a (точка 3). Крива С відповідає гранично допустимому погіршенню технічного стану системи подачі палива, коли циліндр ще може дати повну потужність. Нижче цієї кривої не може бути забезпечена повна потужність у циліндрі, або в циліндрі відсутній спалах палива на мінімальних обертах двигуна. Робота в цьому діапазоні неприпустима за умовами безпеки мореплавання.

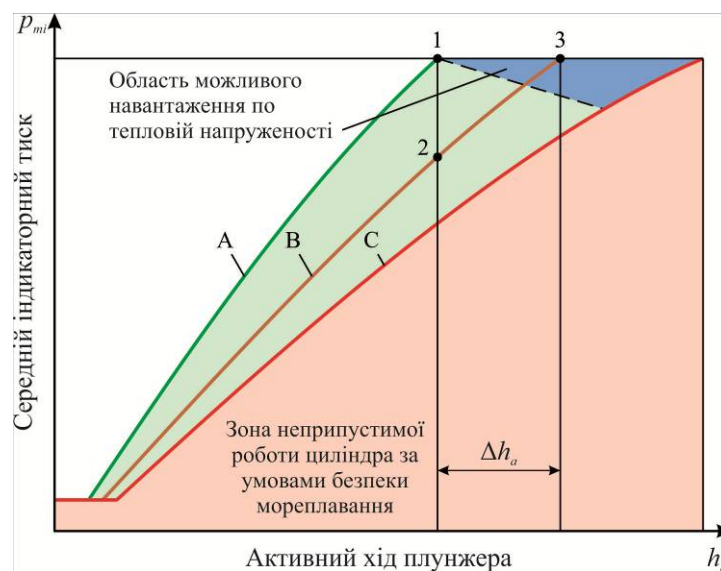


Рис. 3.1. Схема діагностичних характеристик паливної апаратури

Фірма MAN-Diesel&Turbo запропонувала залежність середнього індексу ПНВТ за циліндрами (Average fuel pump index) від середнього індикаторного тиску за всіма циліндрами (Average mean indicated pressure) для оцінки девіації середнього індексу ПНВТ за часом. Залежність індексу паливного насоса (ПН) від середнього індикаторного тиску $\text{ПН} = f(p_{mi})$ може використовуватись для орієнтовної оцінки зміни технічного стану паливної апаратури. Але не можна зробити кількісні висновки щодо необхідної зміни

регулювальних параметрів під час зміни стану системи впорскування для виведення дизеля на необхідні параметри. Неможливо оцінити запас на допустиму зміну технічного стану.

Не викликає сумнівів, що середній індикаторний тиск у циліндрі визначається насамперед активним ходом плунжера. На перший погляд видається, що залежності $p_{mi}=f(h_a)$ та $\text{ПНВТ}=f(p_{mi})$ ідентичні, оскільки для даного циліндра кожному значенню ПНВТ відповідає одне цілком певне значення h_a . Однак взаємозв'язок між індексом ПНВТ (для двигунів Wartsila-Sulzer – показником навантаження) та активним ходом у загальному випадку не є прямопропорційним на всіх режимах експлуатації. Для клапанних насосів це крива лінія. Для плунжерних насосів вона може бути шматково-лінійною або криволінійною (рис. 3.2).

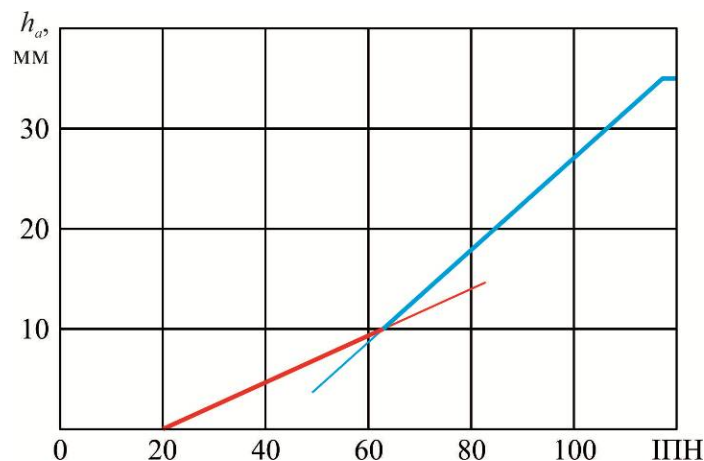


Рис. 3.2. Залежність збільшення активного ходу плунжера h_a для двигунів внутрішнього згорання

Навіть суто формальний розгляд схеми зв'язку параметра p_{mi} з індексом ПНВТ і з активним ходом плунжера (рис. 3.3) показує раціональніший характер залежності $p_{mi}=f(h_a)$, що виключає необхідність врахування 3-х верхніх блоків під час побудови характеристик (технологічних похибок виготовлення плунжерних пар, похибок монтажу ПНВТ та впливу зазорів у механізмі приводу регулювання циклової подачі).

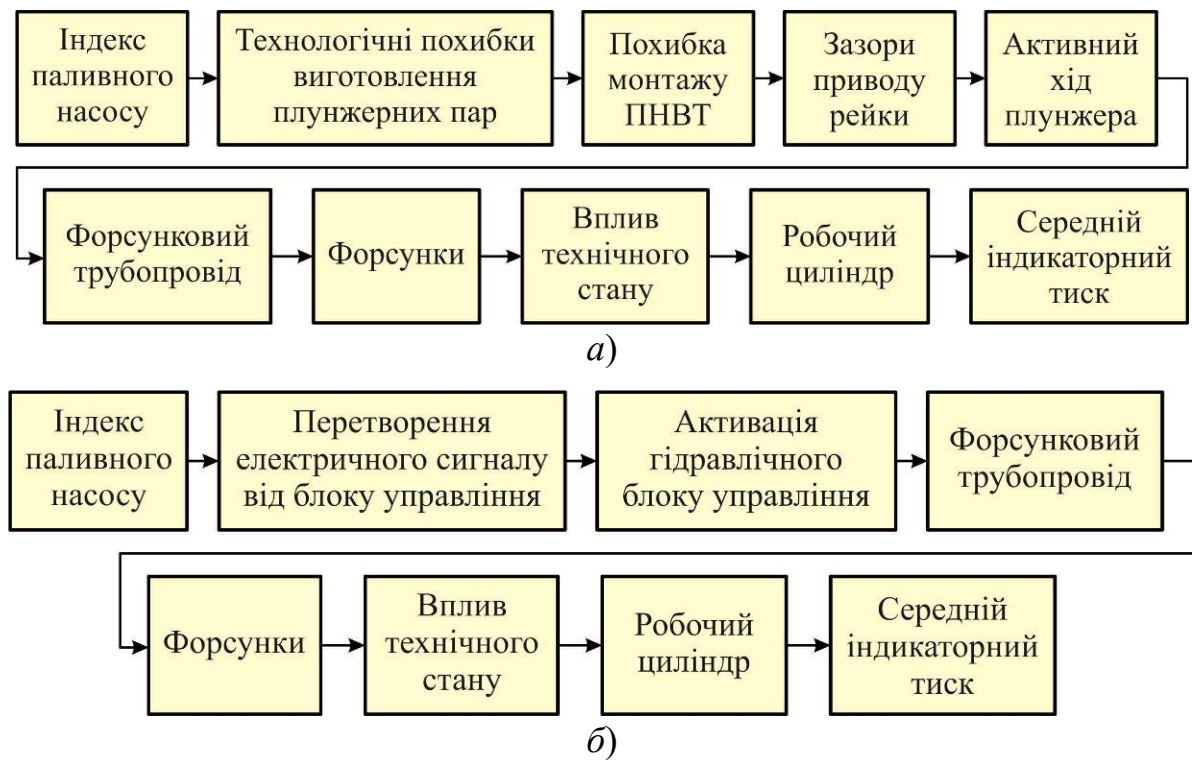


Рис. 3.3. Зв'язок індексу ПНВТ з активним ходом плунжера та середнім індикаторним тиском у циліндрі дизеля:

а – з механічним приводом ПНВТ; б – з електронною системою упарвління

Реально відмінності глибші. Вирішення питань діагностування та регулювання паливної апаратури конкретного циліндра за допомогою узагальненої залежності $ITH=f(p_{mi})$ не є можливим, оскільки ця залежність є індивідуальною для кожного циліндра (див. рис. 3.4). При однакових активних ходах індекси ПНВТ циліндрів можуть бути різними, відмінності можуть досягати 30...32 поділів. У той самий час, залежності $p_{mi}=f(h_a)$ при різному технічному стані елементів системи упорскування (ПНВТ – форсуночний трубопровід – форсунка) мають узагальнений та універсальний характер для всіх конструкцій незалежно від виробника паливної апаратури даного типорозмеру [116,117].

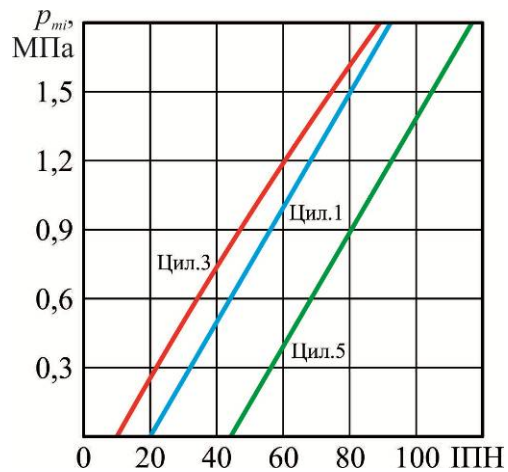


Рис. 3.4 Очікувана залежність $p_{mi}=f(ІТН)$ для 3-х циліндрів головного дизеля 6S60MC за умовою еталонного стану паливної апаратури

Слід очікувати нелінійності взаємозв'язку між індексом ПНВТ та середнім індикаторним тиском через низку причин. Зі зростанням частоти обертання двигуна, відповідним зростанням ІПН приблизно пропорційно зростає тиск упорскування, проте циклова подача палива, яка в основному визначає p_{mi} зростає пропорційно до кореня квадратного від тиску. На циклову подачу також впливає зміна втрати на стисливість палива при відсіканні, зміна дроселювання на початку pf в кінці впорскування зі зміною навантаження двигуна. З іншого боку, за зміною навантаження змінюється індикаторний ККД циклу, що впливає на величину середнього індикаторного тиску. Усе це не враховується залежністю $ІПН=f(p_{mi})$, представленої фірмою у вигляді прямої лінії. Однак усі особливості паливоподачі та характеру перебігу робочого процесу враховуються формою залежностей $p_{mi}=f(h_a)$.

Запропоновані діагностичні графіки вперше дозволили обґрунтовано вирішувати питання безпеки мореплавства шляхом своєчасного та обґрунтованого вибракування елементів системи паливоподачі на основі поточного індиціювання двигуна. Про необхідність заміни елементів системи впорскування палива свідчить розташування точки роботи циліндра в зоні нижче кривої C (рис. 3.1), де на пускових обертах двигуна в циліндрі відсутній спалах, а на повних обертах циліндр не може дати повну потужність.

Практичне використання діагностичних характеристик передбачає умову – дизель перебуває у технічно справному стані. Сімейство залежностей $p_{mi}=f(h_a)$ при різному технічному стані системи подачі палива технічно справного дизеля може бути побудовано експериментальним або розрахунковим шляхом та використано на всьому періоді експлуатації двигуна. Фірми-будівельники принципово не можуть використовувати такий шлях діагностування та регулювання паливної апаратури, оскільки не мають регульовальних характеристик ПНВТ для кожного циліндра, що не дозволяє використовувати параметр h_a (активний хід плунжера) як регульовальний.

Функціональна блок-схема розрахунку діагностичних характеристик $p_{mi}=f(h_a)$ дана на рис. 3.5. Вихідними даними для розрахунків є параметри регулювання ПНВТ та швидкісний режим. Технічний стан враховується протікання палива $G_{пр}$ крізь ущільнення ПНВТ та форсунки.

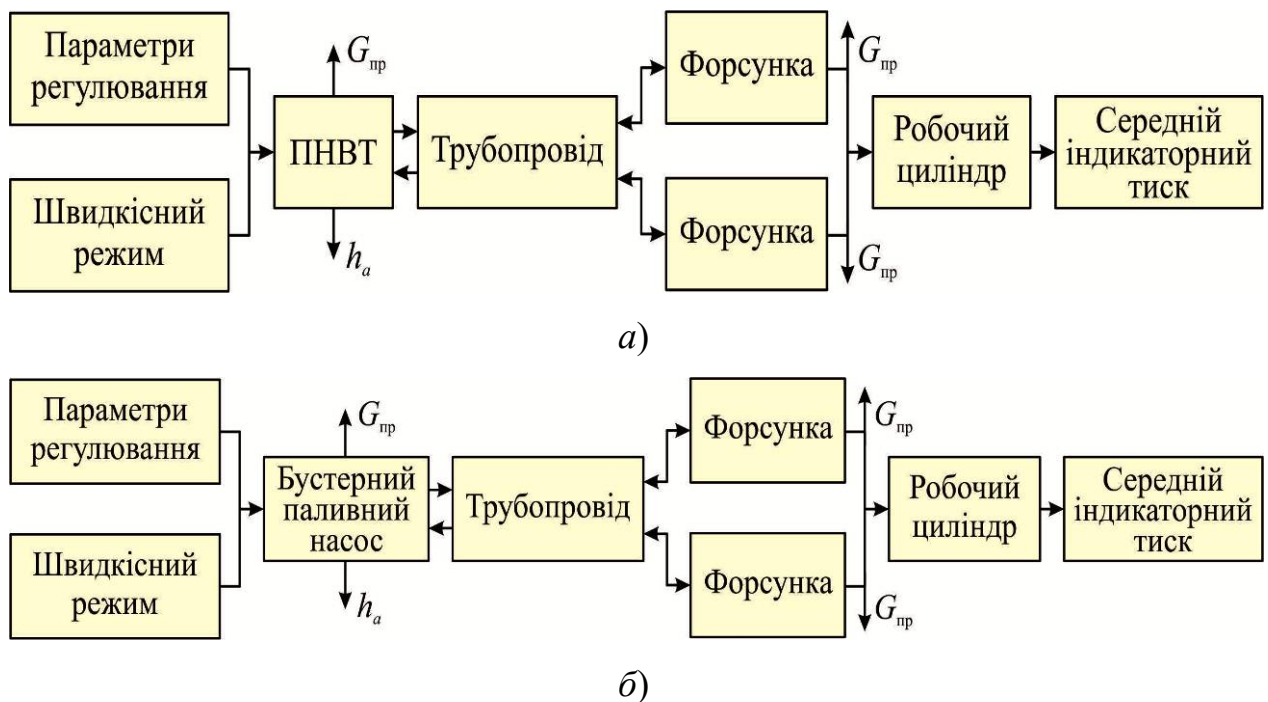


Рис. 3.5. Функціональна блок-схема розрахунку параметрів стану паливної апаратури високого тиску:

а – з механічним приводом ПНВТ; б – з електронною системою управління

Для аналітичного розв'язання завдання побудови діагностичних характеристик паливної апаратури двигуна необхідно:

- розрахувати циклову подачу палива одним із методів теоретичного розрахунку на всіх режимах експлуатації двигуна за умови різного технічного стану системи упорскування палива;
- оцінити розрахунком, яке значення середнього індикаторного тиску в циліндрі може бути отримано на кожному розрахунковому режимі, що дозволить розв'язати поставлене завдання [118,119].

3.3. Аналіз методів теоретичного розрахунку процесу паливоподачі

Головні суднові дизелі мають досить протяжні форсункові трубопроводи (при цьому це відноситься як для двигунів з електронним управлінням, а також для дизелів з розподільним валом). Навіть у двигунів із «верхнім» розташуванням ПНВТ або загального блоку common rail довжина форсункового трубопроводу вимірюється метрами (двигун 6L60MC – 2,935 м, двигун S70MC – 2,93 м, двигун 8G85ME – 3,15 м). У двигунів з «нижнім» розташуванням ПНВТ (двигуни Wartsila-Sulzert) довжина форсункового трубопроводу може досягати 7,6...12,3 м. З цієї причини система подачі палива є гідродинамічною системою; паливоподача в судовому дизелі – це гідродинамічний процес, що відбувається з накладенням прямих та відбитих хвиль у форсунковому трубопроводі. Непрямим підтвердженням значення хвильових процесів є встановлення демпферів коливань на всі ПНВТ крейцкопфних двигунів. Процес палива в такій системі не може бути розрахований з достатньою точністю за допомогою статичних методів розрахунку. Процес може бути розрахований одним із методів, що отримали назву «гідродинамічні», в яких враховуються хвильові явища у форсунковому трубопроводі системи паливоподачі [120].

В основу розрахунку хвильових процесів у трубопроводі паливної системи покладено рівняння неусталеного руху ізотермічного нестационарного потоку рідини, що стискається. Нестала течія палива описується рівняннями збереження маси, імпульсу та енергії. Під час порівняно невисоких тисків паливоподачі, що спостерігаються в суднових дизелях, можна вважати, що теплофізичні властивості палива не залежать від тиску і температури. Тоді замість рівняння збереження енергії може бути використане рівняння стану краплинних рідин. Рівняння мають вигляд [121]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial p + \rho u^2}{\partial x} = -2k\rho u; \quad \partial p = \frac{1}{a^2} \partial p; \quad (3.1)$$

тут a – швидкість поширення звукової хвилі у паливі за умови змінного тиску $p = \text{var}$.

Після нескладних перетворень можна перейти до системи рівнянь, еквівалентних наведеним вище:

$$\begin{aligned} \frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{u^2}{a^2} \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial p}{\partial x} + u\rho \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} &= -2k\rho u. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Ця система дозволяє врахувати вплив зміни тиску на густину середовища $\rho = \rho(p)$ та швидкість звуку в середовищі $a = a(p)$. Зробимо припущення про те, що в процесі подачі палива одиничного циклу густина палива і швидкість звуку в ньому мало залежать від тиску (тобто $u\rho \frac{\partial p}{\partial x} = 0$).

Це припущення визначається незаперечно малою величиною швидкості u порівняно зі швидкістю звуку a ($u \ll a$). Тоді система рівнянь (3.2) набуває більш простого вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} \frac{\partial p}{\partial \tau} + a\rho \frac{\partial u}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} &= -2k\rho u. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ця система вирішується спільно з системою диференціальних рівнянь, що описують зміну граничних умов (зміна тиску та швидкості палива у насоса та у форсунки). В основу гідродинамічних методів при розрахунку процесу в граничних обсягах покладено рівняння збереження маси рідини, що стискається (нуль мірна постановка задачі). У загальному випадку граничні умови у насоса з одним нагнітальним клапаном та одним форсунковим трубопроводом описуються рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_n}{\partial \tau} \alpha V_n &= f_n \frac{\partial h}{\partial \tau} - \mu f_n \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_n - p_0} - \mu f_n \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_n - p_k} - f_k \frac{\partial y}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial p_k}{\partial \tau} \alpha V_k &= f_k \frac{\partial y}{\partial \tau} + \mu f_k \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_n - p_k} - f_m u_m; \\ M_k \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} &= f_k (p_n - p_k) - C_0 (y_0 - y). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Перше рівняння цієї системи є рівнянням нерозривності потоку стисливої рідини в порожнині нагнітання насоса. Параметри палива в цьому об'ємі передусім визначаються законом руху плунжера $C_n = dh/d\tau$, а також витратою через впускні та відсічні органи з ефективною площею μf_e , витратою через щілину нагнітального клапана (перетин μf_w) та об'ємом, що стає зайвим під час руху нагнітального клапана (останній член рівняння) [121].

Друге рівняння системи є рівняння нерозривності потоку в об'ємі штуцера нагнітального клапана. Перший член у правій частині – це об'єм під час руху нагнітального клапана, 2-й член – витрата через щілину з порожнини нагнітання насоса в порожнину штуцера, 3-й член – витрата в трубопровід. Третє рівняння системи визначає рух нагнітального клапана з урахуванням 2-го закону Ньютона.

Граничні умови паливного насоса високого тиску сучасного дизеля типу МС з двома форсунковими трубопроводами без нагнітального клапана описуються рівнянням:

$$\frac{\partial p_n}{\partial \tau} \alpha V_n = f_n \frac{\partial h}{\partial \tau} - \mu f_n \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_n - p_0} - 2f_{тр} C_{тр}.$$

Це рівняння є рівнянням нерозривності потоку стисливої рідини в порожнині нагнітання насоса. Як і в загальному випадку, параметри палива в цьому обсязі визначаються законом руху плунжера $C_n = dh/d\tau$, витратою через відсічні органи з ефективною площею μf_s та об'ємом палива, що витісняється у два форсункові трубопроводи (останній член рівняння). За наявності трьох форсункових трубопроводів в останньому члені рівняння замість коефіцієнта 2 повинен бути коефіцієнт 3. Динаміка всмоктувального клапана не враховується, оскільки клапан сідає на сідло в кінці низхідного ходу плунжера під дією тиску палива в трубопроводі, що підводить і не впливає будь-яким чином на витрату протягом усього перебігу ходу нагнітання плунжера [122].

Аналогічні диференціальні рівняння граничних умов можуть бути записані для кожної з форсунок, які встановлюються у судових сучасних двигунів по дві-три на циліндр. Якщо знехтувати динамікою рециркуляційного клапана форсунки, який закривається при тиску 15...50 бар, то рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dp_\phi}{d\tau} \alpha V_\phi &= u_\tau f_\tau - \mu f_n \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_\phi - p_p} - f_u \frac{dz}{d\tau}; \\ \frac{dp_\phi}{d\tau} \alpha V_p &= \mu f_n \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_\phi - p_p} - f_n \frac{dz}{d\tau} + \mu_c f_c \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_p - p_c}; \\ M \frac{d^2 y}{d\tau^2} &= f_u (p_\phi - p_{\phi u}) - f_u p_p + C_1 z. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Перше рівняння системи (3.5) визначає зміну тиску перед голкою форсунки, 2-е рівняння – тиск у кишені розпилювача та 3-є рівняння – закон руху голки форсунки.

Наведені вище системи диференціальних рівнянь руху рідини та граничних умов у насоса та у форсунки розв'язують в основному методом Ейлера. Гідродинамічний метод, запропонований в [123], під час розв'язання системи (3.3) не враховує вплив тертя у форсунковому трубопроводі (робиться припущення $k=0$). Якщо рівняння збереження кількості руху в системі продиференціювати по τ , а збереження маси – по x і розв'язати їх щодо похідних по u , то отримаємо тривіальне хвильове рівняння:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (3.6)$$

Хвильове рівняння (3.6) має точний розв'язок у вигляді запису передавальних функцій трубопроводу, як каналу зв'язку:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + F(\tau - x/a) - W(\tau + x/a); \\ u &= u_0 + (F(\tau - x/a) - W(\tau + x/a))/a\rho, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де F і W – функції прямої та відбитої хвилі тиску з урахуванням початкових та граничних умов на кінцях трубопроводу.

Диференціальні рівняння граничних умов у насоса та у форсунок інтегруються за низкою явних схем різного порядку точності. Результати проведених за цими виразами моделювань, показують, що схема Рунге-Кутта для їх розв'язання є цілком достатньою. Даний метод дає хороші результати під час розрахунку паливоподачі у дизелях з короткими форсунковими трубопроводами, що працюють на дизельному паливі, де можна обґрунтовано знехтувати втратами на тертя у трубопроводі.

Гідродинамічний метод, запропонований в [124], створювався до розрахунку паливоподачі в середньообертових дизелях (СОД) і високообертових дизелях (ВОД). При розв'язанні диференціальних рівнянь

граничних умов на кінцях системи метод доповнено залежностями, що враховують зміну щільності середовища при збереженні припущення $\rho = const$ у форсунковому трубопроводі. Граничні рівняння інтегруються методом Ейлера за очевидною схемою. Для опису трубопроводу рівняння збереження кількості руху в процесі диференціюється по τ , а збереження маси – по x . При цьому можна отримати «телеграфне» рівняння процесу, що враховує вплив в'язкості палива на процес поширення хвиль у трубопроводі високого тиску:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - \frac{2k}{a^2} \frac{\partial u}{\partial \tau} = 0. \quad (3.8)$$

Якщо враховувати лише вплив в'язкості на амплітуду коливань, то телеграфне рівняння дає розв'язання у явному вигляді, як і хвильове рівняння:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + e^{-k\tau} \left(F\left(\tau - \frac{x}{a}\right) - W\left(\tau + \frac{x}{a}\right) \right); \\ u &= u_0 + e^{-k\tau} \left(F\left(\tau - \frac{x}{a}\right) - W\left(\tau + \frac{x}{a}\right) \right) \frac{1}{\rho a}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де F і W – пряма та відбита хвилі тиску;

$e^{-k\tau}$ – множник, що враховує зменшення амплітуди хвилі тиску через в'язкість палива.

Спеціально для розрахунків процесів у паливній апаратурі суднових двигунів створювався гідродинамічний метод в [123, 125] та його учнів та послідовників Івановського В.Г. та Варбанця Р.А. [109, 110]. У цій розрахунковій моделі диференціальні рівняння граничних обсягів мають той самий вигляд, що й у моделях; розглянутих вище. Інтегрування ведеться шляхом Ейлера з частковим дозволом системи отриманих різниць. Розрахунок розбитий на окремі етапи, що характеризуються незмінністю граничних умов, і виконується за частковими рівняннями кожної фази функціонування ПНВТ чи форсунки.

Для опису процесу в трубопроводі використовується телеграфне рівняння (3.8), яке розв'язується методом лінійних характеристик. Будується рівномірна розрахункова сітка – по осі « x » з кроком h та по осі « t » з кроком Δt , де повинен виконуватися критерій Куранта-Леві як: $h=a\Delta t$. В результаті з телеграфного рівняння отримуємо «3-шарову» схему для визначення швидкості палива у довільному вузлі розрахункової сітки:

$$u_m^{n+1} = b_1(u_{m-1}^{n-1} + u_m^n) + b_2(u_{m+1}^n - u_m^{n-1}) + b_3 u_{m-1}^n, \quad (3.10)$$

де $b_1 = \frac{k\Delta\tau}{1+k\Delta\tau}$; $b_2 = \frac{1}{1+k\Delta\tau}$; $b_3 = \frac{1-k\Delta\tau}{1+k\Delta\tau}$ – змінні, розраховані на основі конструктора розрахункової сітки та режиму течії.

При переході до граничних обсягів – у насоса (за умовою $x=0$) та у форсунки (за умовою $x=L$) – значення швидкості визначається на основі кінцево-різницевої апроксимації рівнянь нерозривності системи (3.4) та (3.5):

$$\begin{aligned} u_0^n &= u_1^n + \frac{1}{a\rho}(p_0^n - p_0^{n-1}); \\ u_L^n &= u_{L-1}^n - \frac{1}{a\rho}(p_L^n - p_L^{n-1}). \end{aligned} \quad (3.11)$$

При такому підході робиться припущення про миттєве зростання тиску у всіх точках граничного об'ємі, що вносить незначну похибку.

Гідродинамічний спосіб розрахунку, запропоновані в [123, 126], по суті аналогічний методу Фоміна-Івановського-Варбанця з тією різницею, що у вузлах системи тут визначається не швидкість, а тиск.

Гідродинамічний метод з урахуванням криволінійних характеристик у додатку до розрахунку трубопроводів розроблені [123, 127]. Подальший розвиток метод отримав у [123, 128]. На реальному рівні його розробки метод може бути застосований не тільки для розрахунків паливоподачі у судновому МОД, а й в інших типах двигунів, де можуть бути розриви суцільності в елементах системи упорскування.

Гідродинамічний метод, запропонований [124], заснований на застосуванні методу великих частинок для опису процесу в трубопроводі та рівнянь [123] для граничних об'ємів. Недоліком методу є введення параметра штучної (схемної) в'язкості, який підбирається під час розрахунків методом спроб і помилок, що може дати більшу похибку розрахунку.

Гідродинамічний метод, базується на чисельній схемі розпаду довільного розриву [125], Як рівняння стану для двофазного палива використовується експериментально отриманий поліном. Для газового середовища у трубопроводі використано рівняння стану ідеального газу.

Слід зазначити, що використання трьох останніх із розглянутих гідродинамічних методів розрахунку паливоподачі з урахуванням змінної швидкості звуку та змінної щільності середовища не виправдано складно для інженерних розрахунків. Ці методи слід віднести до наукових розробок. Процеси паливоподачі в судновому МОД за нормальних умов відбуваються лише в однофазному середовищі. Про це свідчить швидкість звукової хвилі у форсунковому трубопроводі – за даними наших експлуатаційних досліджень, швидкість звуку в паливі знаходиться в межах 1100...1300 м/сек залежно від фізичних характеристик палива, що свідчить про відсутність розриву суцільності та відсутність парової фази у форсунковому трубопроводі. Тому використання методів розрахунку 2-фазних середовищ у загальних випадках розрахунків паливоподачі суднових двигунів не має сенсу. Для розрахунку паливоподачі в судновому МОД цілком може бути застосований простіший метод гідродинамічного розрахунку з урахуванням лише амплітудного згасання хвильового процесу.

Трохи окремо від розглянутих вище методів існує метод гідродинамічного розрахунку систем палива на основі електроакустичних аналогій, названий «частотним» або «спектральним». Вперше метод було застосовано для розрахунків паливної апаратури газотурбінних двигунів. Ідея використання методу розв'язання завдань прямого проектування паливної апаратури суднових дизелів запропонована [123]. Особливістю методу є

використання закономірностей пасивного електричного чотири полюсника як частотної функції – коефіцієнта передачі – для зв'язку закону впорскування палива форсункою двигуна із законом руху плунжера ПНВТ. Конструктивні співвідношення елементів системи паливоподачі виражаються через акустичні параметри. Оскільки імпульси тиску у форсунковому трубопроводі задовольняють умовам Діріхле, то на основі принципу суперпозиції імпульси складної форми можна подати у вигляді суми імпульсів простої (гармонічної) форми. Прийнемо, що тиск p_0 та об'ємна швидкість (ξ_0) змінюються за законом: $p_0 = p_{m0} e^{i\omega t}$; $\xi_0 = \xi_{m0} e^{i\omega t}$. Тоді розв'язання диференціального рівняння хвильового процесу будуть наступні залежності для тиску та об'ємної швидкості:

$$\begin{aligned} p_T &= p_{Tl} Ch\gamma x + \xi_{Tl} W Sh\gamma x; \\ \xi_T &= \xi_{Tl} Ch\gamma x + \frac{P_{Tl} Sh\gamma x}{W}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

де $\gamma = \beta + ia$ – коефіцієнт поширення;

β – коефіцієнт загасання;

a – коефіцієнт фази;

W – акустично хвильовий опір трубопроводу.

Для розкладання імпульсів тиску у насоса та у форсунки в ряд Фур'є безпосередньо за формулами Ейлера-Фур'є було розроблено метод гармонійного аналізу при кусково-лінійній апроксимації вихідних даних [122]. Метод дає похибку за параметром «похибка форми імпульсу тиску» до 8,5...19,5 %. Ця похибка визначається припущенням про лінійність системи. Для МОД припущення справедливе не більше частот від 0 до 200...250 Гц.

Розроблений метод розрахунку дозволив вперше дати однозначну відповідь і на інше важливе питання – про прохідні перерізи розпилювача форсунки. Це можна зробити на основі поняття «ступінь узгодженості навантаження та трубопроводу», що дорівнює:

$$K_n = \frac{2}{1 + W/Z_n},$$

де Z_n – акустичний опір розпилювача форсунки.

Максимальна узгодженість системи, коли хвильовий опір форсункового трубопроводу дорівнює акустичному опору розпилювача ($W=Z_n$). У цьому $K_n=1$ відбита хвиля відсутня. У принципі величина K_n може бути використана і для кількісної оцінки ступеня розробки соплових отворів розпилювача. Однак для судження про зміну технічного стану всіх елементів системи подачі палива використання цього показника вимагає додаткових досліджень.

3.4. Аналіз методів розрахунку процесу паливоподачі за статичними параметрами

Важливою особливістю паливоподачі в судновому МОД є перебіг більшої частини процесу у випадку незмінних граничних умов у насоса і форсунки – нагнітальний клапан та голка форсунки нерухомі і знаходяться в крайніх верхніх положеннях. Під час підготовки вихідних даних до розрахунку основна трудомісткість припадає саме на підготовку вихідних даних для розрахунку початкової та кінцевої фази упорскування: маса та геометрія нагнітального клапана, голки форсунки, геометрія штуцера, кишені розпилювача і т.і. Під час проектування нових конструкцій ці елементи визначаються досить легко. У разі експлуатації їх визначення часом пов'язане з винятковими труднощами. Тому під час розробки практичного методу розрахунку паливоподачі суднового МОД спрощують розрахунок для початкової і кінцевої фаз упорскування, використовуючи експериментальні дані натурних випробувань головних суднових двигунів. При цьому відпало

завдання щодо підготовки великої кількості вихідних даних без помітного зниження точності розрахунку.

На підставі багатоваріантних розрахунків з мінімізації вихідних даних було встановлено, що через низьку частоту обертання та довгі форсункові трубопроводи в сучасних судових МОД за критерієм можуть бути застосовані як статичні, також і динамічні методи розрахунку паливної апаратури. Комбінація цих двох підходів може бути використана на основі точного розв'язання телеграфного рівняння (3.8) за умови сталості швидкості звуку та густини палива у трубопроводі. Під час розрахунку з урахуванням використання мінімального набору конструктивних параметрів приймаються такі припущення:

- в'язкість палива враховується за аналогією з методом логарифмічного декременту згасання; коефіцієнт загасання може бути прийнятий за дослідними даними [113, 114];

- паливоподача у двигуні здійснюється на 1, 3 і т.і. форсункового трубопроводу з форсунками; приймається повна ідентичність процесів у кожному із цих трубопроводів, тому що вони мають рівну довжину;

- форсункові трубопроводи від насоса до розпилювачів форсунок мають постійний прохідний переріз, що підтверджується кресленнями заводу-виробника;

- залишковий тиск у системах з нагнітальним клапаном постійним для одиничного розрахунку, приймається за досвідченими даними; за відсутності нагнітального клапана тиск у трубопроводі між упорскуваннями дорівнює тиску підкачування палива;

- дроселювання подачі на початку і в кінці активного ходу плунжера нехтуємо;

- за наявності нагнітального клапана час його підйому дорівнює кроку розрахунку; клапан піднімається, коли тиск у порожнині нагнітання насоса стає більшим від залишкового тиску в трубопроводі;

- початок посадки нагнітального клапана відбувається одночасно з відкриттям відсічного органа;
- впливом деформації форсуночного трубопроводу нехтуємо, оскільки трубопроводи виконуються товстостінними;
- трубопровід є односпрямованою передатною ланкою прямої та зворотної хвилі до граничних обсягів; інтерференцією хвиль у трубопроводі нехтуємо;
- час підйому голки форсунки приймається за відомими даними; робиться припущення про рівномірний підйом голки у функції часу;
- висота підйому голки форсунки проявляється у пропорційному збільшенні площі соплових отворів розпилювача;
- моменти початку та кінця подачі по насосу для кожного режиму визначаються за статичними моментами початку та кінця подачі відповідно до регулювальних характеристик ПНВТ.

При обумовлених припущеннях рівняння витрати насоса до підходу відбитої хвилі запишеться у вигляді:

$$\alpha_{сж} V_n \frac{dp_n}{d\tau} = f_{пл} C_{пл} - f_{тр} C_{тр},$$

де V_n – об'єм порожнини нагнітання насоса;

$$C_{тр} = \frac{P_n - P_0}{a\rho} \quad \text{– швидкість прямої хвилі.}$$

З урахуванням відбитої від форсунки хвилі W можна записати:

$$\alpha_{ст} V_n \frac{dp_n}{d\tau} = f_{пл} C_{пл} - f_{тр} C_{тр} + f_{тр} W_{(\tau+lm_p/a)} e^{-\beta lm_p}$$

де $e^{-\beta lm_p}$ – член, що враховує загасання хвильового процесу.

Розв'язанням останньої рівності в кінцевих різницях є такий вираз:

$$p_{н(i+1)} = \frac{\frac{\alpha_{ст} V_{нi+1}}{\Delta\tau} p_{пл} + f_{тр} C_{пли}^{ср} \sigma_0 + \frac{kf_{пл}}{2a\rho} \cdot (2p_0 - p_{ни}) \sigma_1 - kf_{тр} W_{i-1/2\tau} e^{-\beta\tau\rho} \sigma_2}{\frac{\alpha_{ст} V_{нi+1}}{\Delta\tau} + \frac{f_{тр}}{2a\rho} \sigma_1},$$

У цьому рівнянні:

$p_{ни}, p_{н(i+1)}$ – тиск у насоса на i -тому та $(i+1)$ -му часових розрахункових інтервалах;

k – кількість форсункових трубопроводів та форсунок;

$\alpha_{ст}$ – ізотермічний коефіцієнт стисливості палива;

ρ – густина палива;

a – швидкість звукової хвилі;

$f_{пл}, f_{тр}$ – площі поперечного перерізу плунжера та форсункового трубопроводу;

$V_{н(i+1)}$ – поточний об'єм порожнини нагнітання насоса;

$C_{пли}^{ср}$ – середня швидкість плунжера на розрахунковому інтервалі;

p_0 – залишковий тиск у системі;

$W_{i-1/2\tau}$ – відбита від форсунки хвиля швидкості, що підійшла до насоса через час $1/2\tau$;

$\tau=2l_{тр}/a$ – період коливань хвильового процесу системи;

$\Delta\tau$ – розрахунковий інтервал часу;

β – коефіцієнт загасання хвильового процесу;

$\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ – поодинокі функції:

$$\sigma_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau_{нн} > \tau_1 > \tau_{н}; \\ 1 & \text{при } \tau_{нн} \leq \tau_1 \leq \tau_{н}; \end{cases}$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} 0 & \text{при } p_{ни} \leq p_0; \\ 1 & \text{при } p_{ни} > p_0; \end{cases}$$

$$\sigma_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau_1 \leq \tau_{нн} + 1/2 \tau; \\ 1 & \text{при } \tau_1 > \tau_{нн} + 1/2 \tau; \end{cases}$$

τ_0 – час початку руху плунжера доконечно подачі насоса;

$\tau_{\text{нп}}$ – час від початку руху плунжера до початку подачі.

Об'єм порожнини нагнітання насоса для кожного розрахункового інтервалу визначається як:

$$V_{\text{н}i+1} = V_{\text{н}i} - f_{\text{пл}} C_{\text{пл}i}^{\text{сп}} \Delta\tau.$$

Середня швидкість плунжера на розрахунковому інтервалі знаходиться як напівсума швидкостей на початку та в кінці інтервалу:

$$C_{\text{пл}i}^{\text{сп}} = \frac{C_{\text{пл}i} + C_{\text{пл}(i-1)}}{2}.$$

Рівняння суцільності для камери нагнітання форсунки при знехтуванні її об'ємом і динамічної голки запишеться як:

$$f_{\text{тр}} W_i = f_{\text{тр}} C_{i-1/2\tau} \cdot e^{-\beta l_{\text{тр}}} + \sigma \mu_c f_c \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{\phi i+1} - p_{\text{ц}})}, \quad (3.19)$$

де $C_{i-1/2\tau} = (p_{i-1/2\tau} - p_0) / a\rho$ – пряма хвиля швидкості у форсунки, яка прийшла від насоса до форсунки із запізненням за часом $1/2\tau = l_{\text{мп}}/a$.

Різничний запис рівняння (3.19) має вигляд:

$$p_{\phi(i+1)} = 2(p_{\text{н}(i+1-1/2\tau)} - p_0) \cdot e^{-\beta l_{\text{тр}}} - \sigma \cdot \frac{a\rho}{f_{\text{тр}}} \mu_c f_c \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{\phi(i+1)} - p_{\text{ц}})} + p_0, \quad (3.20)$$

де σ – одинична функція:

$$\sigma_0 = \begin{cases} 0 & [2(p_{\text{н}(i-1/2\tau)} - p_0) e^{-\beta l_{\text{тр}}} + p_0] \leq p_{\phi}; \\ 1 & [2(p_{\text{н}(i-1/2\tau)} - p_0) e^{-\beta l_{\text{тр}}} + p_0] \leq p_{\phi}; \end{cases}$$

$p_{\text{н}(i-1/2\tau)}$ – тиск у насоса з урахуванням різниці фаз;

p_{ϕ} – тиск підйому (затягування) голки форсунки;

$\mu_c f_c$ – ефективний переріз соплових отворів розпилювача;

$p_{\text{ц}}$ – тиск у циліндрі при впорскуванні палива.

Квадратне рівняння (3.20) може бути розв'язання ітераційним методом щодо $p_{\phi(i+1)}$. Як ітераційний метод обраний метод послідовних наближень. Задаючись величиною $p_{\phi(i+1)}$, розраховується права частина. Якщо результат перевищує задану величину допустимішого, то приймається нове значення $p_{\phi(i+1)}$. Розрахунок повторюється до отримання значення із заданою точністю. При наших розрахунках точність визначалася допустимою розбіжністю заданого та розрахункового значення тиску у форсунки – не більше 2 бар. Після розрахунку тиску у форсунки може бути знайдено величину швидкості відбитої хвилі від форсунки за допомогою залежності:

$$W_{i+1} = \frac{(p_{\text{ц}i-1/2\tau} - p_0) \cdot e^{-\beta t_{\text{тр}}}}{a\rho} - \frac{\mu_{\text{с}} f_{\text{с}}}{f_{\text{тр}}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{\phi i} - p_{\text{ц}})}. \quad (3.21)$$

Елементарний обсяг упорснутого палива на розрахунковому інтервалі визначається залежністю:

$$\Delta q_{i-1} = \mu_{\text{с}} f_{\text{с}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{\phi(i+1)} - p_{\text{ц}})} \Delta \tau. \quad (3.22)$$

Масова циклова подача в циліндр двигуна з урахуванням густини палива дорівнює сумі елементарних подач:

$$g_{\text{ц}} = q_{\text{н}} \rho = \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} \Delta q_{1i} \rho \quad (3.23)$$

Розроблена модель дозволяє враховувати погіршення технічного стану паливної апаратури. Розробка соплових отворів розпилювача враховується без будь-яких труднощів простим збільшенням чисельної величини ефективного прохідного перерізу розпилювача $\mu_{\text{ц}} f_{\text{с}}$. Будь-які інші зміни технічного стану системи проявляються у зміні протікання палива через прецизійні елементи паливного насоса та форсунки. Ці зміни досить просто враховуються в розрахунку. У паливного насоса високого тиску – шляхом

додавання до площі поперечного перерізу форсункового трубопроводу $f_{\text{тр}}$ площі щілини $\Delta f_{\text{тр}}$, визначальною ті ж протікання палива, що і в реальній системі при погіршенні її технічного стану. Аналогічно погіршення стану форсунки може бути враховано шляхом додавання до площі ефективного прохідного перерізу розпилювача $\mu_c f_c$ Площі $\Delta \mu_c f_c$, еквівалентної щілини, що визначає протікання палива у форсунки.

Розрахункова формула (3.16) тиску в насоса з урахуванням цих втрат набуде вигляду:

$$p_{\text{ні+1}} = \frac{\frac{\alpha_{\text{ст}} V_{\text{ні+1}}}{\Delta \tau} p_{\text{пл}} + f_{\text{пл}} C_{\text{плі}}^{\text{сп}} \sigma_0 + \frac{f_{\text{тр}} + \Delta f_{\text{мп}}}{2a\rho} \cdot (2p_0 - p_{\text{ні}}) \sigma_1 - f_{\text{мп}} W_{i-1/2\tau} e^{-\beta_{\text{тр}}} \sigma_2}{\frac{\alpha_{\text{ст}} V_{\text{ні+1}}}{\Delta \tau} + \frac{f_{\text{тр}}}{2a\rho} \sigma_1}. \quad (3.24)$$

Тут $\Delta f_{\text{тр}}$ – розрахункова площа щілини в насоса; інші позначення аналогічні залежності (3.16).

Аналогічно тиск у форсунки розраховується методом послідовних наближень за формулою (3.20) з урахуванням додаткової площі щілини у форсунки $\Delta \mu_c f_c$, через яку мають місце протікання:

$$p_{\phi(i+1)} = 2(p_{\text{н}(i+1-1/2\tau)} - p_0) \cdot e^{-\beta_{\text{тр}}} - \sigma \frac{a\rho}{f_{\text{тр}}} (\mu_c f_c + \Delta \mu_c f_c) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{\phi(i+1)} - p_{\text{ц}})} + p_0. \quad (3.25)$$

Реалізована таким чином неявна схема рахунку дозволяє коректно врахувати протікання за допомогою умовного параметра – еквівалентної площі прохідного перерізу щілини $\Delta f_{\text{тр}}$ та $\Delta \mu_c f_c$. У подальшому порядок розрахунку аж до оцінки чисельної величини циклової подачі аналогічний порядку, викладеному вище.

3.5. Висновки за розділом 3

Як результат досліджень, виконаних у розділі 3, визначимо таке.

1. Процес паливоподачі є невід'ємною складовою функціонального перетворення теплотворної здатності палива на корисну роботу суднового дизеля. При цьому саме від технічного стану та функціональних характеристик паливної системи високого тиску (яка безпосередньо забезпечує впорскування палива до циліндрів дизеля) залежать індикаторні показники роботи дизеля – середній індикаторний тиск та індикаторна потужність.

2. Якісне функціонування паливної апаратури високого тиску досягається шляхом підтримання її технічного стану, який погіршується з часом у процесі експлуатації. У цьому випадку з метою забезпечення необхідного навантаження циліндра необхідно збільшувати індекс паливного насоса, тобто погіршення технічного стану компенсується збільшенням активного ходу плунжера (для систем з паливними насосами високого тиску) або тиску в магістралі нагнітання (для систем з електронною системою регулювання, що обладнана загальною системою подачі палива). Що гірший технічний стан елементів паливної апаратури високого тиску, то більший активний хід плунжера для забезпечення того ж середнього індикаторного тиску в циліндрі. Таким чином, сімейство взаємозв'язків, що являють собою залежності середнього індикаторного тиску від активного ходу плунжера (тиску в магістралі нагнітання) може бути використана для діагностики поточного технічного стану паливної апаратури високого тиску.

3. Система паливоподачі суднових дизелів може бути представлена як послідовний комплекс, що включає наступні складові: індекс паливного насосу – технічний стан паливного насосу високого тиску / загальної магістралі нагнітання палива – форсунковий трубопровід – форсунка – циліндр дизеля – середній індикаторний тиск.

4. З метою аналітичного розв'язання завдання побудови діагностичних характеристик паливної апаратури двигуна необхідно:

- розрахувати циклову подачу палива одним із методів теоретичного розрахунку на всіх режимах експлуатації двигуна за умови різного технічного стану системи впорскування палива;

- оцінити розрахунком, яке значення середнього індикаторного тиску в циліндрі може бути отримано на кожному розрахунковому режимі.

5. Технічний стан паливної апаратури високого тиску та її спроможність до забезпечення функціональних показників доцільно оцінювати за значенням втрат палива, що виникають в прецизійних парах, а також за кількістю палива, що потрапляє у відсічну магістраль системи паливоподачі.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАЛИВ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

4.1. Аналіз експлуатаційних характеристик суднових палив, які використовуються в суднових дизелях

Експлуатаційні характеристики суднових палив, що використовуються в суднових дизелях, можуть значно варіюватися залежно від типу палива, його якості, обробки та властивостей.

Дизельне паливо, також відоме як дизель (DMA, DMB, DMC), є одним з основних видів палива, яке використовується в суднових двигунах. Воно може використовуватися як для роботи головних двигунів, так і для допоміжних двигунів, а також у маневрах та в районах спеціального контролю SECA.

Однією з головних переваг дизельного палива є його висока енергетична питома вартість, що дозволяє забезпечити ефективну роботу двигуна та максимальний вихід енергії при спалюванні. Крім того, дизельне паливо широко доступне і використовується великою кількістю суден у всьому світі.

Важливою особливістю дизельного палива є його відповідність стандартам якості та екологічним нормативам, що дозволяє забезпечити безпеку та ефективність його використання на судах. Крім того, воно має низький рівень викидів та відповідає вимогам SECA, які стосуються обмеження викидів шкідливих речовин у певних районах.

Зрештою, дизельне паливо є важливим джерелом енергії для суднових двигунів, яке поєднує в собі високу енергетичну питому вартість, доступність та відповідність нормативам якості та екології [129, 130].

Важке паливо (Heavy Fuel Oil – HFO) є одним з основних видів палива, яке використовується у морських суднових дизелях. Це паливо зазвичай

використовується великими суднами, такими як вантажні судна та танкери - як головне джерело енергії для їхніх двигунів.

Особливість важкого палива полягає у його високій в'язкості та меншій ціні, що робить його більш поширеним порівняно з іншими видами палива, такими як дизельне паливо. Ця висока в'язкість вимагає спеціальної обробки та підготовки перед використанням у судових дизелях.

Перед використанням у двигунах важке паливо може потребувати певної обробки, такої як підігрівання для зниження в'язкості та полегшення подачі в систему впорскування. Також можуть застосовуватися різні методи очищення від домішок та забруднень, щоб запобігти утворенню відкладень у двигуні та забезпечити його нормальну роботу.

Хоча важке паливо може мати свої особливості та вимагати додаткових заходів безпеки, підготовки та обробки, воно є важливим джерелом енергії для дизелів морських суден і забезпечує їхню довготривалу та надійну роботу в умовах зміни зовнішніх (перш за все гідрометеорологічних) та внутрішніх (насамперед навантажувальних) збурень.

Більш легким за питомою масою та меншим за в'язкістю є дизельне паливо с низьким вмістом сірки (Low Sulphur Marine Gas Oil – LSMGO, Low Sulphur Marine Diesel Oil LSMDO). Ці сорти палива використовуються в судових дизелях для відповідності вимогам щодо вмісту сірки під час знаходження суден у районах спеціального контролю SECA.[124]

Важливою характеристикою будь-якого виду палива, включаючи важке та дизельне паливо, є його якість. Якість палива визначається різноманітними параметрами, такими як: вміст сірки, в'язкість, густина, температура застигання, термін придатності та інші.

Низька якість палива може мати серйозний вплив на експлуатацію судових двигунів. Наприклад, високий вміст сірки у паливі може призводити до викидів шкідливих речовин, що порушує екологічні стандарти та може призвести до проблем з екологічним регулюванням.

Крім того, в'язкість палива може впливати на його подачу у систему впорскування та спалювання у камері згоряння. Надмірна в'язкість може призвести до утворення відкладень у системі паливоподачі та забруднення форсунок, що може призвести до зниження продуктивності двигуна та збільшення його споживання палива.

Також важливою характеристикою є термін придатності палива. Після певного періоду зберігання паливо може піддатися відкладенням та окисленню, що може погіршити його якість та ефективність під час використання.

Усі ці фактори підкреслюють важливість обережного вибору та обробки палива для суднових двигунів, а також регулярного контролю його якості та відповідності вимогам стандартів якості та екології.

Системи підготовки та обробки палива є важливою складовою сучасних суднових дизельних двигунів. Вони відповідають за забезпечення якості та чистоти палива, що подається у систему впорскування, а також за дотримання екологічних стандартів викидів.

Деякі сучасні суднові енергетичні установки оснащені системами очищення палива від забруднень та видалення сірки. Це може включати в себе процеси сепарації, фільтрування, відстоювання та хімічної обробки, які допомагають знизити вміст шкідливих речовин у паливі.

Очищення палива від сірки має особливе значення, оскільки високий вміст сірки в паливі може призводити до значних викидів оксидів сірки, які є шкідливими для довкілля. Системи очищення палива дозволяють знизити ці викиди, зберігаючи при цьому ефективність та продуктивність роботи двигуна.

Крім того, системи підготовки та обробки палива можуть також включати в себе різні методи контролю якості палива, такі як моніторинг вмісту сірки та інших домішок, температури та тиску палива, що дозволяє оперативно виявляти та усувати будь-які проблеми з якістю палива.

Таким чином, системи підготовки та обробки палива є важливим елементом сучасних суднових дизельних двигунів, які дозволяють забезпечити відповідність екологічним стандартам та зберегти ефективність роботи двигуна під час його експлуатації у всьому діапазоні можливих навантажень.

Ще одним із завдань, що стоїть перед енергетичними комплексами морських та річкових суден, є мінімізація негативного впливу на довкілля. Використання суднових палив може мати значний екологічний слід через викиди шкідливих речовин, таких як оксиди сірки SO_x та азоту NO_x , а також парникові гази, які сприяють змінам клімату.

У зв'язку з цим суднові дизелі все більше використовують спеціальні системи очищення випускних газів, такі як системи видалення сполук сірки з випускних газів (SO_x scrubbers), каталітичні конвертери для зниження викидів азотних оксидів (NO_x reactor), а також фільтри частинок для зменшення викидів твердих часток. Суднові оператори все частіше переходять на використання менш шкідливих до довкілля палив, використовуючи при цьому вищий клас дизельного палива з меншим вмістом сірки, або навіть альтернативні види палива, такі як скраплені гази або відновлювані джерела енергії [125].

Ці заходи спрямовані на зменшення негативного впливу з боку суден морського та внутрішнього водного транспорту на довкілля і покращення сталості та екологічної прийнятності морського транспорту. Загалом експлуатаційні характеристики суднових палив мають велике значення для ефективності та надійності суднових дизелів, а також для їхнього впливу на довкілля. Для забезпечення оптимальної експлуатації важливо обирати відповідне паливо та забезпечувати його відповідну обробку та управління.

4.2. Регенерація змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки

Під час досліджень впливу палива з низьким вмістом сірки на паливну апаратуру виникло додаткове завдання – відновлення змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки. Це завдання виникло з урахуванням того, що палива з низьким вмістом сірки, хоча й мають переваги з екологічної точки зору, але можуть погіршувати мащення та збільшувати тертя в елементах паливної системи, що може призвести до збільшення зношування та скорочення терміну служби обладнання.

Такий підхід дозволяє забезпечити не лише зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, а й зберегти ефективність та тривалість безвідмовної роботи паливної апаратури. Дослідження спрямовані на розробку технологій та методів, що дозволять забезпечити оптимальне мащення та збереження стійкості до тертя та зношування в умовах використання палива з низьким вмістом сірки.

Проводячи аналіз досліджень у першій главі, було виявлено що для підвищення змащувальних властивостей палива та мастила запропоновані різні технології. Умовно вони поділяються на дві групи: перші впливають на стан та характеристики металевої поверхні, другі – безпосередньо на показники рідини, що поділяє ці поверхні. До першої відносяться нанесення регулярного мікрорельєфу, плазмове нанесення на металеві поверхні додаткового шару зі спеціальних хімічних елементів та з'єднань, використання фторорганічних покриттів. Найбільш поширені технології другої групи – додавання присадок, змащувальних та охолоджуючих рідин та поверхнево-активних речовин. Обидві технології спрямовані на підвищення внутрішньої самоорганізації молекул змащувального шару палива або мастила. Це сприяє підвищенню товщини змащувального шару, збільшенню його пружності та несучої здатності. На жаль, з плином часу всі вказані

технології поступово втрачають ефективність, тому експлуатаційні характеристики палива або мастила вимагають поновлення або регенерації.

Таким чином, було поставлено наступне завдання дослідження: вивчення можливості регенерації змащувальних властивостей палива та мастила, що використовуються під час експлуатації суднових дизелів.

Суднові моторні палива і мастила (у зв'язку зі своїм елементарним складом) є вуглеводними рідинами (ВВР). Вуглець і водень (вміст яких у паливі та мастилі досягає 80...85 % і 10...15 % відповідно), адсорбуються на металевій поверхні, утворюють граничний змащувальний шар і забезпечують змащувальну здатність ВВР. Потрапляння частинок води та механічних домішок у паливо або мастило знижує їх змащувальну здатність і призводить до підвищеного зносу паливної апаратури та вкладишів підшипників колінчатого вала. Таку поведінку ВВР можна пояснити руйнуванням його граничних змащувальних шарів, що примикають до робочих поверхонь пари тертя. Активні частини молекул ВВР (які мають ланцюгову побудову [131, 132]), захоплюються частками механічних домішок і води, зумовлюючи часткову або повну деструкцію граничного шару (рис. 4.1).

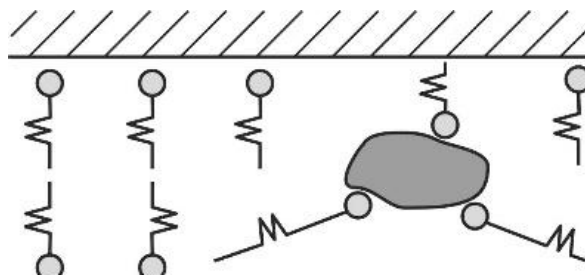


Рис. 4.1. Деструкція граничних шарів вуглеводних рідин під час потрапляння до них води або механічних домішок

Видалення подібних домішок у суднових паливних системах та системах мащення проводиться за допомогою сепараторів і фільтрів. При цьому такі методи забезпечують необхідну якість палива або мастила лише на певних ділянках, а перенасичення ними суднових систем призводить до підвищення витрат енергії. У зв'язку з цим ефективним є спосіб, що дозволяє

регенерувати змащувальні властивості палива або мастила в гідродинамічному активаторі. Гідродинамічний активатор (рис. 4.2) складається з групи сопел Лаваля 1, проходячи через які ВВР (паливо або мастило) збільшує свою кінетичну енергію. Одночасно з цим збільшується кінетична енергія частинок механічних домішок і води, що знаходяться у ВВР. На виході з камери потік ВВР ударяється об металеву циліндричну поверхню 2. Енергія удару частково йде на розрив слабких зв'язків між молекулами ВВР і домішками, а також на руйнування самих твердих частинок і частково розсіюється в активаторі [133, 134].

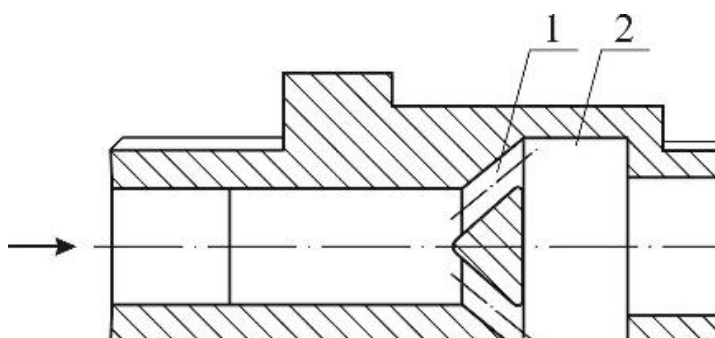


Рис. 4.2. Спрощена схема гідродинамічного активатора вуглеводних рідин:
1 – група сопел Лаваля; 2 – циліндрична поверхня

Таким чином, встановивши енергію удару вище енергії зв'язку, можливо звільнити молекули палива або мастила від сторонніх адгезійних зв'язків. Це сприятиме регенерації структурованих граничних шарів ВВР на поверхні пари тертя плунжер-втулка ПНВТ або вкладиш підшипника. З метою зниження енергетичних витрат на роботу гідродинамічного активатора та підвищення його ефективності процес удару потоку ВВР об внутрішню металеву поверхню здійснюється під кутом, що дорівнює 45° . Вибір цього значення визначається теорією пружності. Під час удару твердої частинки або глобули води, що знаходиться у ВВР, об робочу поверхню активатора, дана частка відчуває складний тривісний або об'ємний напружений стан. На рис. 4.3 зображено елемент частинки, яка знаходиться в об'ємному напруженому стані та грані якої є головними майданчиками [135, 136].

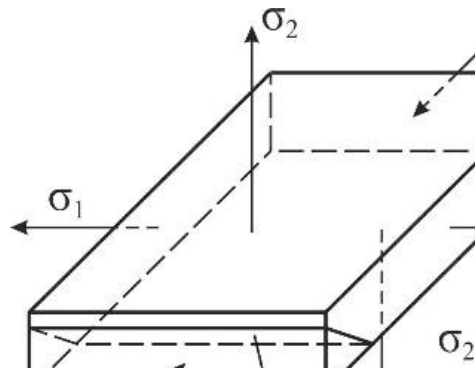


Рис. 4.3. Елементарний об'єм твердої частки домішки, що знаходиться в потоці вуглеводної рідини

Розглянемо майданчики, паралельні одній з головних напруг, наприклад, довільний майданчик I , паралельний головній нарузі σ_1 . Напружений стан на таких майданчиках може бути визначений аналітично:

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \alpha_3,$$

$$\tau_\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2^2 \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3^2 \cos^2 \alpha_3},$$

де σ_α , τ_α – відповідно нормальна та дотична напруга на майданчиках;

α_1 , α_2 , α_3 – кути, які утворює нормаль до аналізованого майданчика з напругою σ_1 , σ_2 , σ_3 відповідно.

Легко встановити, на яких майданчиках діятиме найбільше дотичне напруження при тривісному напруженому стані, і знайти його величину. За будь-якого об'ємного напруженого стану найбільші дотичні напруги будуть:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

Вони діють на майданчику, паралельному головній нарузі та нахиленому під кутом 45° до головної напруги σ_1 та σ_3 . Далі, якщо розв'язувати завдання удару частки та визначити величину перепаду тисків у гідродинамічному активаторі, при якій станеться руйнування, то вийде вираз

$$\Delta P = \frac{v_{\min}^2 \gamma}{2\varphi^2 g},$$

де P – перепад тисків рідини на гідродинамічному активаторі;

v_{\min} – мінімальна швидкість струменя, за якою в результаті удару відбудеться руйнування твердої частинки в паливі;

γ – питома маса палива;

$\varphi=0,92\dots0,94$ – коефіцієнт швидкості, що залежить від властивості сопла [131, 132].

Мінімальна швидкість частинки, що знаходиться в струмені, за якою під час удару відбудеться її руйнування, може бути визначена згідно з рівнянням Герца для контактної взаємодії тіл при пружно-гідродинамічному навантаженні

$$v_{\min} = \left(\frac{2,22 \cdot 10^3 \sigma_g^3 \left((1 - \mu_1^2) E_1 + (1 - \mu_2^2) E_2 \right)}{D E_1 E_2} \right)^{1,2},$$

де μ_1, μ_2 – коефіцієнти Пуансона відповідно до матеріалу частки домішки та деталі;

E_1, E_2 – модулі пружності відповідно матеріалу частки домішки та деталі;

D – діаметр частки домішки;

σ_g – допустима напруження в матеріалі частки домішки [133, 134].

Руйнування частки домішки обумовлено дотичною напруженням. Розмір дотичної напруження залежить від кута удару частки. Найбільше дотичне напруження в частці, як видно з рівнянь 1-3, виникає за умовою удару під кутом 45° .

Дослідження виконувались у науковій лабораторії та на морському судні класу General Cargo дедвейтом 19700 тонн. Дослідження проводилися для різних сортів суднового палива: малов'язкого DMA, середньов'язкого RMB30, важкого RMG380; та мастил Castrol TLX XTRA204, Castrol

Cyltex40SX. Палива DMA та RMG380, а також циркуляційне мастило Castrol TLX XTRA204 використовувалися в судовому дизелі 6S50MC-C MAN-Diesel. Палива DMA та RMB30, а також циркуляційне мастило Castrol Cyltex40SX використовувалися в судовому дизелі 5L23/30 MAN-Diesel.

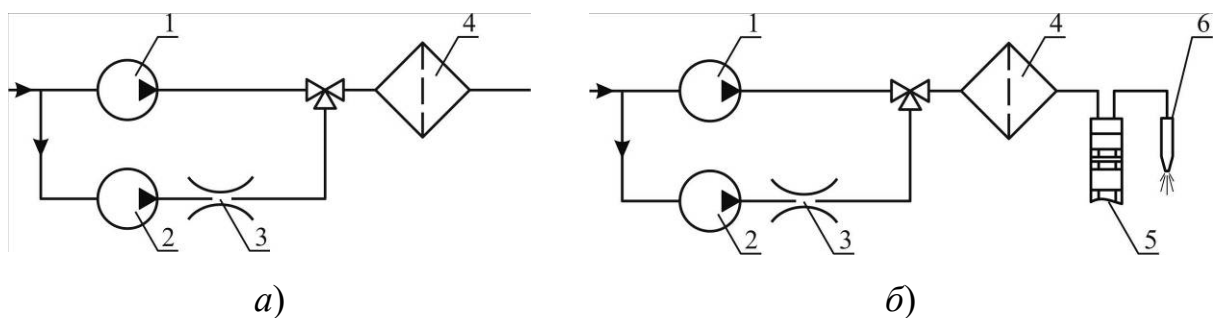
У науковій лабораторії визначалися:

за допомогою машини тертя – значення сили тертя в сполученні, що імітує пари тертя вал-вкладиш та плунжер-втулка ПНВТ [138, 139];

за допомогою ротаційного віскозиметра – значення в'язкості в граничному шарі ВВР [140, 141];

за допомогою оптичної установки, що реалізує принцип подвійного променезаломлення, – значення товщини граничного шару [141].

На морському судні визначався технічний стан пар тертя вал-вкладиш, плунжер-втулка ПНВТ, голка-розпилювач форсунки, а також вміст механічних домішок у моторному мастилі для двох умов експлуатації паливної системи та системи мащення: без використання та з використанням гідродинамічного активатора [142]. Схема підключення гідродинамічного активатора до паливної системи та системи мащення відповідала фрагментам, показаним на рис. 4.4. Результати досліджень наведено у таблиці 4.1.



1 – основний насос, що підкачує паливо; 2 – резервний насос, що підкачує паливо; 3 – гідродинамічний активатор палива; 4 – сепаратор палива;

5 – ПНВТ; 6 – форсунка

5 – ПНВТ; 6 – форсунка

Таблиця 4.1

Результати досліджень

Марка моторного палива / моторного мастила	Товщина граничного шару, d_s , мкм		В'язкість граничного шару, ν , мм ² /с		Сила тертя в сполученні вал-вкладиш (для моторних мастил) або плунжер-втулка (для моторних палив), $F_{тр}$, Н	
	1	2	1	2	1	2
DMA	9,2	9,7	6,1	6,4	1,18	0,88
RMB30	7,8	8,2	30,3	31,8	1,34	1,12
RMG380	7,3	7,7	382	394	1,71	1,42
Castrol TLX XTRA204	10,4	11,2	127	139	0,72	0,62
Castrol Cyltex40SX	11,8	12,7	142	156	0,56	0,46

Примітка: 1 – без обробки в гідродинамічному активаторі; 2 – з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі.

Для кращої візуалізації результатів, наведених у таблиці 4.1, побудовані номограми – рис. 4.5, 4.6.

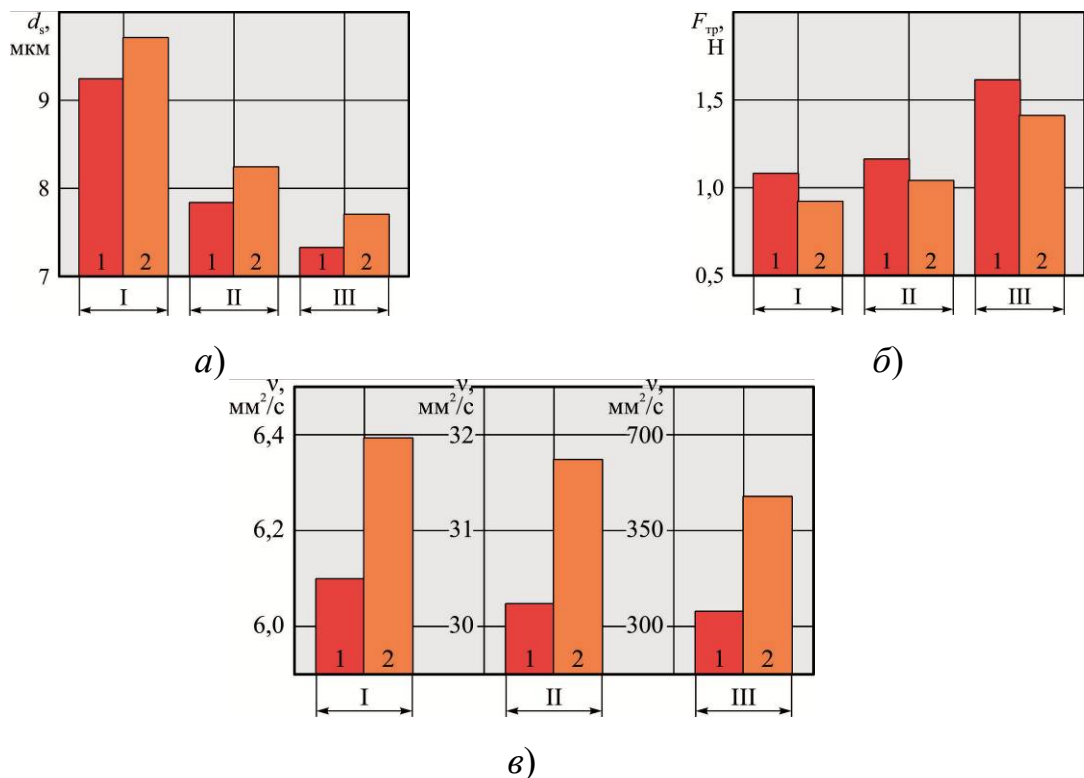


Рис. 4.5. Зміна товщини граничного шару (а), в'язкості граничного шару (б), сила тертя в сполученні плунжер-втулка ПНВТ (в):

1 – без обробки в гідродинамічному активаторі; 2 – з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі; I – DMA; II – RMB30; III – RMG380

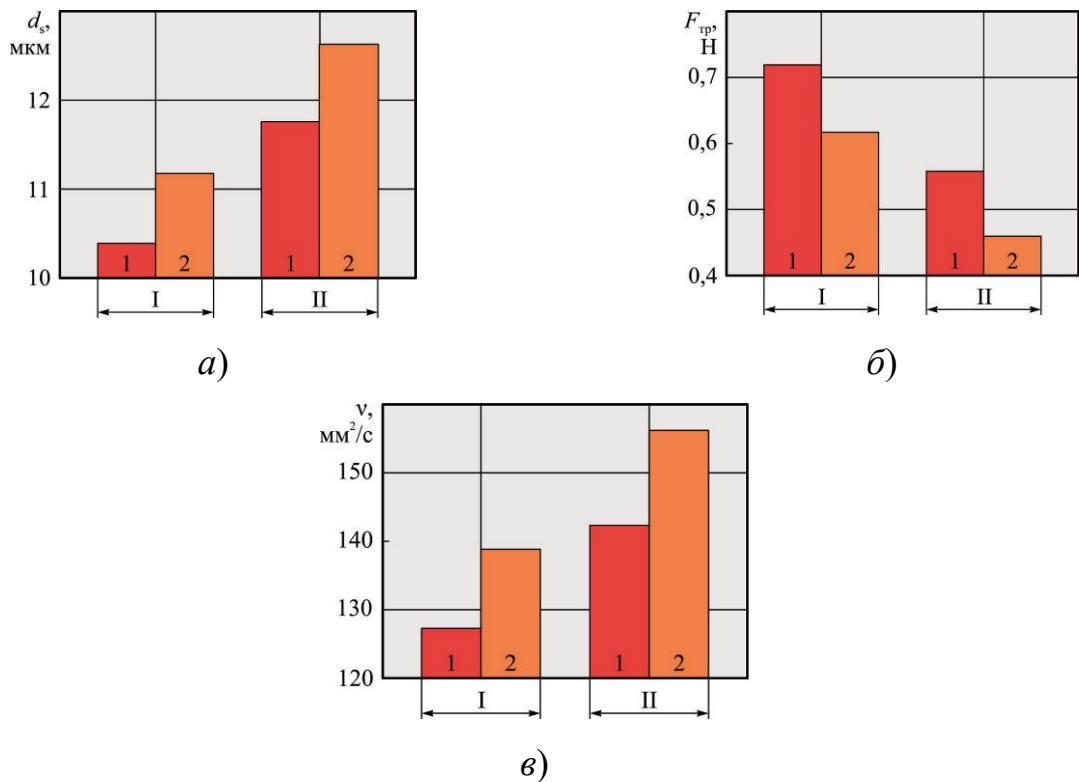


Рис. 4.6. Зміна товщини граничного шару (а), в'язкості граничного шару (б), сила тертя в сполученні вал-вкладиш (в):

1 – без обробки в гідродинамічному активаторі; 2 – з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі;

I – Castrol TLX XTRA204; II – Castrol Cyltex40SX

На рис. 4.7 показані гістограми сил тертя $F_{тр}$ у сполученні вал-вкладиш, отримані в результаті лабораторних досліджень для моторного мастила Castrol Cyltex40SX (яке використовувалося в циркуляційній системі суднових дизелів 5L23/30 MAN-Diesel без та з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі). Наведені результати свідчать про те, що додаткова обробка ВВР у гідродинамічному активаторі сприяє зниженню сили тертя у зазначеному сполученні, зменшенню деструкуючої дії води та механічних домішок після гідродинамічної активації, підвищенню регенеративних характеристик ВВР [144]

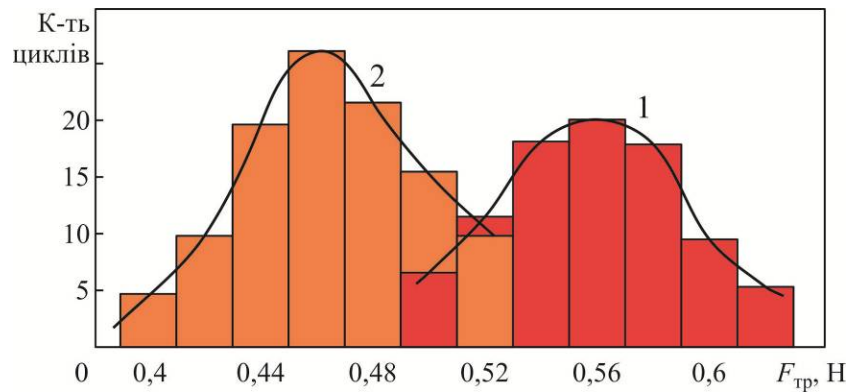


Рис. 4.7. Гістограма сил тертя в парі вал-вкладиш під час використання суднового моторного мастила Castrol Cyltex40SX:

1 – без обробки в гідродинамічному активаторі; 2 – з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі

Для визначення динаміки зміни товщини граничного шару моторного мастила його величина визначалася в інтервалі 0, 50, 100, 150 годин експлуатації мастила Castrol Cyltex40SX у циркуляційній системі дизелів 5L23/30 MAN-Diesel (у циркуляційній системі одного з дизелів відповідно до схеми, що надана на рис. 4.4, *a* виконувалася додаткова обробка моторного мастила за допомогою гідродинамічного активатора). Протягом цього періоду поповнення мастила в циркуляційній системі не проводилося, тому регенерація його експлуатаційних характеристик була можлива тільки за рахунок використання в системі гідродинамічного активатора. Результати досліджень наведено на рис. 4.8.

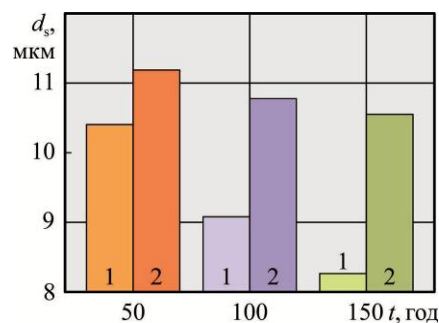


Рис. 4.8. Зміна товщини граничного шару моторного мастила Castrol Cyltex40SX:

1 – без обробки в гідродинамічному активаторі; 2 – з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі

З метою вивчення впливу гідродинамічної активації на процес мащення судових дизелів виконувався спектральний аналіз моторного мастила Castrol Cyltex40SX, яке використовувалось у системі циркуляційного мащення судових дизелів 5L23/30 MAN-Diesel. Моторне мастило одного з дизелів піддавалось гідродинамічній обробці відповідно до схеми, що наведена на рис. 4.4, а. Результати спектрографічного аналізу, за допомогою якого визнався вміст металевих домішок у мастилі, наведені в таблиці 4.2.

За результатами таблиці 4.2 побудовані діаграми, що надані на рис. 4.9.

Таблиця 4.2

Результати спектрографічного аналізу моторного мастила Castrol Cyltex40SX

Компонент, мг/кг	50 годин		100 годин		150 годин	
	1	2	1	2	1	2
Al	2	1	4	2,5	6	3
Cr	1	1	1	1	1,5	1,5
Cu	1	1	1,5	1,5	2	2
Fe	4	3	7	4,5	9	5
Sn	0,5	0,5	1	1	1,5	1
Pb	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5
Загальна кількість, Σ_M	9	7	15	11	21	13

Примітка: 1 – без обробки в гідродинамічному активаторі; 2 – з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі

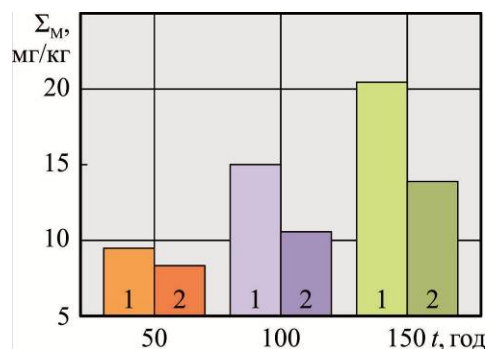


Рис. 4.9. Кількість механічних домішок Σ_M , мг/кг, що входять до моторного мастила Castrol Cyltex40SX:

1 – без обробки в гідродинамічному активаторі; 2 – з додатковою обробкою в гідродинамічному активаторі

Шляхом візуального обстеження було встановлено, що під час використання палива, що пройшло обробку в гідродинамічному активаторі, зменшився знос у сполученнях плунжер-втулка ПНВТ і голка-розпилювач форсунки. Загальне збільшення ресурсу роботи елементів паливної апаратури високого тиску було оцінено такими значеннями: ПНВТ 20...22 %, розпилювач форсунки 10...12 %. Також виявлено, що гідродинамічна активація моторного мастила зменшує утворення нагару на поверхні вкладишів підшипників [145]

Отже, можна зробити висновок, що впровадження палива з низьким вмістом сірки в суднових моторних системах має значний потенціал для зменшення викидів шкідливих речовин у довкілля. Проте, щоб забезпечити ефективну роботу паливної апаратури та підтримувати її надійність та тривалість служби, важливо розробляти та впроваджувати технології, спрямовані на відновлення змащувальних властивостей палива з низьким вмістом сірки. Це дозволить зберегти ефективність та тривалість безвідмовної роботи паливної апаратури, знизити витрати на обслуговування та забезпечити екологічну безпеку морського транспорту.

Вуглеводневі рідини (паливо та мастило), що використовуються в суднових енергетичних установках, мають анізотропні властивості, які найбільш виражено виявляються у вузьких зазорах поблизу металевих поверхонь.

Вода та механічні домішки, що потрапляють до складу як палива, також і мастила, зумовлюють деструкцію молекул в їх граничних шарах, що погіршує змащувальні властивості вуглеводневих рідин та призводить до зниження рівня надійності суднових енергетичних установок (зокрема суднових двигунів внутрішнього згоряння та обслуговуючих їх систем).

Одним з методів регенерації змащувальних властивостей суднових палив та мастил є використання гідродинамічних активаторів, що здійснюють силове навантаження на механічні домішки та воду, зменшуючи

їх адгезійні зв'язки з вуглецем та воднем та поновлюючи ланцюгову побудову граничного змащувального шару палива або мастила [146].

Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил сприяє зменшенню втрат енергії на продування сил тертя та підвищенню в'язкості змащувального шару палива або мастила, що виявляється в зниженні зносу в трибосполученнях вал-вкладиш підшипника та плунжер-втулка паливного насосу високого тиску.

4.3. Підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску, що забезпечує впорскування палива з низьким вмістом сірки

Одним з додаткових завдань дослідження було визначення впливу палива з низьким вмістом сірки на характеристики контактних вузлів паливної апаратури високого тиску, а саме на претензійну пару плунжер-втулка.

Багато разів було зазначено, що під час оцінки характеристик палива зазвичай враховують його в'язкість, температуру спалаху, самозаймання, вміст сірки та теплову енергію. Однак рідко, коли приділяється увага такій важливій характеристиці, як здатність до мащення. Ця властивість забезпечує ефективну та надійну роботу паливної апаратури ДВЗ, яка, своєю чергою, є критично важливим елементом будь-якого двигуна. Поняття «здатність до мащення» палива може не мати значення для «об'ємних зон» паливної системи, таких як трубопроводи перекачування, фільтри, сепаратори тощо, - за винятком гвинтових і шестеренних паливних насосів, де паливо, рухаючись, забезпечує дію з мащення на кромки гвинтів або шестерень. Однак для елементів паливної апаратури високого тиску, де зазор між

контактуючими поверхнями становить декілька мікрометрів, поняття «здатність до мащення палива» стає дуже важливим.

У деяких дослідженнях, що були розглянуті в першій главі, та теоретичних розрахунках, що були представлені вище, присвячених вивченню поведінки ВВР (палива та мастил) у близькості до металевих поверхонь, було виявлено особливу рідкокристалічну структуру, за якою молекули рідини набувають орієнтаційну впорядкованість та мають квазікристалічні властивості. Для ДВЗ, де ці властивості можуть проявлятися найбільш чітко, особливо важливими є пари тертя, такі як вал – вкладиш підшипника, поршневе кільце – втулка циліндра, а також плунжер золотника – втулка паливного насоса високого тиску. У питанні забезпечення здатності палива до мащення велику роль відіграють розклинювальні сили, що виникають в умовах граничного мащення, що є типовим для пари плунжер – втулка ПНВТ.

Основними вузлами тертя паливної системи суднового дизеля, які працюють в режимі граничного мащення / граничного тертя є прецизійні пари ПНВТ та розпилювачів форсунок. Процеси тертя та зношування, що відбуваються в насосних елементах паливної апаратури (ПА), впливають на тривалість безвідмовної роботи всієї паливної системи та експлуатаційних характеристик ДВЗ. Тому визначення зміни навантажень на елементи ПА високого тиску необхідно виконувати за умови структурних характеристик палива, яке одночасно виконує функції мащення прецизійних пар [147].

Основний матеріал досліджень зазвичай включає в себе аналіз процесів тертя та зношування, що відбуваються у вузлах тертя паливної системи суднового дизеля. Дослідники звертають увагу на різноманітні аспекти цих процесів.

Процеси тертя в ПА відбуваються у складних умовах, пов'язаних з тим, що:

- насосні елементи паливної апаратури високого тиску здійснюють зворотно-поступальний рух;

- швидкість ковзання плунжера у втулці ПНВТ постійно змінюється;
- мастильним середовищем є важкі палива з в'язкістю до 100 сСт, що знаходяться за температури 90...110°C;
- температура деталей паливної апаратури високого тиску змінюється в межах 50...200°C;
- нормальне навантаження у вузлах тертя у площині ковзання змінюється за синусоїдальним законом.

Одночасно з цим, експлуатацію ПА необхідно виконувати з урахуванням екологічних вимог до суднових дизелів та суднових енергетичних установок.

У ПНВТ і розпилювачах форсунок прецизійні деталі, які переміщуються одна щодо одної та паливо, яке знаходиться в зазорі між ними, утворюють триаду тертя метал – мастильний шар палива – метал. У процесі роботи деталі ПА зношуються, у міру чого зростає радіальний зазор між втулкою та плунжером, а також місцеві зазори, одночасно погіршується процес подачі палива та сумішоутворення, падає гідравлічна щільність триади тертя. Зміна геометричного профілю плунжерних пар ПНВТ призводить до підвищеного зносу цих елементів, зниження їх надійності та підвищення витрати палива. У зв'язку з цим були і залишаються актуальними теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності ПА суднових дизелів. Перспективними у цьому напрямі є методи та засоби, що дозволяють підвищити довговічність ПА за рахунок управління триботехнічними процесами, що відбуваються на її робочих поверхнях. Аналіз умов роботи типового вузла тертя паливної апаратури показує, що на нього діє сила P_t , яка обумовлена стисненням палива і не лежача на одній осі з рушійною силою P_d , що, своєю чергою, поряд з конструкційними особливостями призводить до порушення співвісності плунжера та виникнення неврівноважених радіальних сил P_r , які зумовлюють підвищене зношування плунжера [148].

Розглянемо вплив перепаду тиску палива та деяких конструкційних параметрів деталей ПНВТ на порушення їх співвісності, нехтуючи при цьому силами інерції, силою тяжкості плунжера та палива, а також шорсткістю поверхонь тертя. Припустимо також, що в кільцевому зазорі має місце ламінарний потік рідини. Припустимо, що плунжер правильної циліндричної форми розташований співвісно нерухомо в отворі втулки і перепад тиску рідини ΔP за довжиною сполучення залишається постійним і змінюється лінійно, тобто

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

де P_1 та P_2 – високий та низький тиск палива.

У разі правильної циліндричної форми деталей плунжер займе концентричне положення щодо отвору втулки, і в цьому випадку сумарні радіальні тиски P_{r_1} та P_{r_2} будуть однакові за величиною і рівні, тобто

$$P_{r_1} = P_{r_2} = \pi r l \frac{P_1 - P_2}{2},$$

де r – радіус плунжера.

Якщо спостерігається спотворення циліндричної форми плунжера і втулки, а макрогеометричні відхилення деталей паливної апаратури утворюються як у процесі виготовлення, так і в результаті нерівномірного зношування при експлуатації, тиск палива на плунжер буде нерівномірним і призведе до зміщення та перекосу в отворі втулки (рис. 4.10).

За умови розміщення в отворі втулки конусного плунжера (найбільша основа якого розташована з боку верхнього торця головки) переріз зазору та тиск рідини в зазорі по довжині сполучення будуть змінними рис. 4.10, *a*. Для елементарного зазору (щілини) довжиною dx , висотою по радіусу S і шириною по дузі кола $d\omega$ справедлива тотожність, що зв'язує градієнт тиску з градієнтом витрати палива, що протікає в одиницю часу через перетин, перпендикулярний потоку, тобто

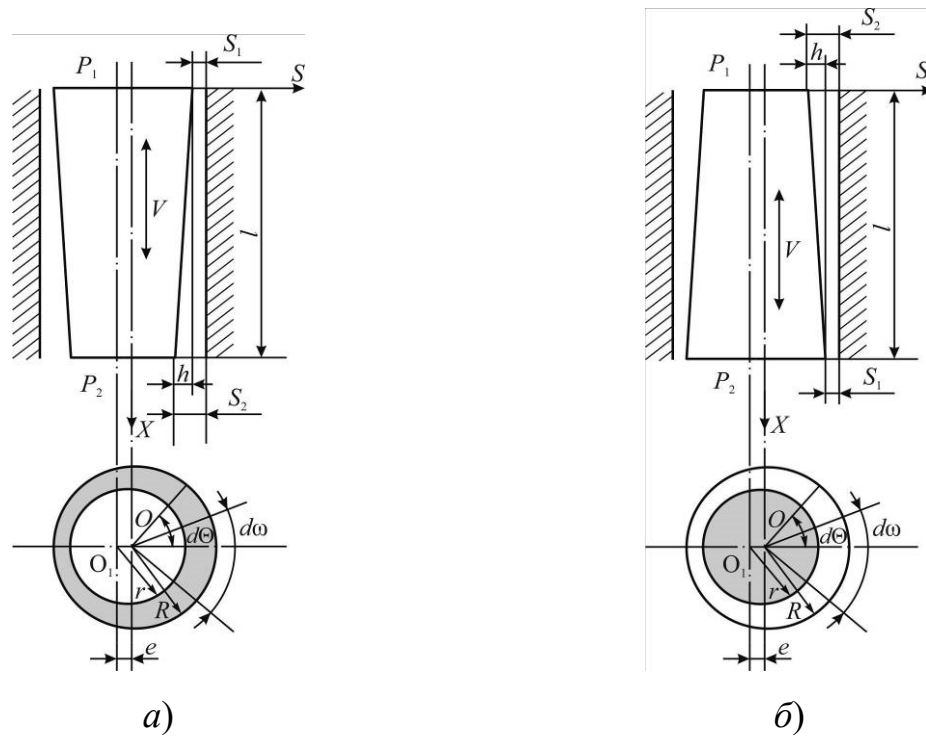


Рис. 4.10. Схема сполучення втулки та плунжера:

a – з найбільшою основою конуса, розташованим з боку верхнього торця головки, *б* – з найменшою основою конуса, розташованим з боку верхнього торця головки

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{12z}{S^2} \cdot \frac{dg}{d\omega},$$

де dg – об'єм рідини, що протікає через площу зазору з шириною дуги, що дорівнює $d\omega$;

S – радіальний зазор

$$S = R - r,$$

R – радіус втулки.

Елементарна радіальна сила, що діє на конусний плунжер, вісь якого зміщена щодо осі отвору втулки на величину ексцентриситету e і найбільша основа конуса розташована з боку верхнього торця головки, визначається за формулою (див. рис. 4.10, *a*)

$$dP_{r_1} = 2rl \left[P_1 - \frac{\Delta P(S_1 + h + e \cos \theta)}{2S_1 + h + 2e \cos \theta} \right] \cdot \cos \theta d\theta,$$

де e – ексцентриситет;

θ – кут;

$d\omega = r d\theta$.

Повна величина невірноваженої радіальної сили, що діє на конусний плунжер з найбільшою основою, розташованою з боку верхнього торця головки, визначається за рівнянням

$$dP_{r_2} = \frac{\pi r l \Delta P}{4e} \cdot \left[1 - \frac{2S_1 + h}{\sqrt{(2S_1 + h)^2 - 4e^2}} \right].$$

Невірноважені радіальні сили, що виникають, змушують конусний плунжер з найбільшою основою, розташованою з боку верхнього торця головки, зайняти рівноважне положення у зазорі. Однак, у результаті дії невірноважених радіальних сил плунжер зміщуватиметься в зазорі та перекошуватиметься щодо осі втулки. Зі збільшенням ексцентриситету та перекошу зростатиме опір переміщенню плунжера. Усунення плунжера відбуватиметься лише межах найменшого зазору, тобто зазору між отвором втулки та найбільшим розміром діаметра плунжера.

Елементарна невірноважена радіальна сила dP_r , що діє на конусний плунжер, вісь якого зміщена щодо осі отвору втулки на величину ексцентриситету e і найменша основа розташована з боку верхнього торця головки (рис. 4.10, б) і визначається за рівнянням

$$dP_{r_2} = 2rl \cdot \left[P_1 + \frac{\Delta P(S_2 - h + e \cos \theta)}{h} \right] \cdot \cos \theta d\theta.$$

Повна величина невірноваженої радіальної сили P , що діє на плунжер, найменша основа конуса якого розташована з боку верхнього торця головки, визначиться за формулою [149]

$$P_{r_2} = \frac{\pi r l e \Delta P}{h}.$$

Неврівноважена радіальна сила в цьому випадку також переміщатиме плунжер у рівноважне положення в зазорі, а внаслідок нерівномірного розподілу цих сил по довжині, сполучення відбуватиметься перекошування плунжера. Під час розташування плунжера з найменшою основою конуса з боку верхнього торця головки зсув і перекіс осі плунжера буде здійснюватися в межах найбільшого зазору по довжині сполучення. Оскільки дія неврівноваженої радіальної сили відбувається під час робочого ходу плунжера, є підстави припустити, що під впливом цієї сили плунжер буде переміщатися в радіальному напрямку протягом кожного подвійного ходу.

Зближенню поверхонь деталей пари тертя протидіє опір шару палива, що виникає при цьому. Ступінь зближення залежить від конфігурації поверхонь, що труться, деталей плунжерної пари, швидкості переміщення, в'язкості палива і величини зазору. Зі зменшенням довжини поверхні тертя гідродинамічний тиск знижується пропорційно квадрату довжини. На ділянках виїмок, западин, зовнішнього каналу палива, паливних отворів, у верхній і нижній мертвих точках руху плунжера гідродинамічний рух не виникає і плунжер на цих ділянках приходить у безпосередній контакт з втулкою під дією неврівноваженої радіальної сили, що виникає від перепаду тиску палива. У цьому випадку має місце тертя граничне мащення. Під час граничного мащення поверхні деталей, що сполучаються між собою, розділені шаром палива завтовшки 0,1...0,5 мкм. Наявність граничного шару або граничної плівки знижує силу тертя порівняно з тертям без мастила в 2...10 разів і зменшує зношування сполучених поверхонь в $10^2...10^4$ разів.

Міцність граничної плівки палива багато в чому залежить від природи палива та наявності у ньому активних молекул домішок. Палива, що використовуються в суднових дизелях, є механічною сумішшю різних вуглеводнів, які мають включення органічних кислот, смол, а також поверхнево-активних речовин. У зв'язку з цим палива, як і мастила,

утворюють на металевих поверхнях граничну фазу квазікристалічної структури товщиною до 3...5 мкм, що має міцний зв'язок з поверхнею і поздовжньою когезією.

Загальний аналіз досліджень, що охоплюють різні аспекти тертя та зношування в паливній системі суднових дизелів, дозволяє зробити наступні висновки: у ПНВТ і розпилювачах форсунок прецизійні деталі, що переміщуються відносно одна одній і паливо, що знаходиться в проміжку між ними, утворюють тріаду тертя метал – мастильний шар палива – метал. У процесі роботи деталі ПА зношуються, у міру чого зростає радіальний зазор між втулкою та плунжером, а також місцеві зазори, одночасно погіршується процес подачі палива та сумішоутворення, падає гідравлічна щільність тріади тертя.

Під час роботи ПНВТ на плунжер, що здійснює зворотно-поступальний рух, діють неврівноважені радіальні сили, які виникають у результаті перепаду тиску рідини, нерівномірності швидкості відносного переміщення поверхонь, що труться, і конструктивних особливостей деталей як плунжерної пари, так і сполучення кулачок розподільного валу – ролик товкача [150]. Під час активного ходу плунжера перепад тиску рідини найбільше впливає на виникнення неврівноважених радіальних сил і на його зміщення в отворі втулки. Під час холостого ходу плунжера перепад тиску рідини практично відсутній. Крім того, при відносному переміщенні між поверхнями, що труться, деталей тріади тертя виникає гідродинамічний тиск шару рідини. Гідродинамічний тиск, нерівномірно розподілений поверхнею тертя, також призводить до зміщення плунжера в отворі втулки і перерозподілу радіальних зазорів. При порушенні співвісності між плунжером і втулкою та за наявності відхилень від циліндричності деталей створюються умови для нерівномірного зношування. Активним засобом попередження цього явища є утворення в зоні тертя орієнтованої структури молекулярного шару палива, що виконує функції мащення та попереджує безпосередній контакт прецизійних пар.

4.4. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки

Експлуатація суднових двигунів внутрішнього згорання на судах морського та внутрішнього водного транспорту повинна відбуватися не лише з урахуванням необхідної потужності та виконанням вимог інструкцій з експлуатації, але й з урахуванням забезпечення екологічних показників їх роботи.

Основними екологічними показниками роботи суднових дизелів є концентрація оксидів сірки SO_x та оксидів азоту NO_x у випускних газах. Значення обох цих показників регламентуються вимогами Додатка VI Міжнародної конвенції МАРПОЛ. При цьому обмеження на емісію NO_x (яке відповідає рівням Tier I, II або III) залежить від року побудови дизеля та його номінальної частоти обертання, а обмеження на викиди SO_x визначається вмістом сірки в паливі.

З 1.02.2020 р. на судах морського та внутрішнього водного транспорту заборонено використання морських сортів палива, вміст сірки в яких перевищує 0,5 % за масою. Також визначені спеціальні екологічні райони з обмеження викидів оксидів сірки (Sulfur Emission Control Areas – SECAs), в яких дозволяється використовувати паливо з вмістом сірки не більш ніж 0,1 %. Під час роботи в цих районах або за умови їх перетинання суднові дизелі (які використовували паливо зі вмістом сірки більш ніж 0,1 %) переводяться на експлуатацію на паливі з вмістом сірки, що не перевищує 0,1 %. Це переведення виконується поступово, з урахуванням обсягу сірчистого палива у витратній цистерні, вмісту сірки в паливі та експлуатаційної потужності дизеля. Час експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки залежить від швидкісних характеристик судна, гідрометеорологічних умов переходу, часу перебування в зоні SECAs та коливається від кількох годин (при знаходженні судна в екологічних районах

Північної Європи) до кількох днів (під час руху в каравані суден внутрішніми водними шляхами Китаю). [151]

Одна з проблем, що виникає під час переведення дизелів на паливо з низьким вмістом сірки, полягає в наступному. Зниження вмісту сірки в паливі сприяє зниженню його густини, в'язкості, температури самозаймання та збільшує теплотворну здатність палива (через пропорційне збільшення вмісту в паливі водню та вуглецю. За однакових умов процесу впорскування палива, що мають меншу температуру самозаймання та більшу теплотворну здатність, характеризуються більш високою температурою наприкінці згоряння T_z . Це зумовлюється зменшенням кута затримки самозаймання, збільшенням кута випередження початку згоряння та більшою ефективністю процесу згоряння в районі верхньої мертвої точки (ВМТ) [152].

Основні теплофізичні характеристики суднових палив наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Основні теплофізичні характеристики суднових палив

Характеристика	RMG500	RMG380	DMA15
Вміст сірки, %	0,5	0,48	0,082
Вміст вуглецю, %	82,1	82,2	83,1
Вміст водню, %	10,3	10,5	10,5
Густина за 15 °С, кг/м ³	993	982	931
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	500	380	11,7
Температура спалаху, °С	81	78	73
Температура самозаймання, °С	203	197	112
Теплотворна здатність, кДж/кг	41660	41920	42230

За умовою більш раннього самозаймання палива підвищується кількість палива, що згоряє до ВМТ. Це призводить до збільшення швидкості зростання тиску за кутом повороту колінчатого валу («жорсткості» роботи

дизеля) та збільшення ступеня підвищення тиску під час згорання $\lambda = p_z / p_c$ (де p_z, p_c – максимальний тиск згорання та тиск наприкінці стиснення, МПа) [11, 12]. Останнє найбільш негативне для двотактних дизелів, що характеризуються підвищеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму, тому викликає збільшення ударних навантажень на крейцкопфний та мотильовий підшипники [153].

Величина T_z визначається через термодинамічне рівняння згорання за виразом

$$T_z = \frac{(m_T - 1)\xi_z Q_H + (c_{pc} + R_c(\lambda - 1))T_c}{m_T c_{pz}}; \quad (4.1)$$

де m_T – коефіцієнт збільшення маси заряду;

ξ_z – коефіцієнт використання теплоти в т. з;

Q_H – нижча теплотворна здатність палива, кДж/кг;

c_{pc}, c_{pz} – середні питомі ізобарні теплоємності суміші повітря та залишкових газів, а також продуктів згорання, кДж/(кг·К);

R_c – газова постійна суміші повітря та залишкових газів;

λ – ступінь підвищення тиску під час згорання;

T_c – температура наприкінці процесу стиснення, К.

Визначення T_z шляхом вимірювання не можливе через динамічність зміни температури в циліндрі дизеля, тому для оцінки її значень використовують розрахункові моделі [154]. Результати моделювання за виразом (1) для співрозмірних за діаметром циліндра d , але різних за ходом поршня S дизелів MAN-Diesel&Turbo надано в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати моделювання

Марка та характеристики дизеля	Нижча теплотворна здатність палива, Q_H , кДж/кг	Температура наприкінці згоряння, T_z , К
K80ME $d=0,8$ м, $S=2,3$ м	41580...41660	1866...1869
	41864...41920	1876...1878
	42180...42230	1887...1896
L80ME $d=0,8$ м, $S=2,592$ м	41596...41660	1822...1825
	41899...41920	1833...1839
	42241...42230	1845...1858
S80ME $d=0,8$ м, $S=3,056$ м	41695...41660	1811...1815
	41888...41920	1825...1836
	42240...42230	1840...1851
G80ME $d=0,8$ м, $S=3,72$ м	41959...41660	1742...1758
	41918...41920	1759...1762
	42260...42230	1776...1788

Незначне на перший погляд підвищення температури T_z під час зміни одного сорту палива на інший характеризується (через інертність теплових процесів) накопичувальним ефектом, що сприяє зростанню теплової напруженості дизеля. До «прихованих» негативних наслідків підвищення температури T_z також відноситься збільшення концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах дизеля, що неминуче виникає відповідно до високотемпературного механізму утворення NO_x Я.В. Зельдовича та теорії утворення швидких NO_x К. Фенімора.

Для визначення механізму, за допомогою якого можливо управління процесом згоряння палива під час переведення роботи дизеля 6S60ME-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo на паливо з низьким вмістом сірки проводився такий експеримент.

Після підготовки паливної системи до експлуатації в зоні SECA (а саме, повного витрачання палива RMG500 зі вмістом сірки 0,5 % та заповнення витратних цистерн паливом DMA15 зі вмістом сірки 0,082 %) було виконано переналаштування паливної апаратури високого тиску шляхом зміни кутів

випередження подачі палива. Для циліндрів №№ 1 та 6 значення попередніх кутів випередження (на яких виконувалась експлуатація дизеля на паливі RMG500) залишилось незмінним (-6° повороту колінчатого вала – ПКВ). Для циліндрів №№ 2, 3, 4, 5 встановлювались нові кути випередження $-5,5, -4,5, -4,0, -5,0^\circ$ ПКВ відповідно). Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск згоряння p_z , тиск наприкінці стиснення p_c , середній індикаторний тиск p_i та температура випускних газів $t_{вг}$. За результатами вимірювання p_i визначалося середнє значення індикаторного тиску по всіх циліндрах дизеля

$$p_i^{cp} = \frac{p_i^1 + p_i^2 + \dots + p_i^6}{6};$$

де $p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^6$ – індикаторний тиск по відповідних циліндрах дизеля, МПа, та відносне відхилення індикаторного тиску за окремими циліндрами від його середнього значення за всіма циліндрами

$$\Delta p_i^n = \frac{|p_i^n - p_i^{cp}|}{p_i^n} 100\%;$$

де p_i^n – індикаторний тиск в одному з циліндрів, МПа.

Фіксація показників роботи дизеля здійснювалась для навантаження $0,85N_{еном}$ (де $N_{еном}=14280$ кВт – максимальна тривала експлуатаційна потужність). Також у газовипускній магістралі вимірювалась концентрація оксидів азоту у випускних газах. Результати дослідження узагальнені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати дослідження

Номер циліндра	Кут випередження подачі палива, $\phi_{\text{вип.}}$, °ПКВ	Максимальний тиск згоряння, p_z , МПа	Тиск наприкінці стиснення, p_c , МПа	Ступінь підвищення тиску під час згоряння, λ	Середній індикаторний тиск, p_i , МПа	Відносне відхилення індикаторного тиску, Δp_i , МПа	Температура випускних газів, $t_{\text{вг.}}$, °С
1	-6	14,68	12,56	1,169	1,96	-1,28	374
2	-5,5	14,72	12,68	1,161	1,97	-0,76	377
3	-4,5	14,78	12,81	1,154	2,01	1,24	382
4	-4	14,66	12,78	1,147	2,01	1,24	386
5	-5	14,71	12,65	1,163	1,99	0,25	383
6	-6	14,77	12,58	1,174	1,97	-0,76	375

За результатами таблиці 4.4 побудовані номограми (рис. 4.11), що відображають зміну показників роботи дизеля за різних умов налаштування паливної апаратури високого тиску. Як найбільш інформативні показники, що характеризують перебіг процесу згоряння та використання теплоти, були обрані ступінь підвищення тиску під час згоряння λ та температура випускних газів $t_{\text{вг.}}$. Значення p_i , Δp_i та $t_{\text{вг.}}$ були віднесені до показників, що характеризують рівномірність розподілення навантаження по циліндрах дизеля.

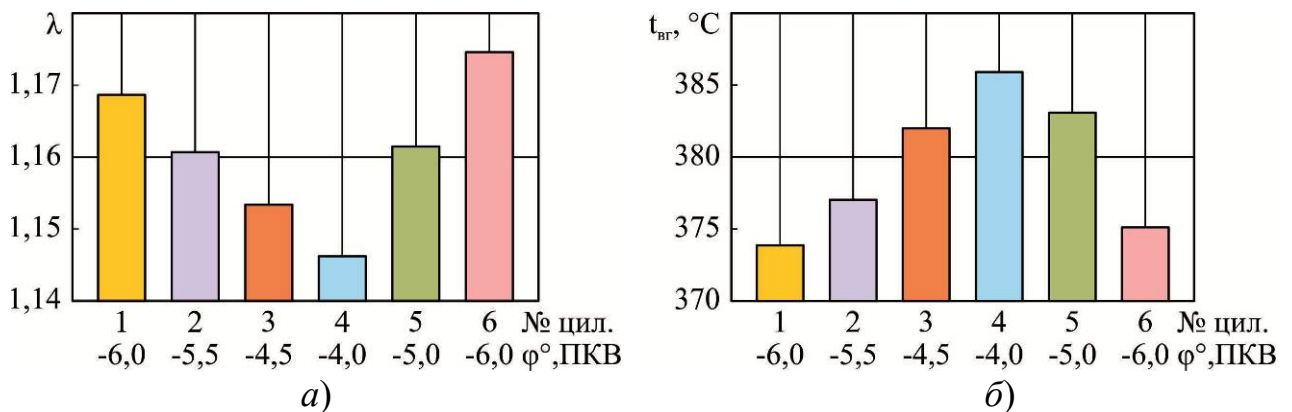


Рис. 4.11. Зміна ступеня підвищення тиску під час згоряння λ (а) та температура випускних газів $t_{\text{вг.}}$ (б) для різних кутів випередження подачі палива суднового дизеля 6S60ME-8.2-ТІІ

Неузгодженість показників робочого процесу по циліндрах під час переналаштування ПА на різні для кожного з циліндрів кути випередження подачі палива не перевищувала: щодо максимального тиску згоряння $p_z - \pm 0,5 \%$; щодо середнього індикаторного тиску $p_i - \pm 1,3 \%$; щодо тиску наприкінці стиснення $p_c - \pm 1,0 \%$; щодо температури випускних газів $t_{вг} - \pm 7^\circ \text{C}$ [19, 20]. Дозволена розбіжність у значеннях Δp_i гарантувала ефективність перебігу робочого циклу по всіх циліндрах дизеля [155].

Вимірювання концентрація оксидів азоту у випускних газах виконувалося для трьох умов експлуатації дизеля: робота на паливі RMG500, робота на паливі DMA15 з однаковими кутами випередження подачі палива (до переналаштування дизеля), робота на паливі DMA15 з різними кутами випередження подачі палива (після переналаштування дизеля) [156]. При цьому для всіх випадків дизель експлуатувався на навантаженні $0,85N_{\text{енном}}$ не менш ніж 2 год. Номограма, що відображає зміну NO_x за цих умов надана на рис. 4.12.

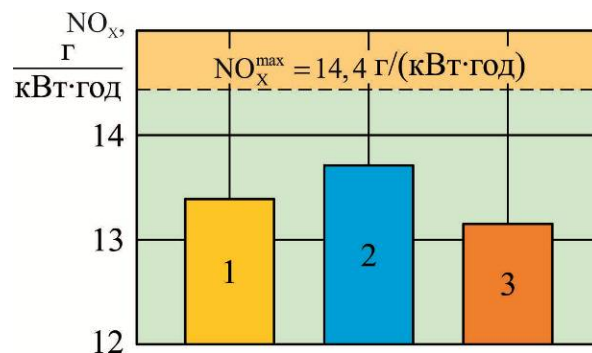


Рис. 4.12. Концентрація NO_x у випускних газах суднового дизеля 6S60ME-8.2-ТІІ за різних умов експлуатації:

- 1 – робота на паливі RMG500; 2 – робота на паливі DMA15 з однаковими кутами випередження подачі палива для всіх циліндрів;
- 3 – робота на паливі DMA15 з різними кутами випередження подачі палива по циліндрах дизеля (відповідно до табл. 3)

Значення концентрації NO_x у випускних газах на всіх режимах роботи не перевищувало максимально можливої величини, яка для дизелів, що відносяться до рівня Tier II відповідно до вимог Додатку VI МАРПОЛ складає 14,4 г/(кВт·год) [157].

Збільшення концентрації NO_x у випускних газах під час роботи дизеля 6S60ME-8.2-TII з використанням палива DMA15 (з низьким вмістом сірки) свідчить про підвищення пікових температур під час згоряння палива за цих умов. Переналаштування ПА на різні кути випередження та пов'язане з цим зменшення емісії NO_x обумовлюється затримкою займання палива та зниженням максимальної температури згоряння палива [145].

4.5. Аналіз впливу палив з низьким вмістом сірки на експлуатаційні характеристики суднових дизелів

Наступним кроком досліджень було визначення впливу палив з низьким вмістом сірки на експлуатаційні характеристики суднових дизелів.

Система подачі палива відноситься до основних систем, що забезпечують надійність роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Процеси паливоподачі відіграють першорядну роль під час експлуатації та забезпечення безвідмовності суднових дизелів. Навіть короткочасне порушення процесу, інтервалу та фаз паливоподачі призводить до відхилення від коректної роботи одного чи декількох циліндрів, та згодом дизеля та всього енергетичного комплексу загалом. Особлива небезпека таких ситуацій виявляється під час знаходження суден в районах інтенсивного судноплавства, вузькостях та акваторіях морських та річкових портів.

Якість процесу паливоподачі суднових дизелів оцінюється за різними показниками, насамперед:

- за аналізом палива, що взято під час бункеровки судна;
- за показниками робочого циклу (перш за все за величиною тиску наприкінці процесу стиснення та за значенням температури випускних газів);
- за механічними втратами, що виникають під час перетворення індикаторної роботи робочого циклу в ефективну потужність.

Зміна цих показників у негативний бік свідчить про погіршення процесу паливоподачі. Причиною цього стає те, що може виявитися зменшення гідравлічної щільності в прецизійних парах паливної апаратури високого тиску. Також можливі випадки виникнення пропусків спалаху палива з циліндрах, де тиск та температура повітря наприкінці стиснення не забезпечують надійне самозапалювання палива. Одночасно з цим навантаження на інші циліндри стрибкоподібно збільшується, зростає нерівномірність обертання колінчатого валу та динамічна невривноваженість дизеля. Перелічені фактори призводять до виникнення критичних, надкритичних та аварійних режимів роботи дизеля, що стає причиною зниження його надійності.

Дослідження проводилися на судових допоміжних двигунах Volvo Penta TMDA 163A, які в кількості двох входили до складу допоміжної енергетичної установки спеціалізованого морського судна класу Heavy Lift дедвейтом 12608 тонн. Обидва двигуни на початок експерименту знаходились в однаково новому технічному стані та характеризувались однаковим періодом експлуатації на однакових навантаженнях. Дизелі під час проведення експерименту використовували паливо з різним вмістом сірки. Один – паливо MGO з вмістом сірки не більш за 0,5 %, другий – паливо LSMGO з вмістом сірки не більш за 0,1 %.

Дизелі до початку експерименту мали сумірний період експлуатації, однаковий технічний стан основних контактних вузлів (колінчатого валу, вкладишів підшипників, паливної апаратури) та експлуатувалися на однакових навантаженнях (з неузгодженістю не більше $\pm 2,5\%$). Це

дозволяло зробити висновок про їхню ідентичність один одному як перед початком експерименту, так і під час його проведення.

Завданням експериментів було виявлення впливу роботи двигунів на паливі з низьким вмістом сірки на технічний стан паливної апаратури та основних контактних вузлів.

Показниками, за якими здійснювали контроль технічного стану, експлуатаційних показників та оцінка безвідмовності дизелів, були обрані:

- загальне лужне число (TBN) моторного мастила;
- тиск у циліндрі наприкінці процесу згоряння;
- температура випускних газів;
- питома витрата палива.

Вимірювання TBN моторного мастила виконувалось за допомогою суднової лабораторії DIGI Used Oil TBN Analysis Kit. Результати вимірювань наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Зміна загального лужного числа моторного мастила під час використання різних сортів палива

Час, <i>t</i> , год	MGO		LSMGO	
	TBN, мгКОН/г	V_{TBN} , (мгКОН/г)/год	TBN, мгКОН/г	V_{TBN} , (мгКОН/г)/год
1	12,4	–	12,4	–
200	12,2	0,10	12,3	0,17
400	11,8	0,12	12,2	0,20
600	11,3	0,20	12,0	0,22
800	10,8	0,205	11,8	0,26
1000	10,5	0,20	11,7	0,26

Як показник, що характеризує динаміку зміни TBN моторного мастила за певний проміжок часу, доцільно визначати швидкість зменшення його загального лужного числа, яка розраховується за виразом

$$V_{\text{TBN}} = \frac{\text{TBN}_{n-1} - \text{TBN}_n}{t_n - t_{n-1}} \cdot 100;$$

де TBN_n , TBN_{n-1} , t_n , t_{n-1} – поточне та попереднє значення відповідних показників, співмножник 100 введено з метою кращої візуалізації значень швидкості зменшення TBN у зв'язку з їх невеликим абсолютним значенням.

За результатами, що надані в таблиці 4.5, побудовані діаграми, які відображають зміну TBN та V_{TBN} за часом (рис. 4.13).

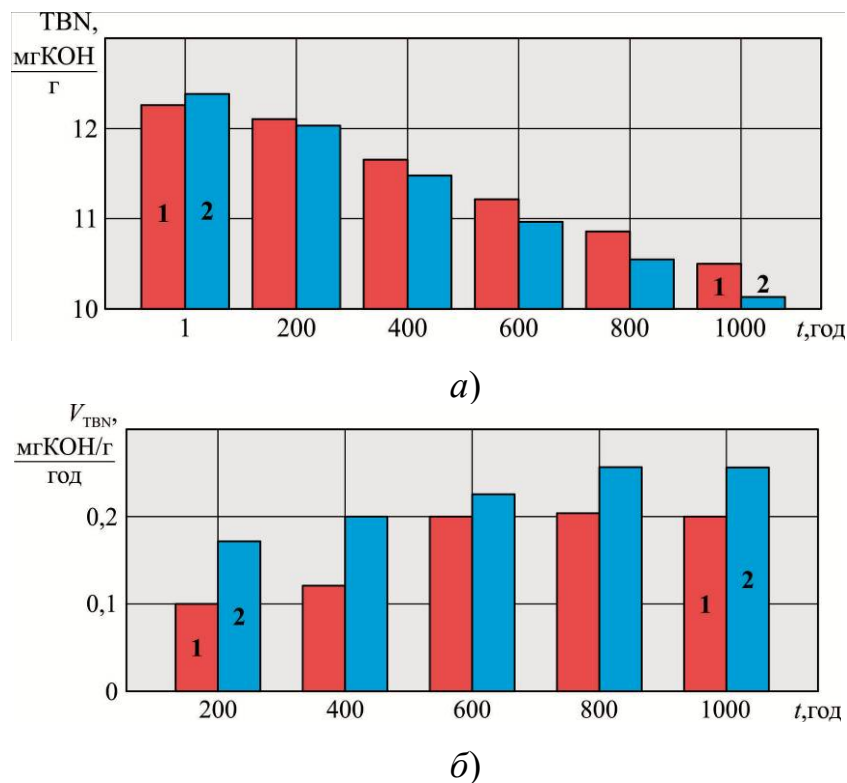


Рис. 4.13. Зміна характеристик моторного мастила під час експлуатації суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A на різних сортах палива:

1 – MGO; 2 – LSMGO; а – TBN; б – V_{TBN}

Ще одним з показників, за допомогою якого можливо виконувати оцінку безвідмовності роботи судових дизелів, є тиск наприкінці стиснення. Його зниження в окремих циліндрах дизеля свідчить про погіршення компресійних властивостей поршневих кілець, потрапляння металевих домішок на поверхню втулки циліндра та збільшення їх зносу.

Під час експерименту значення тиску стиснення визначалося за допомогою судової системи діагностики Doctor для кожного з циліндрів

дизеля (за умови вимкнення подачі палива в даний циліндр). За отриманими значеннями розраховувалося середнє значення тиску стиснення по всіх циліндрах дизеля. Контроль тиску стиснення виконувався після 1-ї години роботи дизелів і далі через кожні 100 годин роботи. На тимчасових проміжках, у яких виконувався контроль тиску стиснення (1, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 годин), дизелі працювали на різних, але однакових між собою навантаженнях (в діапазоні 200...280 кВт). Система діагностики Doctor дозволяє контролювати параметри робочого процесу дизеля з похибкою $\pm 1,0\%$. Отримані значення під час використання різних моторних палив наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Зміна тиску стиснення суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних сортів палива

Час, години	Тиск стиснення, МПа	
	MGO	LSMGO
1	9,18	9,18
200	9,15	9,11
400	9,07	9,02
600	8,93	8,83
800	8,92	8,71
1000	8,91	8,69

Примітка: відповідно до інструкції з експлуатації номінальне значення тиску наприкінці процесу стиснення складає $p_{\text{ном}}=9,2$ МПа.

Для кращої візуалізації результати, що надані в таблиці 4.6, узагальнені як номограма, що показана на рис. 4.14.

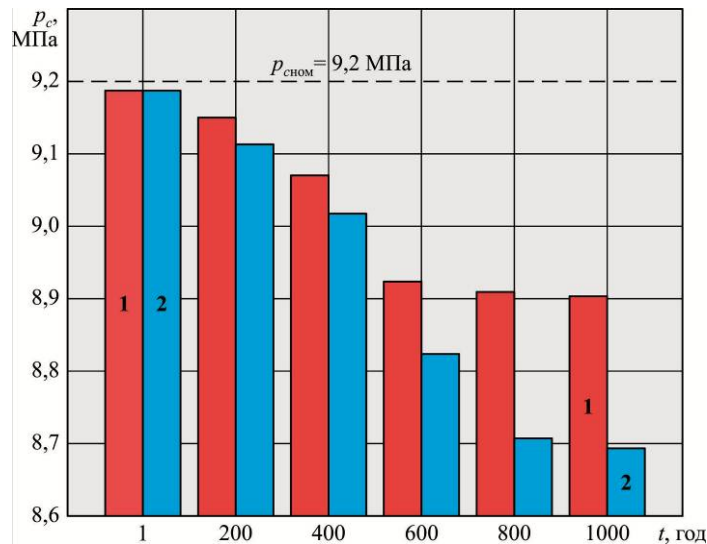


Рис. 4.14. Зміна тиску стиснення p_c суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних палив:

1 – MGO; 2 – LSMGO

Одним із параметрів роботи дизеля, що характеризує якість робочого процесу, є температура газів після циліндра t_r . Збільшення її значення за окремими циліндрами дизеля свідчить про погіршення процесу згоряння палива в циліндрі дизеля (у разі пізнього впорскування) або про погіршення стану паливної апаратури в результаті впливу палива з низьким вмістом сірки (що має нижчі змащувальні показники). Контроль температури газів після циліндра дизеля Volvo Penta TMDA 163A проводився за допомогою системи діагностики Doctor, що виконує вимірювання температури та виведення показів на комп'ютер центрального поста управління. Аналогічно вимірювання тиску наприкінці стиснення, вимірювання температури випускних газів проводилися в інтервалі 1...1000 годин роботи дизелів, при цьому дизелі експлуатувалися на різних, але рівних між собою навантаженнях. Протягом усього періоду проведення експерименту підтримувалися однакові параметри в системах охолодження та змащування дизелів (температура мастила на вході в дизель, температура води на виході з дизеля, тиск мастила та води на вході в дизель). Значення температури газів після циліндра визначалися для кожного циліндра дизеля, після чого ці

значення усереднювалися. У таблиці 4.7 наведено середні значення t_r для всіх циліндрів. Додатково відзначимо, що під час експерименту відхилення значення температури випускних газів за окремими циліндрами від середнього значення по всіх циліндрах не перевищувало $\pm 10^\circ\text{C}$.

Таблиця 4.7

Зміна температури випускних газів суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних палива

Час, години	Температура випускних газів, $^\circ\text{C}$	
	MGO	LSMGO
1	323	323
200	322	326
400	321	304
600	318	307
800	320	299
1000	321	301

Примітка: відповідно до інструкції з експлуатації максимальне значення температури випускних газів $t_{r\text{max}}=360^\circ\text{C}$.

Для кращої візуалізації результати, що надані в таблиці 4.7, узагальнені як номограма, що показана на рис. 4.15.

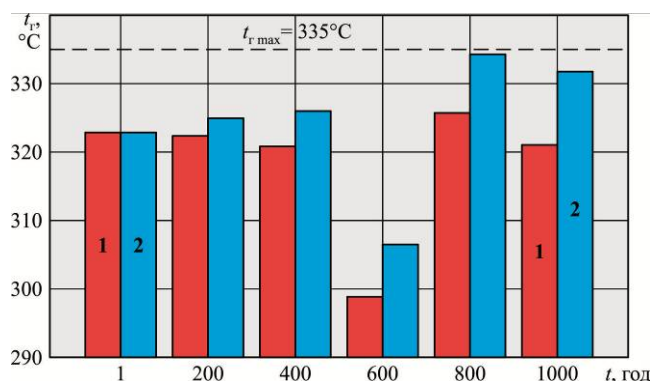


Рис. 4.15. Зміна температури випускних газів t_r суднового дизеля

Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних палив:

1 – MGO; 2 – LSMGO

Економічність роботи дизелів оцінювалася за величиною питомої витрати палива b_e , кг/(кВт·год), її значення розраховувались за величиною витрати палива, часу, впродовж якого проводились експериментальні дослідження, та потужності дизеля за час проведення експерименту (в інтервалах 1...200 годин, 200...400 годин та далі до 800...1000 годин). Отримані значення наведені в таблиці 4.8 та узагальнені як діаграми на рис. 4.16.

Таблиця 4.8

Зміна питомої витрати палива суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних палив

Час, години	Питома витрата палива, кг/(кВт·год)	
	MGO	LSMG
1	213	214
200	216	219
400	211	217
600	204	215
800	213	222
1000	214	224

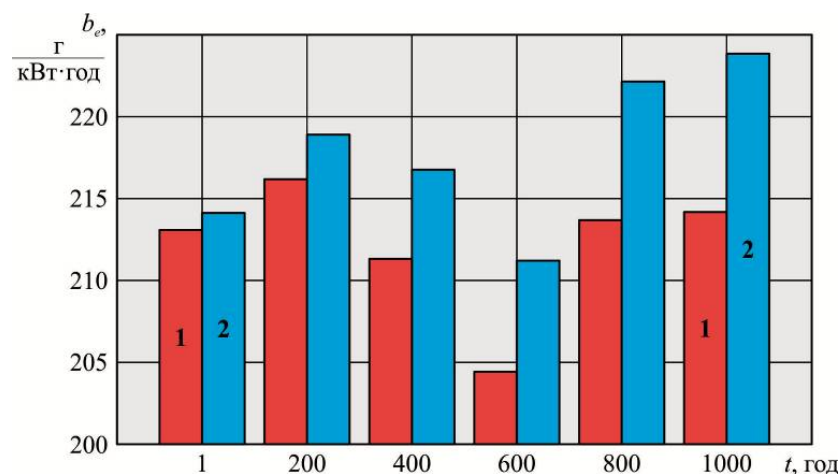


Рис. 4.16. Зміна питомої витрати палива b_e суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних палив:
1 – MGO; 2 – LSMGO

4.5. Висновки за розділом 4

Як результат досліджень, виконаних у розділі 4, визначимо таке.

1. Необхідність періодичного використання в дизелях морських та річкових суден палива з низьким вмістом сірки (масове значення якого не перебільшує 0,1 %, а для деяких палив знаходиться в діапазоні 0,03...0,05 %) призводить до прогрішення функціональних властивостей паливної апаратури високого тиску. Це перш за все пов'язане зі зменшенням змащувальної здатності палива з низьким вмістом сірки порівняно з іншими видами палива (вміст сірки в яких досягає 0,5 %).

2. Одним зі шляхів забезпечення змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки є їх додаткова гідродинамічна обробка, яка сприяє підвищенню їх в'язкості в граничному шарі, що безпосередньо поділяє прецизійні пари паливної апаратури високого тиску. При цьому експериментально встановлено, що за таким способом забезпечується зниження механічних втрат у прецизійних парах паливної апаратури високого тиску, що виявляється в зменшенні на 16,4...25,4 % сили тертя в прецизійних парах паливної апаратури високого тиску.

3. Через меншу в'язкість граничного шару палива з низьким вмістом сірки в прецизійних парах паливної апаратури високого тиску виникають додаткові протічки палива, що зменшує його циклову подачу та, відповідно, індикаторні показники роботи дизеля. Підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску досягається шляхом контролю об'ємів палива, яке потрапляє в циліндр дизеля та повертається в систему паливоподачі відсічною магістраллю.

4. Тимчасове переведення суднових дизелів на експлуатацію з використанням палива з низьким вмістом сірки призводить до інтенсифікації процесу згоряння, що виявляється в збільшенні динамічних та теплових навантажень на деталі циліндрової групи та підшипники дизеля.

Попередження цього явища можливе за рахунок зміни фаз подачі палива, технологія якої можлива для дизелів з електронною системою управління. При цьому оптимальні фази подачі палива з низьким вмістом сірки відповідають кутам впорскування, за якими забезпечується максимальні енергетичні (тиск наприкінці стиснення та згорання) та економічні (питома витрата палива) показники роботи дизелів.

РОЗДІЛ 5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПАЛИВОПОДАЧІ ДИЗЕЛІВ РІЧКОВИХ ТА МОРСЬКИХ СУДЕН

5.1. Корегування процесу подачі палива під час використання в суднових дизелях палив з різним вмістом сірки

Морський транспорт є ключовою складовою транспортної логістики, забезпечуючи вантажні потоки між країнами на різних континентах. Перевезення готової продукції, сировини, зерна, нафти та газу між Південною та Північною Америкою, Азією, Африкою та Європою не можливе без використання різних за вантажопідйомністю та призначенням морських суден. Сучасні морські судна обладнані двигунами внутрішнього згоряння, які є найпоширенішими тепловими двигунами та головним елементом енергетичних установок суден.

Підвищення температури в кінці згоряння під час зміни палива призводить до кумулятивних ефектів, збільшуючи термічні навантаження на газові системи дизеля та збільшуючи емісію оксидів азоту. Виконання вимог Додатку VI міжнародної конвенції МАРПОЛ та перехід на низькосірчисте паливо в суднових дизелях підвищує ризики аварій, таких як збільшення динамічних навантажень, температурної напруги та емісії оксидів азоту [161].

Пропоновані різні методи розв'язання цих проблем, такі як використання стиснутого повітря для зниження динамічних навантажень, додаткове впорскування води для зменшення температурної напруги, використання різних технічних засобів для зменшення емісії оксидів азоту. Проте ці методи знижують потужність дизеля та швидкість судна та вимагають значних фінансових та технічних витрат [162].

У зв'язку з викладеним метою дослідження була розробка методу управління ризиками аварійних ситуацій під час використання

низькосірчистого палива в суднових дизелях, забезпечуючи відповідні енергетичні та екологічні показники роботи.

Дослідження проводилося на спеціалізованому морському судні для перевезення контейнерів. Як головний двигун на судні був встановлений судновий дизель 8K80ME-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo з наступними основними характеристиками:

- діаметр циліндра – 0,8 м;
- хід поршня – 2,3 м;
- частота обертання вала – 104 об/хв;
- кількість циліндрів – 8;
- номінальна потужність – 35600 кВт.

Контроль параметрів роботи дизеля здійснювався за допомогою системи діагностики Doctor, що дозволяє визначати значення з точністю $\pm 0,5\%$. Викиди оксидів азоту з випускними газами визначалися за допомогою газоаналізатора від фірми Testo, при цьому похибка вимірювань не перевищувала 0,5 %. Експлуатація дизеля поза зонами SECA виконувалася на паливі RMG380 із вмістом сірки 0,48 %, а також на паливі RME180; в SECA – на паливі DMA із вмістом сірки 0,055%. Основні характеристики палив, що використовувались під час експлуатації дизеля, наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Основні характеристики суднових палив

Характеристика	RMG380	RME180	DMA
Вміст вуглецю, %	82,7	83,3	83,8
Вміст водню, %	10,6	10,7	11,1
Вміст сірки, %	0,48	0,42	0,055
Густина за 15 °С, кг/м ³	989	961	855
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	380	380	12
Температура спалаху, °С	83	76	66
Температура самозаймання, °С	201	195	106
Теплотворна здатність, кДж/кг	41160	42010	42340

Досліджувалась робота дизеля 8K80ME-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo на різних видах палива, оцінюючи тиск згоряння p_z , температуру випускних газів t_g , концентрацію оксидів азоту NO_x та ступінь підвищення тиску під час згоряння λ . Результати досліджень наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Результати досліджень

Марка палива	Тиск згоряння p_z , МПа	Температура випускних газів t_g , °C	Концентрація оксидів азоту у випускних газах NO_x , г/(кВт·год)	Ступінь підвищення тиску під час згоряння, λ
RMG380	14,22	374	12,9	1,324
RME180	14,28	381	13,3	1,329
DMA	14,45	394	13,75	1,335

Візуалізація результатів, наведених в таблиці 5.2, показана на рис. 5.1.

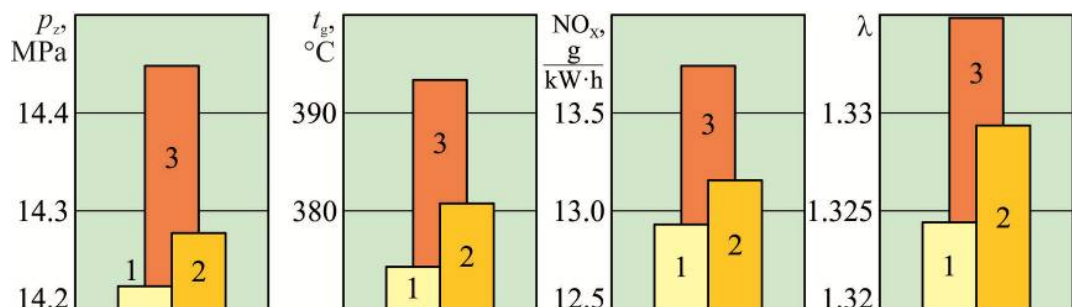


Рис. 5.1. Зміна показників роботи суднового дизеля 8K80ME-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo під час експлуатації на різних видах палива:

1 – RMG380; 2 – RME180; 3 – DMA

Проведені дослідження підтверджують тезу, що перехід суднових дизелів на паливо з меншим вмістом сірки призводить до збільшення навантажень і погіршення екологічних показників. Для управління цим обране регулювання фаз подачі палива зі зміною кута випередження впорскування палива [163]. Оптимальні значення визначаються на стенді під час випробувань для номінального режиму роботи та основного палива. Технологія досліджень включала переналаштування системи подачі палива

для дизеля в SECA, зміну кутів випередження для окремих циліндрів. Контроль проводився для різних параметрів роботи.

Для циліндрів № 1 та 8 значення кутів випередження подачі палива (на яких відбувалася експлуатація дизеля при використанні палива RMG380) залишилося незмінним і становило -4° кута повороту колінчастого вала (crankshaft rotation angle – CRA).

Для циліндрів №№ 2, 3, 4, 5, 6, 7 встановлювались нові кути випередження подачі палива: $-3, -2, -1, -1, -2, -3^\circ$ CRA відповідно. Встановлення однакових кутів випередження подачі палива у двох циліндрах (в першому і восьмому, другому і сьомому, третьому і шостому, четвертому і п'ятому) збільшувало масив отриманих результатів, підвищувало точність вимірювань і давало можливість виконати коригуючі дії в разі їх розходження.

Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск горіння p_z , тиск у кінці стиску p_c , середній індикаторний тиск p_i та температура випускних газів t_g . Для кожного з наведених параметрів розраховувалося середнє значення.

$$p_z^{\text{md}} = (p_z^1 + p_z^2 + \dots + p_z^8) / 8; \quad p_c^{\text{md}} = (p_c^1 + p_c^2 + \dots + p_c^8) / 8;$$

$$p_i^{\text{md}} = (p_i^1 + p_i^2 + \dots + p_i^8) / 8; \quad t_g^{\text{md}} = (t_g^1 + t_g^2 + \dots + t_g^8) / 8;$$

а також відхилення від середнього значення

$$\Delta p_z^1 = \frac{|p_z^1 - p_z^{\text{md}}|}{p_z^1} \cdot 100\%, \quad \Delta p_z^2 = \frac{|p_z^2 - p_z^{\text{md}}|}{p_z^2} \cdot 100\%, \quad \dots \quad \Delta p_z^8 = \frac{|p_z^8 - p_z^{\text{md}}|}{p_z^8} \cdot 100\%;$$

$$\Delta p_c^1 = \frac{|p_c^1 - p_c^{\text{md}}|}{p_c^1} \cdot 100\%, \quad \Delta p_c^2 = \frac{|p_c^2 - p_c^{\text{md}}|}{p_c^2} \cdot 100\%, \quad \dots \quad \Delta p_c^8 = \frac{|p_c^8 - p_c^{\text{md}}|}{p_c^8} \cdot 100\%;$$

$$\Delta p_i^1 = \frac{|p_i^1 - p_i^{\text{md}}|}{p_i^1} \cdot 100\%, \quad \Delta p_i^2 = \frac{|p_i^2 - p_i^{\text{md}}|}{p_i^2} \cdot 100\%, \quad \dots \quad \Delta p_i^8 = \frac{|p_i^8 - p_i^{\text{md}}|}{p_i^8} \cdot 100\%;$$

$$\Delta t_g^1 = \frac{|t_g^1 - t_g^{\text{md}}|}{t_g^1} \cdot 100\%, \quad \Delta t_g^2 = \frac{|t_g^2 - t_g^{\text{md}}|}{t_g^2} \cdot 100\%, \quad \dots \quad \Delta t_g^8 = \frac{|t_g^8 - t_g^{\text{md}}|}{t_g^8} \cdot 100\%;$$

де p_z^{md} , p_c^{md} , $p_i^{\text{md}}, t_g^{\text{md}}$ – середні значення тиску згоряння, тиску стиснення, середнього індикаторного тиску та температури випускних газів;

$p_z^1, p_z^2, \dots, p_z^8$ – тиск згоряння в 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах відповідно;

$p_c^1, p_c^2, \dots, p_c^8$ – тиск стиснення в 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах

відповідно;

$p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^8$ – середній індикаторний тиск у 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах відповідно [35, 36];

$t_g^1, t_g^2, \dots, t_g^8$ – температура випускних газів в 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах відповідно [37, 368];

$\Delta p_z^1, \Delta p_z^2, \dots, \Delta p_z^8$ – відхилення тиску згоряння від середнього значення в 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах відповідно;

$\Delta p_i^1, \Delta p_i^2, \Delta p_i^8$ – відхилення тиску стиснення від середнього значення в 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах відповідно;

$\Delta p_c^1, \Delta p_c^2, \Delta p_c^8$ – відхилення середнього індикаторного тиску від середнього значення в 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах відповідно;

$\Delta t_g^1, \Delta t_g^2, \dots, \Delta t_g^8$ – відхилення температури випускних газів від середнього значення в 1-му, 2-му, ... 8-му циліндрах відповідно [164].

Крім того, визначалося значення ступеня підвищення тиску при згорянні λ та виконувався контроль емісії оксидів азоту з випускними газами NO_x . Фіксація показників роботи дизеля здійснювалася для навантаження $0,5N_{\text{еном}}$ (де $N_{\text{еном}}=35600$ кВт – номінальна потужність). Результати експериментів наведені у таблиці 5.3.

Крім того, визначалося значення ступеня підвищення тиску при згорянні λ і здійснювався контроль емісії оксидів азоту з випускними газами NO_x . Фіксація показників роботи дизеля виконувалась для навантаження $0,85N_{\text{еном}}$ (де $N_{\text{еном}}=35600$ kW – номінальна потужність). Результати експериментів наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Результати експерименту

Параметр	Номер циліндра								Середнє значення
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Тиск згоряння, p_z , МПа	14,45	14,38	14,23	14,05	14,03	14,21	14,36	14,47	14,27
Відхилення тиску згоряння від середнього значення, Δp_z , %	1,23	0,75	0,29	1,58	1,73	0,44	0,61	1,36	—
Тиск стиснення, p_c , МПа	10,82	10,78	10,77	10,78	10,76	10,82	10,8	10,82	10,79
Відхилення тиску стиснення від середнього значення, Δp_c , %	0,29	0,07	0,17	0,08	0,26	0,29	0,11	0,29	—
Середній індикаторний тиск, p_i , МПа	1,995	1,987	2,012	2,02	1,996	1,985	2,014	2,018	2,00
Відхилення середнього індикаторного тиску від середнього значення, Δp_i , %	0,42	0,82	0,43	0,82	0,37	0,93	0,53	0,72	—
Температура випускних газів, t_g , °C	394	388	382	378	375	385	390	394	386
Відхилення температури випускних газів від середнього значення, Δt_g , °C	8	2	4	8	11	1	4	8	—
Ступінь підвищення тиску при згорянні λ	1,335	1,334	1,321	1,303	1,304	1,313	1,329	1,337	—
Емісія оксидів азоту з випускними газами, NO_x , г/(кВт·год)	13,75	13,62	13,21	12,82	12,85	13,12	13,51	13,88	—

Для кращої візуалізації значень (тиску згоряння, тиску стиснення, індикаторного тиску та температури випускних газів) побудовано номограми змін роботи дизеля за різних умовах налаштування паливної апаратури (рис. 5.2).

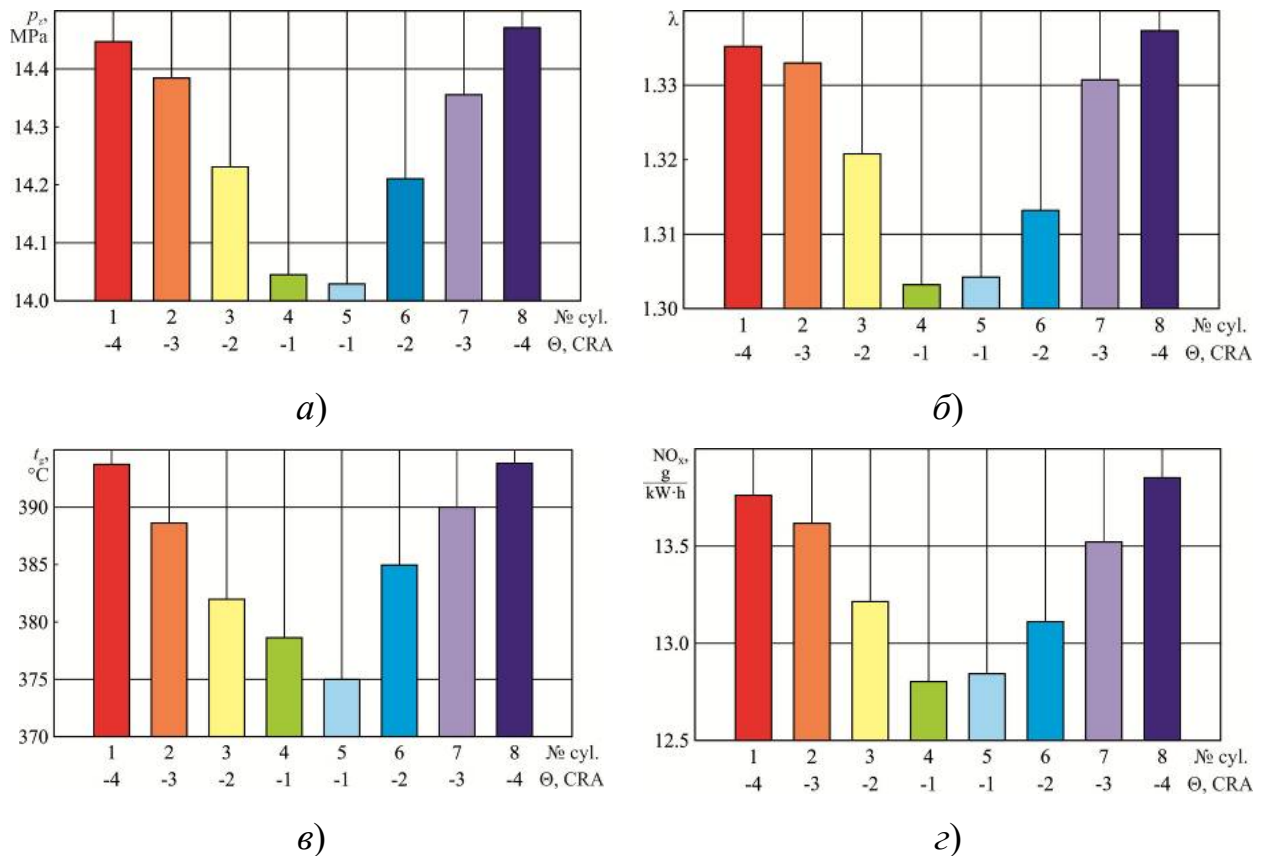


Рис. 5.2. Зміна показників роботи суднового двигуна 8K80ME-8.2-ТІІ за різних кутів випередження подачі палива θ :
а – тиск під час згоряння; *б* – температура випускних газів; *в* – ступінь підвищення тиску під час згоряння; *з* – концентрація оксидів азоту у випускних газах

Важливо відзначити, що під час проведення експериментів значення контрольованих параметрів не перевищували встановлені, а концентрація NO_x у випускних газах залишалась нижчою від максимально допустимого рівня для дизелів Tier II за Додатку VI МАРПОЛ, що становить 14,4 г/(кВт·год) [121, 165].

Наведені результати вказують на можливість управління ризиком аварій, пов'язаних із використанням палив зі зниженим вмістом сірки, змінюючи кути випередження подачі палива [123, 166].

Запас екологічної, температурної та динамічної стійкості суднових дизелів під час їхнього переведення на паливо з пониженим вмістом сірки визначається наступними параметрами:

запас екологічної стійкості

$$\Delta NO_X = \frac{NO_X^{\text{Tier}} - NO_X^i}{NO_X^{\text{Tier}}} \cdot 100\%; \quad (5.1)$$

запас теплової стійкості

$$\Delta t_g = \frac{t_g^{\text{max}} - t_g^i}{t_g^{\text{max}}} \cdot 100\%; \quad (5.2)$$

запас динамічної стійкості

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^{\text{max}} - \lambda^i}{\lambda^{\text{max}}} \cdot 100\%; \quad (5.3)$$

де NO_X^{Tier} – максимальне значення викидів оксидів азоту відповідно до Додатку VI МАРПОЛ;

t_g^{max} , λ^{max} – максимальні значення температури випускних газів та ступеня підвищення тиску під час згоряння, отримані протягом експерименту;

NO_X^i , t_g^i , λ^i – відповідно, значення концентрації оксидів у випускних газах, температури випускних газів і ступеня підвищення тиску під час згоряння в різних циліндрах дизеля, отримані під час експерименту [167].

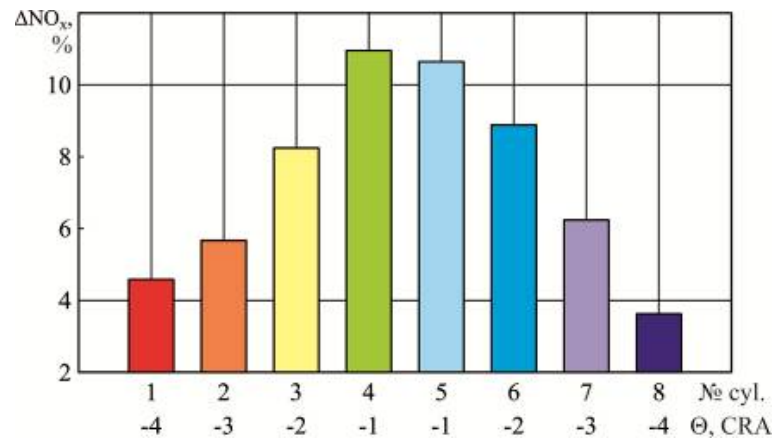
Отримані таким чином значення представлені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

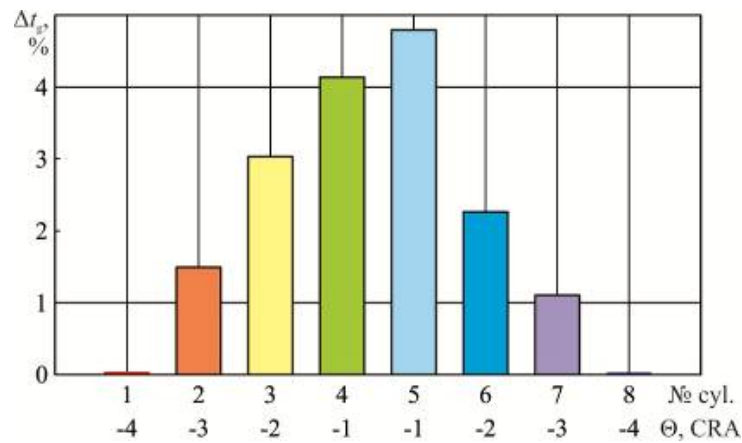
Визначення запасу стійкості дизеля

Показник	Кут повороту колінчатого валу, °ПКВ							
	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	-4
Екологічна стійкість, %	4,51	5,42	8,26	10,97	10,76	8,89	6,18	3,61
Температурна стійкість, %	0,14	0,257	1,20	2,54	2,50	1,79	0,58	0
Динамічна стійкість, %	0	1,52	3,05	4,06	4,82	2,28	1,028	0

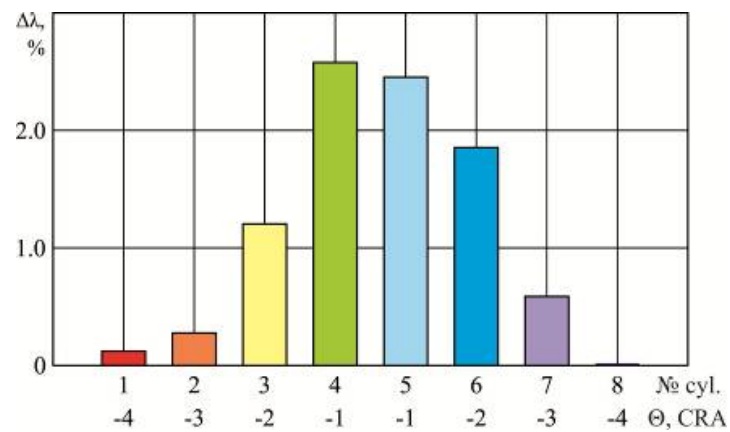
Для кращої візуалізації отримані результати подано у вигляді номограм на рис. 5.3



a)



б)



в)

Рис. 5.3. Екологічна (а), теплова (б), динамічна (в) стійкість роботи суднового дизеля 8K80MC-8.2-ТІІ за різних кутів випередження подачі палива θ

Проведення всіх експериментів було погоджено з технічним відділом судноплавної компанії, яка здійснює менеджмент судна та його енергетичної установки [168].

Під час проведення експериментів контролювались та підтримувалися в рекомендованих діапазонах усі параметри роботи суднового дизеля 8K80MC-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo.

Результати досліджень дозволяють визначити, що:

1) перехід суден на паливо з низьким вмістом сірки, що необхідно під час його експлуатації екологічних зонах SECAs, підвищує інтенсивність згоряння, навантаження на дизель та негативно впливає на екологічні показники, збільшуючи ризик аварій;

2) використання перерегулювання паливної апаратури дизеля, зокрема зміни кутів подачі палива, може бути методом управління ризиками під час використання палива з низьким вмістом сірки;

3) експерименти, що були виконані на дизелі 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo під час його переведення з палива RMG380 на паливо DMA підтвердили, що при цьому відбувається зниження тиску згоряння, температури випускних газів, а також підвищується екологічна стійкість дизеля, що виявляється в зменшенні викидів оксидів азоту;

4) практичне значення результатів проведених досліджень полягає у можливості їх використання як у дво-, так і чотиритактних дизелях, які мають електронну систему управління впорскуванням палива.

5) використання розробленого методу особливо актуальне під час знаходження суден в особливих екологічних районах, кількість і межі яких постійно збільшуються та розширюються.

5.2. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів

Сучасні судна морського та внутрішнього водного транспорту є життєво важливою ланкою в ланцюжку постачання, що з'єднує країни на різних континентах. Різноманітні вантажі, від готової продукції та сировини до зерна, нафти та газу, перевозяться морськими судами різної вантажопідйомності та призначення.

Від сучасних двигунів потребується не лише забезпечення необхідної потужності та надійність, а ще також відповідність сучасним екологічним нормам. Концентрація SO_x та NO_x у випускних газах – це два ключові показники екологічності, які регулюються МАРПОЛ. Їх граничні значення залежать від року випуску та частоти обертання дизеля (Tier I, II або III) для NO_x та від вмісту сірки в паливі для SO_x . Відповідно до цих вимог, вміст сірки в паливі що використовують судна не повинен перебільшувати 0,5 % та 0,1 % під час експлуатації судна в спеціальних зонах контролю [109, 121].

Перехід дизельних двигунів на паливо з низьким вмістом сірки несе за собою ряд проблем, пов'язаних зі зміною його хімічного складу. Зниження концентрації сірки веде до зменшення густини, в'язкості та температури самозаймання. Збільшення швидкості згоряння та тиску під час згоряння може мати як позитивні, так і негативні наслідки. Тому важливо правильно налаштувати двигун для роботи з паливом з низьким вмістом сірки, щоб максимізувати позитивні ефекти та мінімізувати негативні. Це може включати: зміну параметрів впорскування палива, зміну тиску наддуву. З іншого боку збільшення швидкості згоряння може призвести до збільшення навантаження на деталі двигуна та скорочення його ресурсу.

Існують методи боротьби з негативними наслідками переходу на екологічно чисте паливо в судових дизелях. Вони включають використання стиснутого повітря, додаткове впорскування води та різні технології

зниження викидів оксидів азоту. Для досягнення оптимальних результатів важливо обрати методи, що відповідають конкретному двигуну та умовам його роботи. Боротьба з негативними наслідками переходу на екологічне паливо, хоча й має рішення у вигляді стиснутого повітря, додаткового впорскування води та технологій зниження викидів NO_x , зумовлює зниження потужності двигуна, швидкості судна та потребує додаткових витрат [169]. Крім того, впровадження цих методів можливо лише на етапі будівництва дизелів, тому не може бути рекомендовано для судових дизелів, що знаходяться в експлуатації. Найбільш сприятливим методом керування процесами згоряння під час використання палива з різними експлуатаційними характеристиками та структурним складом є зміна кутів впорскування палива. Також визначимо, що цей метод найбільш доцільний до використання в дизелях з електронним управлінням подачею палива.

Двотактні дизелі більш чутливі до проблем, пов'язаних з раннім самозайманням та високою температурою при роботі з паливом з низьким вмістом сірки. Це пов'язано з збільшеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму та підвищеними ударними навантаженнями на підшипники.

Зміна палива в дизельних двигунах, хоча й відповідає екологічним нормам МАРПОЛ, може призвести до кумулятивного підвищення температури згоряння, що негативно впливає на газові системи, збільшує термічні навантаження та викиди оксидів азоту, а також підвищує ризики аварій через динамічні навантаження, температурну напругу та викиди.

Метою цього етапу дослідження стало розробити метод керування фазами впорскування палива в судових дизелях, що використовують низькосірчисте паливо, для забезпечення оптимальних енергетичних та екологічних показників роботи.

Дослідження проводилося на спеціалізованому морському судні класу General Cargo. Як головний двигун на судні був встановлений судовий дизель 7S50ME-B9.3-ТII MAN-Diesel & Turbo:

діаметр циліндра – 0,50 м;
 хід поршня – 2,214 м;
 частота обертання вала – 117 об/хв;
 кількість циліндрів – 7;
 номінальна потужність – 12460 кВт.

Параметри роботи дизеля контролювалися за допомогою суднової системи діагностики з відхиленням не більш $\pm 0,5\%$. Викиди оксидів азоту вимірювалися газоаналізатором Testo з похибкою не більше 0,5%.

Під час досліджень дизель експлуатувався на трьох видах палива: RMG500 (0,46% S), RMK380 (0,48% S) та DMB (0,06% S). Характеристики цих палив наведені в таблиці 5.5. [170, 171].

Таблиця 5.5

Основні характеристики різних сортів палива

Характеристика	RMG500	RMK380	DMB
Вміст вуглецю, %	83,0	83,6	83,6
Вміст водню, %	10,3	10,5	11,4
Вміст сірки, %	0,46	0,48	0,06
Густина за 15 °С, кг/м ³	991	996	892
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	500	380	6
Температура спалаху, °С	88	92	64
Температура самозаймання, °С	216	231	111
Теплотворна здатність, кДж/кг	41056	40953	42444

Перехід судових дизелів на паливо з меншим вмістом сірки призводить до збільшення навантажень і погіршення екологічних показників. Зміну кута випередження впорскування було обрано як метод регулювання фаз подачі палива. Оптимальні значення кута випередження впорскування визначаються заводом-виробником під час стендових випробувань для номінального режиму роботи та палива, характеристики якого найбільш узгоджуються з

сортами палива, на яких в майбутньому працюватиме дизель. Під час експлуатації дизелів судновий екіпаж враховує рекомендації заводу-виробника щодо найбільш оптимального діапазону кутів впорскування палива та в разі необхідності виконує переналаштування паливної апаратури з урахуванням саме цих значень. Відповідно з цим, технологія досліджень передбачала переналаштування системи подачі палива під час знаходження судна в SECA шляхом зміни кутів випередження для окремих циліндрів.

Переналаштування системи подачі палива дизеля 7S50ME-B9.3-ТII MAN-Diesel & Turbo виконувалось в такій спосіб. Відповідно до рекомендацій заводу-виробнику, подачу палива в циліндр дизеля необхідно виконувати в діапазоні $-1...+5^\circ$ кутів повороту колінчатого валу (пкв). Для циліндру № 4 значення куту впорскування палива (для якого відбувалась експлуатація дизеля під час використання палива RMG500) залишилося незмінним і становило $+2^\circ$ пкв.

Для циліндрів №№ 1, 2, 3, 5, 6, 7 встановлювались нові кути випередження подачі палива: $+5, +4, +3, +3, +4, +5^\circ$ пкв відповідно. Встановлення однакових кутів впорскування палива в двох циліндрах (в першому та сьомому, другому та шостому, третьому та п'ятому) застосування данного методу дало змогу розширити масив даних, покращити точність вимірювань та вносити корективи у разі їх відхилення.

Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск горіння p_z , тиск в кінці стиску p_c , середній індикаторний тиск p_i та температура випускних газів t_g . Для кожного з наведених параметрів розраховувалося середнє значення. Наприкінці кожної серії експериментів всі циліндри дизелі переводились на однаковий кут впорскування, після чого виконувалось вимірювання кількості оксидів азоту в випускних газах дизеля. Вимірювання цього показнику виконувалось послідовно для всього діапазону кутів впорскування палива, тобто $+5, +4, +3, +2^\circ$ пкв. Результати експериментів наведені в таблиці 5.6 [172, 173].

Результати досліджень

Показник	Номер циліндру						
	1	2	3	4	5	6	7
Кут впорскування палива, θ , °ПКВ	+5	+4	+3	+2	+3	+4	+5
Тиск в циліндрі наприкінці процесу згоряння, p_z , МПа	14,7	14,65	14,55	14,35	14,45	14,58	14,76
Тиск в циліндрі наприкінці процесу стиснення, p_c , МПа	11,62	11,65	11,52	11,53	11,48	11,6	11,58
Концентрація оксидів азоту в випускних газах, NO_x , г/(кВт·год)	12,35	12,52	12,83	13,38	13,07	12,58	12,22
Температура випускних газів, t_r , °С	397	385	373	367	376	388	403
Ступінь підвищення тиску під час згоряння палива, λ	1,271	1,266	1,258	1,240	1,249	1,260	1,276

Для кращої візуалізації значень (давлення згоряння, тиску стискування, індикаторного тиску та температури випускних газів) побудовано номограми змін роботи дизеля за різних умовах налаштування паливної апаратури (рис. 5.4) [174].

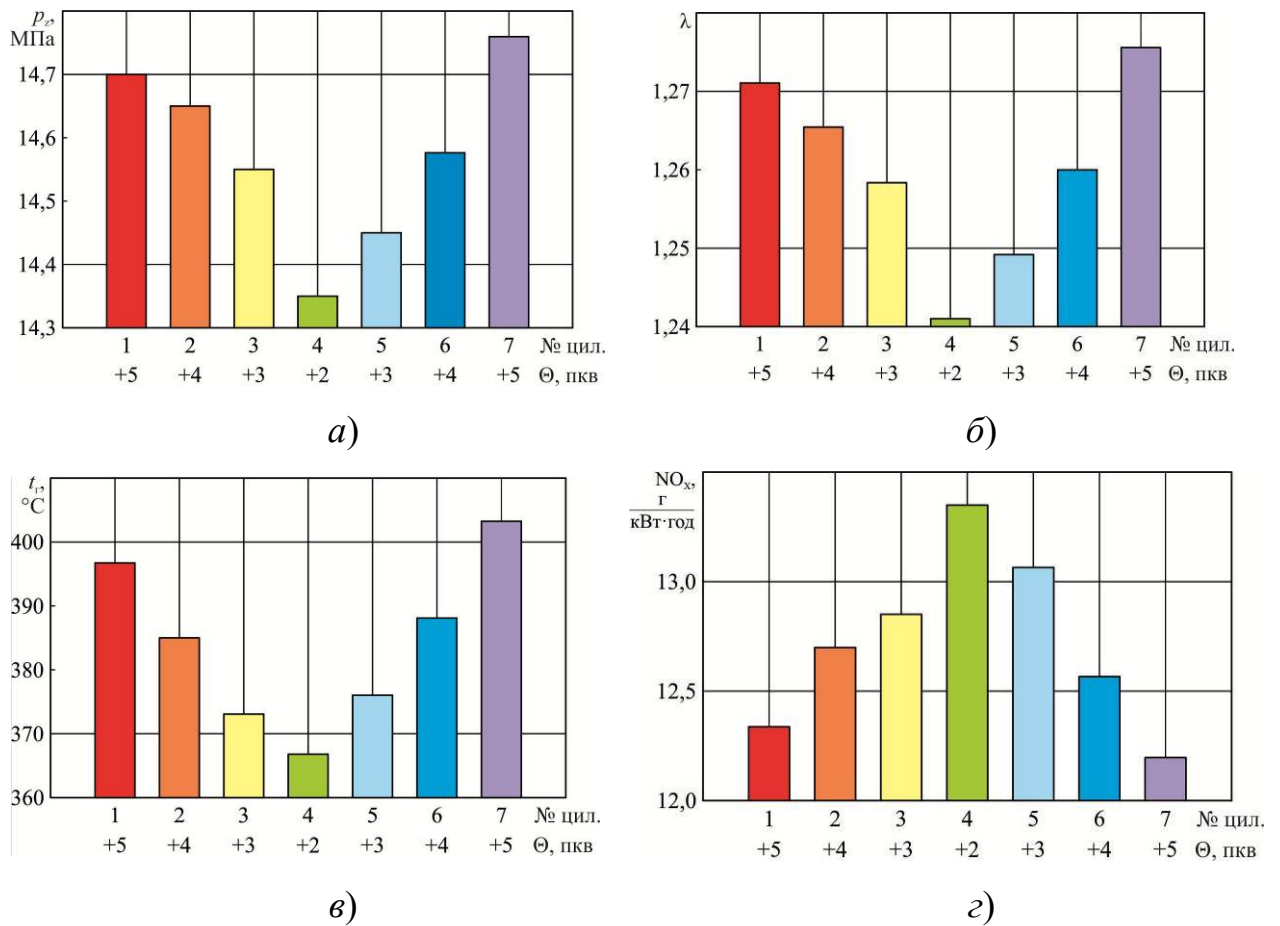


Рис. 5.4. Зміна показників роботи суднового двигуна 7S50ME-B9.3-ТІІ MAN-Diesel & Turbo за різних кутів впорскування палива θ :

a – максимальний тиск під час згорання; *б* – температура випускних газів;
в – ступінь підвищення тиску під час згорання; *з* – концентрація оксидів азоту в випускних газах

Під час досліджень усі контрольовані параметри та концентрація NOx у випускних газах не перевищували допустимих значень, встановлених для дизелів Tier II за Додатку VI МАРПОЛ (14,4 г/(кВт·год)) [175,176].

Екологічні показники, температурна та динамічна стійкість судових дизелів під час їх переведення на паливо з пониженим вмістом сірки визначається за виразами (5.1)-(5.3).

Результати розрахунків наведені в таблиці 5.7 [177].

Таблиця 5.7

Запас стійкості дизеля 7S50ME-B9.3-ТII MAN-Diesel & Turbo

Показник	Кут повороту колінчатого валу, °ПКВ						
	+5	+4	+3	+2	+3	+4	+5
Екологічна стійкість, %	14,24	13,06	10,90	7,08	9,241	12,64	15,15
Температурна стійкість, %	1,49	4,47	7,44	8,93	6,70	3,72	0
Динамічна стійкість, %	0,41	0,75	1,42	2,78	2,10	1,22	0

Для кращої візуалізації отримані результати наведені на рис. 5.5.

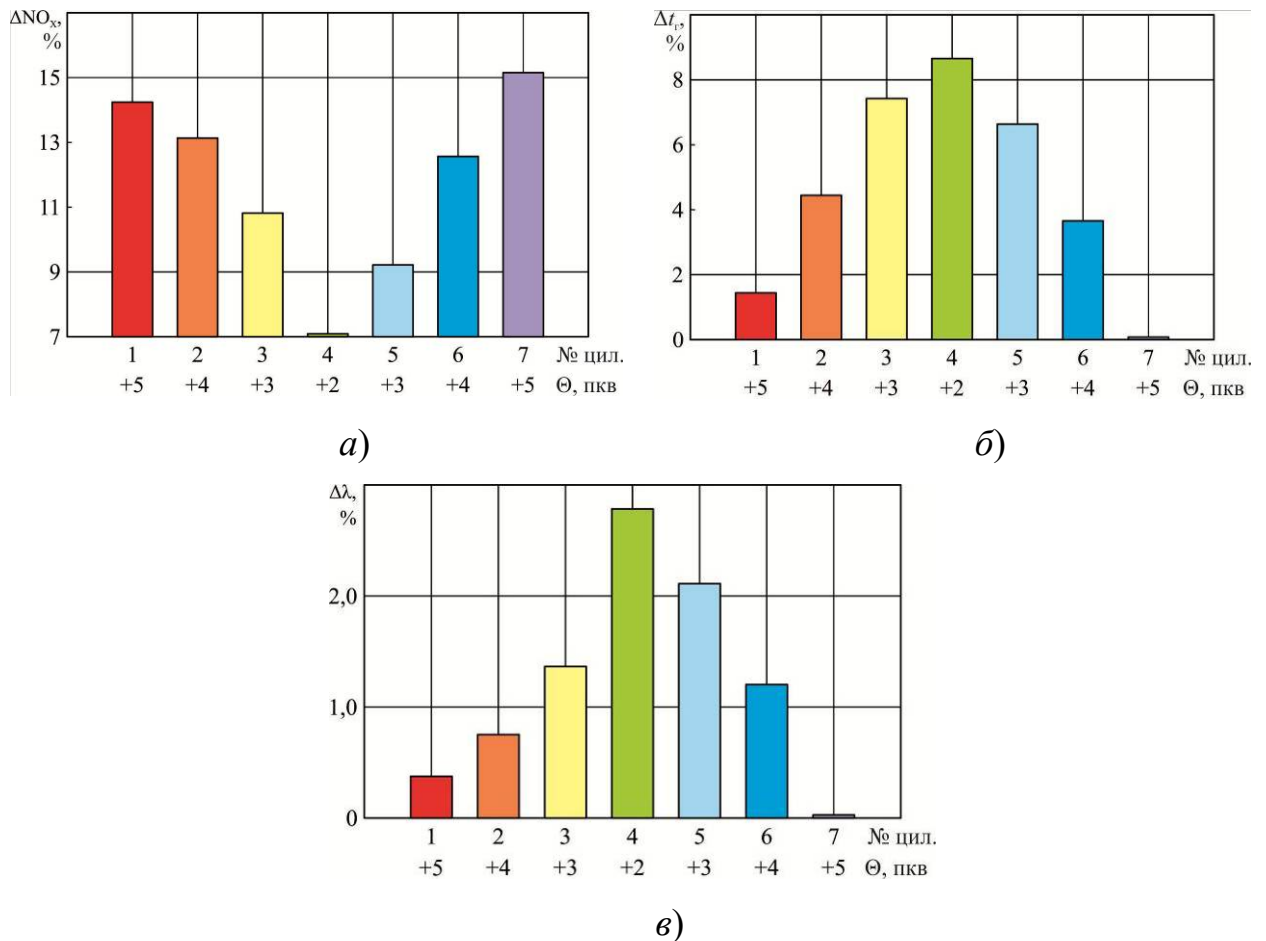


Рис. 5.5. Екологічна (а), теплова (б), динамічна (в) стійкість роботи суднового дизеля 7S50ME-B9.3-ТII MAN-Diesel & Turbo за різних кутів впорскування палива θ

Проведення всіх експериментів було погоджено з технічним відділом судноплавної компанії, яка здійснює менеджмент судна та його енергетичної установки.

Під час проведення експериментів все відбувалось згідно нормам та рекомендованим показникам дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo.

5.3. Висновки за розділом 5

Як результат досліджень, виконаних у розділі 5, визначимо таке.

1. Переведення судових дизелів на експлуатацію з використанням палива з низьким вмістом сірки (необхідність якого виникає під час знаходження морських та річкових суден в екологічних зонах SECAs) підвищує інтенсивність згоряння палива, збільшує навантаження на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму дизеля і негативно впливає на екологічні показники, сприяє при цьому ризику виникнення аварійних ситуацій.

2. Одним із варіантів, що попереджує виникнення подібних негативних явищ, є використання перерегулювання паливної апаратури високого тиску дизеля, зокрема зміни кутів подачі палива.

3. Експерименти, що були виконані на судових дизелях 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo та 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo, під час їх переведення з палива, вміст сірки в якому досягав 0,5 %, на паливо, вміст сірки в якому не перебільшував 0,1 %, підтвердили, що при цьому відбувається зниження тиску згоряння, температури випускних газів, а також знижується емісія оксидів азоту з випускними газами.

4. Ефективність використання технології переналаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення дизелів морських та річкових

суден на використання палива з низьким вмістом сірки може бути оцінена за наступними критеріями:

- екологічна стійкість, яка визначається як відносна різниця поточного та максимального можливого значення емісії оксидів азоту з випускними газами;

- теплова стійкість, яка визначається як відносна різниця поточного значення температури випускних газів відповідної змінним кутам випередження палива та максимальному значенню температури випускних газів, яка відповідає експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки без додаткової зміни кутів випередження палива;

- динамічна стійкість, яка відповідає відносному зменшенню ступеня підвищення тиску під час згоряння палива.

Для суднових дизелів 7S50ME-B9.3-ТІІ MAN-Diesel & Turbo та 8K80ME-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo переналаштування паливної апаратури забезпечує:

- підвищення екологічної стійкості до 10,97...15,15 %;
- підвищення температурної стійкості до 2,54...8,93 %;
- підвищення динамічної стійкості до 2,78...4,82 %.

5. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях палива з низьким вмістом сірки досягається експериментальним визначенням кутів впорскування палива, за якими гарантуються теплова, динамічна та екологічна стійкість роботи суднових дизелів.

6. Практичне значення результатів проведених досліджень полягає у можливості їх використання як у дво, так і чотиритактних дизелях, які мають електронну систему управління впорскуванням палива.

7. Використання розробленого методу особливо актуальне під час знаходження суден в особливих екологічних районах, кількість і межі яких постійно збільшуються та розширюються.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки.

Використання палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %, є обов'язковою складовою під час знаходження морських та річкових суден у спеціальних екологічних районах.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є доведена та практично підтверджена теза, що забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки здійснюється шляхом керованого впливу на процес впорскування палива (а саме зміною кутів випередження подачі палива).

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Необхідність періодичного використання в дизелях морських та річкових суден палива з низьким вмістом сірки (масове значення якого не перебільшує 0,1 %, а для деяких палив знаходиться в діапазоні 0,03...0,05 %) призводить до прогрішення функціональних властивостей паливної апаратури високого тиску. Це перш за все пов'язане зі зменшенням змащувальної здатності палива з низьким вмістом сірки порівняно з іншими видами палива (вміст сірки в яких досягає 0,5 %).

2. Одним зі шляхів забезпечення змащувальних властивостей суднових моторних палив з низьким вмістом сірки є їх додаткова гідродинамічна обробка, яка сприяє підвищенню їх в'язкості в граничному шарі, що безпосередньо поділяє прецизійні пари паливної апаратури високого тиску. При цьому експериментально встановлено, що за таким способом забезпечується зниження механічних втрат у прецизійних парах паливної апаратури високого тиску, що виявляється в зменшенні на 16,4...25,4 % сили тертя в прецизійних парах паливної апаратури високого тиску.

3. Через меншу в'язкість граничного шару палива з низьким вмістом сірки в прецизійних парах паливної апаратури високого тиску виникають додаткові протічки палива, що зменшує його циклову подачу та, відповідно, індикаторні показники роботи дизеля. Підтримання гідравлічної щільності в контактних вузлах паливної апаратури високого тиску досягається шляхом контролю об'ємів палива, яке потрапляє в циліндр дизеля та повертається в систему паливоподачі відсічною магістраллю.

4. Тимчасове переведення суднових дизелів на експлуатацію з використанням палива з низьким вмістом сірки призводить до інтенсифікації процесу згоряння, що виявляється в збільшенні динамічних і теплових навантажень на деталі циліндрової групи та підшипники дизеля. Попередження цього явища можливе за рахунок зміни фаз подачі палива, технологія якої можлива для дизелів з електронною системою управління. При цьому оптимальні фази подачі палива з низьким вмістом сірки відповідають кутам впорскування, за якими забезпечуються максимальні енергетичні (тиск наприкінці стиснення та згоряння) та економічні (питома витрата палива) показники роботи дизелів.

5. Переведення суднових дизелів на експлуатацію з використанням палива з низьким вмістом сірки (необхідність якого виникає під час знаходження морських та річкових суден в екологічних зонах SECAs) підвищує інтенсивність згоряння палива, збільшує навантаження на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму дизеля та негативно впливає на екологічні показники, сприяє при цьому ризику виникнення аварійних ситуацій.

6. Одним з варіантів, що попереджує виникнення подібних негативних явищ, є використання перерегулювання паливної апаратури високого тиску дизеля, зокрема зміни кутів подачі палива.

7. Експерименти, що були виконані на суднових дизелях 7S50ME-B9.3-ТІІ MAN-Diesel & Turbo та 8K80ME-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo під час їх переведення з палива, вміст сірки в якому досягав 0,5 %, на паливо, вміст

сірки в якому не перебільшував 0,1 %, підтвердили, що при цьому відбувається зниження тиску згорання, температури випускних газів, а також знижується емісія оксидів азоту з випускними газами.

8. Ефективність використання технології переналаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення дизелів морських та річкових суден на використання палива з низьким вмістом сірки може бути оцінена у наступними критеріями:

- екологічна стійкість, яка визначається як відносна різниця поточного та максимально можливого значення емісії оксидів азоту з випускними газами;

- теплова стійкість, яка визначається як відносна різниця поточного значення температури випускних газів відповідної змінним кутам випередження палива та максимальному значенню температури випускних газів, яка відповідає експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки без додаткової зміни кутів випередження палива;

- динамічна стійкість, яка відповідає відносному зменшенню ступеня підвищення тиску під час згорання палива.

Для суднових дизелів 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo та 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo переналаштування паливної апаратури забезпечує:

- підвищення екологічної стійкості до 10,97...15,15 %;
- підвищення температурної стійкості до 2,54...8,93 %;
- підвищення динамічної стійкості до 2,78...4,82 %.

9. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях палива з низьким вмістом сірки досягається експериментальним визначенням кутів впорскування палива, за якими гарантуються теплова, динамічна та екологічна стійкість роботи суднових дизелів

10. Практичне значення результатів проведених досліджень полягає у можливості їх використання як у двох, так і чотиритактних дизелях, які мають електронну систему управління упорскуванням палива.

11. Використання розробленого методу особливо актуальне під час знаходження суден в особливих екологічних районах, кількість і межі яких постійно збільшуються та розширюються.

12 Наведені результати дозволяють сформулювати таке наукове положення. Забезпечення експлуатаційних показників суднових дизелів під час використання палива з низьким вмістом сірки досягається керованим впливом на процес впорскування, що гарантує підтримання їх екологічної, теплової та динамічної стійкості.

Наукові результати, що отримані в дисертаційному дослідженні, теоретично обґрунтовані та підтверджені під час проведення експериментів у системах паливоподачі суднових дизелів, що використовуються на морських судах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sagin S.V. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport / S.V. Sagin, S.S. Sagin, O. Fomin, O. Gaichenia, Y. Zablotskyi, V. Pířtěk, P. Kuřcera // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
2. Білоусов Є.В. Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індиціювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних / Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, М.С. Рибальченко, В.П. Савчук, Г.Я. Тулущенко // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2022. – № 1. – С. 51-59. doi. : 10.20998/0419-8719.2022.1.07.
3. Варбанець Р.А. Деякі аспекти застосування системи DEPAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання / Р.А. Варбанець, В.І. Залож, Т.В. Тарасенко, В.І. Кирнац, В.Г. Клименко, Н.І. Александровська // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2021. – № 2. – С. 60-67. doi. : 10.20998/0419-8719.2021.2.08
4. Богданов М.С. Підвищення енергетичної ефективності морського судна в різних кліматичних умовах експлуатації трансформацією скидної теплоти / М.С. Богданов, В.А. Голіков // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. – 2020. – Вип. 41. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 167-176.
5. Кузнецов В. Моніторинг технічного стану суднових малообертових дизелів / В. Кузнецов // *Вісник Одеського національного морського університету*. – 2020. – № 60. – С. 86-92. <https://doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-86-92>.
6. Sagin S. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels / S. Sagin, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, O. Fomin, P. Kuřcera // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>

7. Грицук І.В. Особливості визначення витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів транспортних засобів, що працюють на газовому паливі / І.В. Грицук, Д.С. Погорлецький, Д.С. Адров, А.В. Білай // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 1. – С. 25-35. doi : 10.20998/0419-8719.2021.1.04.

8. Sagin S. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines / S. Sagin, S. Karianskyi, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, I. Tkachenko // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

9. Sagin S.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters / S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk, Yu.V. Zablotskyi, O.V. Gaichenia // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. doi : 10.17818/NM/2022/1.7.

10. Руснак Д.Ю. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив / Д.Ю. Руснак, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 49-54. doi : 10.31653/smf340.2020.49-54.

11. Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згоряння і навколишнє середовище / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, О.П. Строков // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – № 2. – С. 3-12. doi. : 10.20998/0419-8719.2022.2.01.

12. Побережний Р.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту / Р.В. Побережний, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

13. Кузнецов В. Діагностика технічного стану малооборотних двигунів / В. Кузнецов // Вісник Одеського національного морського університету. – 2020. – № 59. – С. 127-134. <https://doi.org/10.33082/2226-1915-2-2019-127-134>.

14. Wärtsilä RTA58T – Maintenance Manual https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/08/mm-rta58t_2008-10.pdf.

15. Engine MAN B&W S65ME-C8.2-GI-TII Project Maintenance Manual. <https://www.manualslib.com/manual/1554708/Man-BAndw-S65me-C8-2-Gi-Tii.html> (дата звернення – 15.02.2024 р.).
16. Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в судових дизелях / Т.О. Столярик // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.
- 17 Кривий М.О. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання судових дизелів / М.О. Кривий, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 18 - 24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24
18. Sagin S. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels / S. Sagin, V. Madey, T. Stoliaryk // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2(61)). – P. 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
19. Van T.G. Global impact of recent IMO regulation on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T.G. Van, J. Ramirez, Z. Ristovskim, R.J. Brown // Transp. Res. Part D Transp. Environ. – 2019. – № 70. – P. 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>.
20. Сагін А.С. Зниження втрат енергії під час експлуатації паливної апаратури високого тиску судових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» , 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 163-165.
21. Бондар С.А. Забезпечення вимог системи технічного обслуговування двигунів морських та річкових суден / С.А. Бондар // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 року. – Херсон : ХДМА. –2023. – С. 173-176.

22. Zablotskyi Yu.V. Applying of fuel additives in marine diesel engines / Yu.V. Zablotskyi, A.S. Sagin // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-17. doi: 10.31653/smf343.2021.5-17.

23. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids / S.V. Sagin // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna – 2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.

24. Varbanets R. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters / R. Varbanets, O. Fomin, V. Píštěk, V. Klymenko, D. Minchev, A. Khrulev, V. Zalozh, P. Kučera // J. Mar. Sci. Eng. 2021. – № 9. – P. 321. <https://doi.org/10.3390/jmse9030321>.

25. Сагін С.В. Вдосконалення процесу підготовки суднових важких палив / С.В. Сагін, Д.Ю. Руснак // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 157-159.

26. Shen F. Effects of fuel types and fuel sulfur content on the characteristics of particulate emissions in marine low-speed diesel engine / F. Shen, X. Li // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27(30). – P. 37229-37236.

27. Дакі О.А. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах / О.А. Дакі, Л.Л. Пліта, І.В. Трофименко, В.М. Федунов // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.

28. Тимошук О.М. Дослідження безпеки бункерування на водному транспорті / О.М. Тимошук, О.В. Мельник // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.

29. Зверьков Д.О. Зниження механічних втрат у судових дизелях / Д.О. Зверьков, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА».– С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

30. Мадей В.В. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо / В.В. Мадей, О.М. Волков // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

31. Мадей В.В. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких ходить паливо біологічного походження / В.В. Мадей, С.В. Сагін, О.М. Волков // Водний транспорт – 2024. – № 1 (39).– С. 193-205. doi : 10.33298/2226-8553.2024.1.39.20

32. Шевченко А.П. Моделювання процесів подавання водно-паливних емульсій у судових дизельних двигунах / А.П. Шевченко, В.В. Штрибець, О.В. Маннапова, О.І. Рященко // Водний транспорт. – 2024. – №1(39). – С. 137-144. doi : 10.33298/2226-8553.2024.1.39.13.

33. Гунченко В.Ю. Удосконалення системи очищення випускних газів судових дизелів / В.Ю. Гунченко, В.Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 82-87. DOI : 10.31653/smf341.2020.82-87.

34. Марченко О.О. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив / О.О. Марченко, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10-14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.

35. Sagin S.V. Comparative assessment of marine diesel engine oils / S.V. Sagin, T.O. Stoliaryk // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2021. – Vol. 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

36. Сагін А.С. Зниження втрат енергії під час експлуатації паливної апаратури високого тиску суднових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // *Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування»*, 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 163-165.

37. Vedachalam S. Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options / S. Vedachalam, N. Baquerizo, A.K. Dalai // *Fuel*. – 2022. – Vol. 310. – P. 122243

38. Wang O. A review of low and zero carbon fuel technologies: Achieving ship carbon reduction targets / O. Wang, P. Yang // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2022. – Vol. 54. – P. 102762.

39. Alam M. Combustion and emissions performance of low sulfur, ultra low sulfur and biodiesel blends in a DI diesel engine / M. Alam, J. Song, R. Acharya, A. Boehman, K. Miller // *SAE transactions*. – 2004. – P. 1986 – 1997.

40. Kim H.A study on the necessity of integrated evaluation of alternative marine fuels / K. Hyungju, K. Kwi, J. Tae-Hwan // *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*. – 2020. – Vol. 4. – P. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1779426>.

41. Melnyk O. Implementation Research of Alternative Fuels and Technologies in Maritime Transport / O. Melnyk, S. Onyshchenko, O. Onishchenko, O. Shumylo, A. Voloshyn, V. Ocheretna, O. Fedorenko // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2024. – Vol. 510. – P. 13-21. – DOI: [10.1007/978-3-031-44351-0_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_2).

42. Бганцев В.М. Наукові принципи підвищення ефективних показників дизелів при використанні біопалив / В.М. Бганцев // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2021. – № 1. – С. 15-25. DOI : [10.20998/0419-8719.2021.1.03](https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.1.03).

43. 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>.

44. Jiang X. Diesel engine condition monitoring based on oil analysis / X. Jiang, J. Wang, Y. Zong // *Int. Conf. Remote Sens. Environ. Transp. Eng.* – 2011. – № 1. – P. 12374941. <https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5965188>.

45. Ерыганов А.В. Улучшение экологических характеристик двухтактного дизеля во время эксплуатации / А.В. Ерыганов, В.И. Кырнац, Р.О. Брусник, В.С. Глебов, П.А. Гончаренко, В.И. Холденко // *Двигуни внутрішнього згоряння.* – 2022. – № 2. – С. 51-55. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.09.

46. Sagin S. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels / S. Sagin, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, O. Fomin, P. Kučera // *Journal Marine Science and Engineering.* – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

47. Ma D. Ship's response to low-sulfur regulations: From the perspective of route, speed and refueling strategy / D. Ma, W. Ma, S. Jin, F. Qu // *Computers & Industrial Engineering.* – 2021. – Vol. 155. – P. 107140.

48. Левтеров А.М. Влияние на показатели поршневых двигателей биокомпонентов и наноматериалов различного типа / А.М. Левтеров, А.А. Левтеров // *Двигуни внутрішнього згоряння.* – 2021. – № 2. – С. 12-23. DOI : 10.20998/0419-8719.2021.2.02.

49. Ershov M.A. Technological potential analysis and vacant technology forecasting in properties and composition of low-sulfur marine fuel oil (VLSFO and ULSFO) bunkered in key world ports / M.A. Ershov, V.D. Savelenko, A.E. Makhmudova, E.S. Rekhletskaaya, U.A. Makhova, V.M. Kapustin, T.M. Abdellatief // *Journal of Marine Science and Engineering.* – 2022. – Vol. 10(12). – P. 1828.

50. Sagin S. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships / S Sagin, O. Kuropyatnyk, I. Tkachenko // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник.* – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi : 10.31653/smf45.2022.5-16.

51. IMO SOLAS 2020 Consolidated Edition. – IMO. – 2020. – 574 с.

52. Побережний Р.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту / Р.В. Побережний, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-9. doi : 10.31653/smf340.2020.5-9.

53. Kuropyatnyk O.A. Ensuring efficiency and environmental of marine diesel engines which using exhaust gas bypass system / O.A. Kuropyatnyk, S.V. Sagin // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 25-40. doi : 10.31653/smf43.2021.25-40.

54. Тимощук О.М. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі / О.М. Тимощук, М.В. Боріна // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.

55. Pei-Chi W. Strategies for the low sulfur policy of IMO—an example of a container vessel sailing through a European route / W. Pei-Chi, L. Cherng-Yuan // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021.– Vol. 9(12). – P. 1383.

56. Парсаданов І.В. Урахування шкідливої дії діоксину вуглецю при комплексній оцінці витрати палива і токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів / І.В. Парсаданов, І.В. Рикова // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – № 1. – С. 35-40. DOI : 10.20998/0419-8719.2022.1.05.

57. Bilgili L. A systematic review on the acceptance of alternative marine fuels / L. Bilgili // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 182. – P. 113367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113367>

58. Mehrnaz A. Toward a harmonization of sustainability criteria for alternative marine fuels / A. Mehrnaz, L. Jane, G. David // Maritime Transport Research. – 2022. – Vol. 3. – P. 100052. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100052>.

59. Мадей В.В. Використання альтернативного палива в суднових середньооберткових дизелях / В.В. Мадей // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 45-53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.

60. Madey V.V. Usage of biodiesel in marine diesel engines / V.V. Madey // 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>.

61. Onyshchenko S. Probabilistic Assessment Method of Hydrometeorological Conditions and their Impact on the Efficiency of Ship Operation / S. Onyshchenko, O. Melnyk // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2021. – Vol. 14(6). – P. 132-136. doi.org/10.25103/jestr.146.15

62. Половинка Е.М. Вплив гідродинамічної обробки на характеристики водомасляної емульсії / Е.М. Половинка, Р.А. Орещенко, О.А. Орешин // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022. – Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 86-87.

63. Polovinka E.M. Fuel injection characteristics of 50 rt-flex diesel engine / E.M. Polovinka, I.N. Tabulinsky // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022. – Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 84-85.

64. Мельник О. Технології та перспективи альтернативних видів палива для морських суден / О. Мельник, Д. Бурлаченко, О. Пастернак, О. Чеча, П. Никитюк // Grail of Science. – 2023 – Вип. 25. – С. 215-220. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.03.2023.034>

65. Nelson R.K. Characterizations and comparison of low sulfur fuel oils compliant with 2020 global sulfur cap regulation for international shipping / R.K. Nelson, A.G. Scarlett, M.M. Gagnon, A.I. Holman, C.M. Reddy, P.A. Sutton, K. Grice // Marine Pollution Bulletin.– 2022. – Vol. 180. – P. 113791.

66. Pei-Chi W/ Cost-benefit evaluation on promising strategies in compliance with low sulfur policy of IMO / W. Pei-Chi, L. Cherng-Yuan // Journal of Marine Science and Engineering. – 2020.– Vol. 1(3). – P. 9.

67. Сагін С.В. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі / С.В. Сагін, В.В. Мадей, А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних

засобів : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. doi: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

68. Заблоцький Ю. В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеського Національного Морського Університету. – 2020. – №1(62). – С. 106-119.

69. Fomin O. Substantiation of Improvements for the Bearing Structure of an Open Car to Provide a Higher Security during Rail Sea Transportation / O. Fomin, A. Lovska, P. Kučera, V. Píštěk // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9(8). – P. 873. <https://doi.org/10.3390/jmse9080873>.

70. Sagin S. Comparative assessment of marine diesel engine oils / S.V. Sagin, T.O. Stoliaryk // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>

71. Zablotskyi Yu.V. Applying of fuel additives in marine diesel engines / Yu.V. Zablotskyi, A.S. Sagin // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-17. doi : 10.31653/smf43.2021.5-17.

72. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”. Birmingham, United Kingdom. – January 16, 2020. – Part 4. – P. 195-202. doi.. 10.34660/INF.2020.4.52991.

73. Сагін С.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту / С.В. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

74. Sagin S. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines / S. Sagin, S. Karianskyi, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, I. Tkachenko // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

75. Сагін С.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту / С.В. Сагін, Р.В. Побережний // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 110-117. doi: 10.31653/smf46.2023.110-117.

76. Сагін С.В. Вдосконалення процесу підготовки суднових важких палив / С.В. Сагін, Д.Ю. Руснак // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» , 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 157-159.

77. Голіков В.А. Експериментальне визначення показників енергетичної ефективності роботи контейнеровоза класу DNV-GL (13800 TEU) / В.А. Голіков, К.С. Данілов, К.О. Сінюта // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – Вип. 46. – Одеса: НУ «ОМА». – 2023. – С. 41-46. Doi : 10.31653/smf46.2023. 41-46.

78. Kondratenko O.M. Accounting emissions of engine fuel vapors in the criteria-based of the ecological safety level of power plants with reciprocating ice exploitation process / O.M. Kondratenko, V.A. Andronov, T.R. Polishchuk, N.D. Kasionkina, V.A. Krasnov // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – № 1. – С. 40-50. DOI : 10.20998/0419-8719.2022.1.06.

79. Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 ‘Global Sulphur Cap’ for Ships’ Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI. – London: Marisec Publications, 2019. – 36 p.

80. Мельник О.М. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії / О.М. Мельник, О.А. Онищенко, Д.Г. Парменова // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

81. Serrano J.R. Why the Development of Internal Combustion Engines Is Still Necessary to Fight against Global Climate Change from the Perspective of

Transportation / J.R. Serrano, R. Novella, P. Piqueras // Appl. Sci. – 2019. – № 9(12). – P. 4597. <https://doi.org/10.3390/app9214597>.

82. Умеренкова К.Р. Перспективи використання альтернативних палив і методика визначення їх теплофізичних характеристик: монографія / К.Р. Умеренкова, В.Г. Борисенко // Харків : Нац. ун-т цивільного захисту України, 2022. – 92 с.

83. Serrano J.R. Why the Development of Internal Combustion Engines Is Still Necessary to Fight against Global Climate Change from the Perspective of Transportation / J.R. Serrano, R. Novella, P. Piqueras // Appl. Sci. – 2019. – № 9(21). – P. 4597. <https://doi.org/10.3390/app9214597>.

84. Minchev D. Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications / D. Minchev, R. Varbanets, O. Shumylo, V. Zalozh, N Aleksandrovska, P. Bratchenko, T. Truong // Polish Maritime Research. – 2023. – №4(120). – Vol. 30. – P. 81-91. DOI : 10.2478/pomr-2023-0061.

85. Van T.G. Global impact of recent IMO regulation on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T.G. Van, J. Ramirez, Z. Ristovskim, R.J. Brown // Transportation Research Part D: Transport and Environment – Vol. 70– P. 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>.

86. Парсаданов І.В. Урахування шкідливої дії діоксину вуглецю при комплексній оцінці витрати палива і токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів / І.В. Парсаданов, І.В. Рикова // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – № 1. – С. 35-40. DOI : 10.20998/0419-8719.2022.1.05.

87. Van T.C. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T.C. Van, J. Ramirez, T. Rainey, Z. Ristovski, R.J. Brown // Transportation Research Part D : Transport and Environment. – 2019. – Vol. 70. – P. 123-134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001.

88. Сагін С.В. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту / С.В. Сагін, В.В. Мадей, С.С. Сагін, В.І. Чимшир, Р.О. Разінкін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. –

2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 157-171. doi: 10.31653/smf47.2023.157-171.

89. Тимощук О.М. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі / О.М. Тимощук, М.В. Боріна // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.

90. Barbosa S.L. Environmentally Friendly New Catalyst Using Waste Alkaline Solution from Aluminum Production for the Synthesis of Biodiesel in Aqueous Medium / S.L. Barbosa, D.L. Nelson, L. Paconio, M. Pedro, W.T.P. dos Santos, A.P. Wentz, F.L.P. Pessoa, F.A. Agblevor, D.A. Bortoleto, M.B. de Freitas-Marques // Bioengineering. – 2023. – Vol. 10. – P. 692. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10060692>.

91. Солодовніков В.Г. Використання ультразвукової обробки в модульних схемах побудови судових систем паливопідготовки / В.Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 158-168.

92. Zaky A.S. Introducing a Marine Biorefinery System for the Integrated Production of Biofuels, High-Value-Chemicals, and Co-Products: A Path Forward to a Sustainable Future / A.S. Zaky // Processes. – 2021. – Vol. 9. – P. 1841. <https://doi.org/10.3390/pr9101841>

93. Marchenko A. Research of energy effectiveness and exhaust emissions of direct injection diesel engine running on RME and its blends with DO / A. Marchenko, I. Parsadanov, A. Prokhorenko at al. // Proceedings of the 12th International Conference Transport Means. – 2008. – P. 312-319.

94. Dhyani V. Control of backfire and NO_x emission reduction in a hydrogen fueled multi-cylinder spark ignition engine using cooled EGR and water injection strategies / V. Dhyani, K.A. Subramanian // International journal of hydrogen energy. – 2019. – Vol. 44.(12) –P. 6287-6298. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.129>.

95. Javed F. Intensification of Biodiesel Processing from Waste Cooking Oil, Exploiting Cooperative Microbubble and Bifunctional Metallic Heterogeneous Catalysis / F. Javed, M. Rizwan, M. Asif, S. Ali, R. Aslam, M.S. Akram, W.B. Zimmerman, F. Rehman // *Bioengineering*. – 2022. – Vol. 9. – P. 533. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100533>.

96. Zhu Z. Purification Technologies for NO_x Removal from Flue Gas: A Review / Z. Zhu, B. Xu // *Separations*. – 2022. – Vol. 9. – P. 307. <https://doi.org/10.3390/separations9100307>.

97. Puškár M. Marine Ancillary Diesel Engine Emissions Reduction Using Advanced Fuels / M. Puškár, P. Tarbajovský, M. Lavčák, M. Šoltésová // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022 – Vol. 10. – P. 1895. <https://doi.org/10.3390/jmse10121895>.

98. Jiang Y. Supercritical CO₂ Power Cycle and Ejector Refrigeration Cycle for Marine Dual Fuel Engine Efficiency Enhancement by Utilizing Exhaust Gas and Charge Air Heat / Y. Jiang, Z. Wang, Y. Ma, Y. Ji, W. Cai, F. J. Han // *Mar. Sci. Eng.* – 2022. – Vol. 10. – P. 1404. <https://doi.org/10.3390/jmse10101404>.

99. Куropyatnyk O.A. Ensuring efficiency and environmental of marine diesel engines which using exhaust gas bypass system / O.A. Куropyatnyk, S.V. Sagin // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 25- 40. doi: 10.31653/smf343.2021.25-40

100. Сагін С.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту / С.В. Сагін, Р.В. Побережний // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.

101. Голіков В.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голіков, М.А. Козьмініх, О.А. Онищенко. – Одеса : ОНМА, 2014. – 164 с.

102. Панкратова Н.Д. Системний аналіз. Теорія та застосування : підручник / Н.Д. Панкратова. – Київ : Наук. думка, 2018. – 347 с.
103. Коваленко І.І. Вступ до системного аналізу : навчальний посібник / І.І. Коваленко, П.І. Бідюк, О.П. Гожий. – Миколаїв : МДГУ ім. П.Могили, 2004. – 148 с.
104. Катренко А.В. Системний аналіз : підручник / А.В. Катренко. – Львів : Новий Світ -2000, 2011. – 396 с.
105. Чорней Н.Б. Теорія систем і системний аналіз : навчальний посібник / Н.Б. Чорней. – Київ : МАУП, 2005. – 256 с.
106. Половинка Е.М. Застосування комбінованих вимірювальних перетворювачів для контролю топливopодачі суднових дизелів / Е.М. Половинка, А.Ю. Яковенко // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022. – Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 88-90.
107. Сагін А.С. Розробка методу управління процесом паливopодачі під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Збірник матеріалів ІV міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р. – Київ : Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2023. – С. 82-86.
108. Сагін А.С. Особливості подачі палива в циліндр дизеля під час використання палив з різним вмістом сірки / А.С. Сагін // 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>.
109. Варбанець Р.А. Розширені методи діагностики для суднових дизельних двигунів : досягнення відповідності ІМО щодо декарбонізації / Р.А. Варбанець, Д.С. Мінчев, І.В. Савельєва, А.А. Родіонов, Т.М. Мазур, С.П. Псарюк, В.В. Бондаренко // Двигуни внутрішнього згорання. – 2023. – № 2. – С. 26-36. doi : 10.20998/0419-8719.2023.2.04.

110. Varbanets R. Enhanced diagnostic techniques marine diesel engines achieving IMO decarbonization compliance / R. Varbanets, D. Minchev, I. Savelieva, A. Rodionov, T. Mazur, S. Psariuk, V. Bondarenko // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – Вип.2. – С. 26-36. DOI: 10.20998/0419-8719.2023.2.04

111. Сагін А.С. Особливості налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на використання палива з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2024 – 21.03.2024.– Одеса: НУ «ОМА», 2024. – С. 72-75.

112. Марченко А.П. Визначення комплексного паливно-екологічного критерія для дизеля при роботі на водотопливній емульсії / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, А.В. Савченко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 2. – С. 31-37. DOI : 10.20998/0419-8719.2021.2.04.

113. Wang Q. Establishment of a Real-Time Simulation of a Marine High-Pressure Common Rail System / Q. Wang, H. Yao, Y. Yu, J. Yang, Y. He // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 5481. [https:// doi.org/10.3390/en14175481](https://doi.org/10.3390/en14175481).

114. Солодовніков В.Г. Забезпечення технічного стану суднових дизелів шляхом кавітаційної обробки палива / В.Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 65-69. DOI : 10.31653/smf340.2020.88-94.

115. Bayraktar M. An evaluation of methanol engine utilization regarding economic and upcoming regulatory requirements for a container ship / M. Bayraktar, O. Yuksel, M. Pamik // Sustainable Production and Consumption. – 2023.– Vol. 39.– P. 345–356. doi: 10.1016/j.spc.2023.05.029.

116. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок / Ю.В. Заблоцький // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 106-119. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.

117. Мадей В.В. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження / В.В. Мадей, С.В. Сагін, О.М. Волков // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

118. Drazdauskas M. Optimization of Combustion Cycle Energy Efficiency and Exhaust Gas Emissions of Marine Dual-Fuel Engine by Intensifying Ammonia Injection / M. Drazdauskas, S. Lebedevas // J. Mar. Sci. Eng.– 2024– Vol. 12.– P.309. doi: 10.3390/jmse12020309.

119. Сагін С.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту / С.В. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

120. Lan Q. Investigation on fuel injection quantity of low-speed diesel engine fuel system based on response surface prediction model / Q. Lan, Y. Bai, L. Fan, Y. Gu, L. Wen, L. Yang // Energy. – 2020. – Vol. 211.– P. 118946. doi: 10.1016/j.energy.2020.118946.

121. Bayraktar M. A scenario-based assessment of the energy efficiency existing ship index (EEXI) and carbon intensity indicator (CII) regulations / M. Bayraktar, O. Yuksel, M. Pamik // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 39.– P. 114295. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.029>.

122. Cameretti M. Numerical Analysis of Dual Fuel Combustion in a Medium Speed Marine Engine Supplied with Methane/Hydrogen Blends / M. Cameretti, R. De Robbio, M. Palomba // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 6651. doi: 10.3390/en16186651.

123. Binyamin B. Numerical Analysis of the Structural and Flow Rate Characteristics of the Fuel Injection Pump in a Marine Diesel Engine. Sustainability / B. Binyamin, O. Lim // Energy. – 2023– Vol. 15. – P. 8948. doi : <https://doi.org/10.3390/ su15118948>.

124. Lebedevas S. The Application of Cryogenic Carbon Capture Technology on the Dual-Fuel Ship through the Utilisation of LNG Cold Potential / S. Lebedevas, A. Malūkas // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2024. – Vol. 12. – P.217. doi: 10.3390/jmse12020217.

125. Polemis D. Assessing the Sustainability of the Most Prominent Type of Marine Diesel Engines under the Implementation of the EEXI and CII Regulations / D. Polemis, M. Boviatsis, S.Chatzinikolaou // *Clean Technologies.* – 2023. – Vol. 5. – P. 1044-1066. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5030053>

126. Deng J. A review of NOx and SOx emission reduction technologies for marine Diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels / J. Deng, X. Wang, Z. Wei, L. Wang, C. Wang, Z. Chen // *Sci. Total Environ.*– 2021. – Vol. 76. – P. 144319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144319>

127. Gray J. Review of Additive Manufacturing for Internal Combustion Engine Components / J. Gray, C. Depcik // *SAE Int. J. Engines.* – 2022. – Vol. 13. – P. 617-632. <https://doi.org/10.4271/03-13-05-0039>.

128. Li C. Study on the Simplified Chemical Kinetic Combustion Mechanism of Mixed Methanol/PODE Fuel for Marine Diesel Engines / C. Li, Y. Hu, H. Guo // *Processes.*– 2024.– Vol. 12.– P.594. doi: 10.3390/pr12030594.

129. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43.* – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 5-17. doi: 10.31653/smf343.2021.5-17.

130. Sagin S.V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors / S.V. Sagin, O.V. Semenov // *American Journal of Applied Sciences* – 2016. – № 13(2). – P. 200–208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208.

131. Zhuravlov Yu.I. Investigation of patterns of wear of surfaces of connection "shaft-sliding bearing" / Yu.I. Zhuravlov, A.A. Melnik, Ye.F. Kostyuchenko // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник.* – 2021. – Вип. 42. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 35-41. doi : 10.31653/smf42.2021.35-41.

132. Kozytskyi S.V. Self-organization of nano-sized metal-containing lubricant additives / S.V. Kozytskyi, S.V. Kiriian // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 20-27. doi : 10.31653/smf44.2022.20-27.

133. Орлов Е.В. Сдвиговая вязкость суспензий твердых сферических частиц / Е.В. Орлов // Фізика аеродисперсних систем. – 2020. – № 58. – С.51-59. DOI: <http://dx.doi.org/10.18524/0367-1631.2020.58.206192>.

134. Ратайчук О.В. Підвищення ефективності процесу наддува суднових дизелів / О.В. Ратайчук, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

135. Сагін С.В. Визначення розподілу тиску в шарі неньютонівських мастил у суднових енергетичних установках / С.В. Сагін, М.О. Кривий // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 160-170. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-160-170.

136. М'ягкий М.М. Вдосконалення процесу очищення вод, що містять нафту / М.М. М'ягкий, І.І. Ткаченко // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 26-29. DOI : 10.31653/smf341.2020.26-29

137. Заблоцький Ю.В. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів / Ю.В. Заблоцький, А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

138. Сагін А.С. Оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів / А.С. Сагін // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4-5 листопада 2021 р. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 266-269.

139. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості судових дизелів за рахунок використання присадок до палива / Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 76-87.

140. Новохацкий И.А. Метод количественной оценки влияния приповерхностных слоев на вязкое течение полярных молекулярных жидкостей в оксидных капиллярах / И.А. Новохацкий, И.В. Ярошенко, В.П. Шендрик // Труды Одесского политехнического университета. – 2006. – Вып. 1(25). – С. 222-224.

141. Козицький С.В. Властивості наноструктурованих матеріалів / С.В. Козицький, С.В. Кіріян // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 123-133. doi : 10.31653/smf45.2022.123-133.

142. Сагін А.С. Оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення судових дизелів // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4-5 листопада 2021 р. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 266-269.

143. Козицький С.В. Застосування наночастинок для збільшення ефективності судових механізмів / С.В. Козицький, С.В. Кіріян // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 53-66. doi : 10.31653/smf46.2023.55-56.

144. Сагін А.С. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації судових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

145. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів / С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-142.

146. Сагін А.С. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 17-30. doi : 10.31653/smf45.2022.17-30.

147. Половинка Є.М. Статичні характеристики паливоподачі судового середньо обертового дизеля / Є.М. Половинка // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 169.

148. Сагін А.С. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

149. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий / С.В. Сагин // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

150. Сагін А.С. Підвищення ефективності роботи паливної апаратури високого тиску дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 – 23.03.2023.– Одеса: НУ «ОМА», 2023. – С. 83-86.

151. Варбанець Р.А. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Р.А. Варбанець, В.І. Залож, Т.В. Тарасенко, Ю. М. Кучеренко, В. Г. Клименко // Двигуни внутрішнього згорання. – 2020. – Вип. 1. – С. 13-21. doi: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02>

152. Сагін С.В. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками / С.В. Сагін, Т.О. Столярик // Автоматизація суднових технічних засобів : науково-технічний збірник. –

2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108-119. doi: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

153. Сагін С.В. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі / С.В. Сагін, В.В. Мадей, А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. doi: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

154. Gorb S. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor / S. Gorb, M. Levinskyi, M. Budurov // Sci. Horiz. – 2021. – № 24. – P. 9–19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

155. Minchev D.S. Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues / Minchev D.S., R.A. Varbanets, N.I. Alexandrovskaya, L.V. Pisintsaly // Acta Polytechnica. – 2021. – № 61(3). – P. 428–440. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0428>.

156. Сагін С.В. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі / С.В. Сагін, В.В. Мадей, А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

157. Sagin S. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, A. Sagin, I. Tkachenko, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

158. Sagin S. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels / S. Sagin, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, O. Fomin, P. Kučera // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

159. Sagin S. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines / S. Sagin, S. Karianskyi, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, I. Tkachenko // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

160. Сагін А.С. Забезпечення процесу впорскування палива з наднизьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 р. – Херсон : ХДМА. –2023. – С. 254-257.

161. Мельник О.М. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії / О.М. Мельник, О.А. Онищенко, Д.Г. Парменова // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

162. Сагін А.С. Забезпечення енергетичної ефективності суден відповідно новітнім вимогам Додатку VI МАРПОЛ / А.С. Сагін // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022.– Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 66-68.

163. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення судових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

164. Сагін С.В. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту / С.В. Сагін, А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

165. Sagin S. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines / S. Sagin, A. Sagin // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5(1 (73)). – P. 37-43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

166. Sagin A.S. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels / A.S. Sagin, Yu.V. Zablotskyi // 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>.

167. Сагін А.С. Обеспечение надежности топливной аппаратуры транспортных дизелей / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцкий // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 95-96.

168. Сагін С.В. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації судових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів / С.В. Сагін, С.А. Бондар // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 101-109. doi : 10.31653/smf46.2023.101-109.

169. Сагін А.С. Аналіз способів підвищення надійності паливної апаратури високого тиску під час використання в судових дизелях палив з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Матеріали 14-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 16-18 березня 2023 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – С. 208-210.

170. Сагін А.С. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів / А.С. Сагін, С.В. Сагін // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

171. Сагін А.С. Корегування процесу подачі палива під час використання в судових дизелях палив з різним вмістом сірки / А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 178-190. doi: 10.31653/smf47.2023.178-190.

172. Заблоцький Ю.В. Забезпечення економічної ефективності судових дизелів / Ю.В. Заблоцький, А.С. Сагін // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021 -26.03.2021. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2021. – С. 91-93.

173. Sagin S. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, I. Tkachenko // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

174. Сагін С.В. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення / С.В. Сагін, С.А. Бондар, Т.О. Столярик // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

175. Мадей В.В. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо / В.В. Мадей, О.М. Волков // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 43-56. doi : 10.31653/smf45.2022.43-56.

176. Sagin S.V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport / S.V. Sagin, S.S. Sagin, V. Madey // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

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

ДОДАТОК

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65052, тел.: (+38 048) 793-1672, факс: (+38 048) 793-1694
 www.onma.edu.ua e-mail: info@onma.edu.ua Код ЄДРПОУ 01127799



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
 Сагіна Арсенія Сергійовича
 на тему «**Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден**»
 в освітньому процесі Національного університету «Одеська морська академія»

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу Національного університету «Одеська морська академія» Пархоменко М.М., директор навчально-наукового інституту інженерії, к-т техн. наук, професор Колегаєв М.О., завідувач відділу аспірантури та докторантури к-т техн. наук, доцент Волков О.М. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Сагіна Арсенія Сергійовича на тему «Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден» впроваджені в освітній процес під час підготовки здобувачів освіти навчально-наукового інституту інженерії та аспірантури, а саме:

- 1) технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива, яка забезпечує зниження тиску згоряння та температури випускних газів, а також сприяє зниженню емісії оксидів азоту з випускними газами, та технологія переналаштування паливної апаратури високого тиску яка дозволяє виконувати поступову зміну кутів впорскування палива в рекомендованому фірмою виробником діапазоні – під час викладання освітнього компонента «Суднові двигуни внутрішнього згоряння» (для здобувачів наукового ступеня бакалавр);
- 2) технологія забезпечення гідравлічної щільності паливної апаратури високого тиску – під час викладання освітнього компонента «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр);
- 3) технологія визначення структурних характеристик моторних мастил – під час викладання освітнього компонента «Дослідницький практикум» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Начальник навчального відділу

Микола ПАРХОМЕНКО

Завідувач відділу аспірантури та докторантури,
к-т техн. наук, доцент

Олександр ВОЛКОВ

Директор навчально-наукового інституту інженерії,
к-т техн. наук, професор

Михайло КОЛЕГАСВ

ISO 9001
 BUREAU VERITAS
 Certification



АКТ

про використання окремих результатів дисертаційної роботи

Сагіна Арсенія Сергійовича

на тему «**Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден**»

Цей акт складений та свідчить про те, технологія переналаштування паливної апаратури високого тиску яка дозволяє виконувати поступову зміну кутів впорскування палива в рекомендованому фірмою виробником діапазоні – були апробовані, схвалені та рекомендовані до подальшого використання на судновому дизелі 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo судна класу Bulker Carrier дедвейтом 92246 тонн.

Використання вказаних технологій сприяли зменшенню навантаження на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму дизеля, та забезпечувала зменшення негативного впливу на довкілля та покращувала технічний стан деталей дизеля.

Капітан
т/х “Lappeenranta”

Старший механік
т/х “Lappeenranta”



В. ВОЙТЕНКО

С. КРОПИВНИЦЬКИЙ

АКТ

про використання окремих результатів дисертаційної роботи

Сагіна Арсенія Сергійовича

на тему «**Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден**»

Цей акт складений та свідчить про те, що технологія визначення оптимальних кутів впорскування палива яка забезпечує зниження тиску згоряння, температури випускних газів, а також сприяє зниженню емісія оксидів азоту з випускними газами – для суднового дизеля під час його переведення з палива, вміст сірки в якому досягав 0,5 %, на паливо, вміст сірки в якому не перебільшував 0,1 %, були апробовані, схвалені та рекомендовані до подальшого використання на судновому дизелі 7S50ME-B9.3-ТІІ MAN-Diesel & Turbo судна класу Bulker Carrier дедвейтом 67246 тонн. Використання вказаних технологій забезпечило зниженню тиску згоряння, температури випускних газів, а також сприяє зниженню емісія оксидів азоту

Muster m/v “Platinum”



С. БАКАЛОВ

Chief Eng m/v “Platinum”

Б. АРМАНОВ

АКТ

про використання окремих результатів дисертаційної роботи

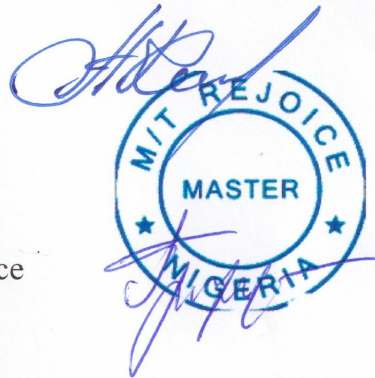
Сагіна Арсенія Сергійовича

на тему «**Забезпечення процесу паливоподачі дизелів річкових та морських суден**»

Цей акт складений та свідчить про те, технологія керованого впливу на елементи паливної апаратури високого тиску, яка забезпечувала зменшення викидів оксидів азоту та підвищення економічних показників – були апробовані, схвалені та рекомендовані до подальшого використання для суднового дизеля 6S60ME-C8.2-TII MAN-Diesel & Turbo судна дедвейтом 62222 тонн.

За допомогою вказаних технологій були визначені значення екологічної, динамічної та теплової стійкості для суднового дизеля 6S60ME-C8.2-TII MAN-Diesel & Turbo.

Капітан т/х “Rejoice”



А. Кутазів

Старший механік т/х “Rejoice”

В. Грігоренко