

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Мадей Володимир Васильович

УДК 629.5

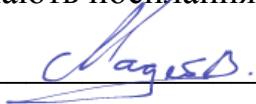
ДИСЕРТАЦІЯ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКИХ СУДЕН ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 Володимир МАДЕЙ

Науковий керівник:
Волков Олександр Миколайович,
кандидат технічних наук, доцент

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Мадей В.В. Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2024.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – забезпечення екологічних та економічних показників роботи морських та річкових засобів транспорту під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження.

Дослідження, результати яких наведені в дисертаційній роботі, зумовлені наявністю сьогоденних **запитів практики:**

- необхідність поступового зниження споживання палива нафтового походження енергетичними установками морських та річкових засобів транспорту з пропорційною його заміною альтернативними видами палива;
- необхідність підвищення екологічності та енергетичної ефективності роботи морських та річкових засобів транспорту.

Головне завдання наукового дослідження є забезпечення екологічних та економічних показників роботи морських та річкових засобів транспорту під час використання палива біологічного походження.

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

- 1) визначення ділянки витратної паливної системи дизелів морських засобів транспорту, найбільш доцільної щодо утворення паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

2) визначення діапазону доцільної концентрації біопалива в її суміші з паливом нафтового походження;

3) визначення критеріїв оцінки ефективності використання суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

4) визначення оптимального складу паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, для забезпечення експлуатаційних показників роботи дизелів морських суден.

У результаті розв'язання головного та допоміжних завдань сформульовано **наукове положення**: підвищення екологічності роботи морських та річкових засобів транспорту досягається шляхом утворення стійких паливних сумішей з оптимальною концентрацією в цих сумішах палива біологічного походження та подальшою подачею цих сумішей у циліндри дизеля з оптимальними фазами впорскування.

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

- запропоновано підготовку паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, виконувати безпосередньо перед паливним насосом, що підкачує паливо до паливної апаратури високого тиску;

- встановлено, що найбільш доцільною концентрацією біопалива в її суміші з паливом нафтового походження є діапазон 5...20 % від загального об'єму паливної суміші,

- встановлено, що ефективність використання суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, найбільш доцільно оцінювати за значенням відносного зниження емісії оксидів азоту з випускними газами дизелів морських суден та за значенням відносного підвищення питомої витрати палива;

- запропоновано оптимальний склад паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, визначати такою його концентрацією, за якою гарантується максимальне збільшення екологічних та мінімальне зниження економічних параметрів роботи суднового дизеля з одночасним забезпеченням значення ефективної потужності дизеля.

Удосконалено:

- технологію створення стійких паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження;
- спосіб визначення оптимальної концентрації палива біологічного походження в її суміші з важким або дистильованим дизельним паливом;
- технологію управління екологічною безпекою засобів морського транспорту під час використання в судових дизелях палива біологічного походження.

Отримала подальший розвиток:

- технологія визначення витрат енергії, що необхідна для забезпечення екологічної стійкості засобів морського транспорту;
- технологія корегування навігаційних переходів засобів морського транспорту під час використання в судових дизелях палива біологічного походження.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- блок дозування, що забезпечує утворення стійких паливних сумішей, до складу яких входить палива біологічного та нафтового походження, – у паливній системі дизеля 6N165LW Yanmar судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн, що сприяло більш ніж на 20 % зниженню емісії оксидів азоту та 15...20 % зниженню емісії оксидів вуглецю;
- вдосконалена паливна система, яка дозволяє утворювати та використовувати паливні суміші, до складу яких входить паливо біологічного походження, – на дизелі 5H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 9600 тонн, що для оптимального вмісту палива біологічного походження в складі паливної суміші забезпечило відносне зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах на 24,4...26,6 % та відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах на 18,9...23,6 %;
- технологія утворення паливних сумішей – у паливній системі судового дизеля 6H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого

морського судна дедвейтом 14745 тонн, що забезпечило зниження на 18,3...23,3 % відносної зміни концентрації оксидів азоту у випускних газах, а також покращенню експлуатаційних показників дизеля;

- технологія корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання палива біологічного походження, а також модуль підготовки паливних сумішей з оптимальним вмістом компонентів, що її складають, – у паливній системі суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel спеціалізованого морського судна дедвейтом 10820 тонн, що сприяло зниженню емісії оксидів азоту на 23,8...24,3 % та зниженню об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах на 17,8...25,4 %;

- технологія забезпечення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів шляхом корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, а також технологія управління екологічною безпекою суден морського транспорту шляхом використання палива біологічного походження – на суднових дизелях 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн, що забезпечило поліпшення екологічних та підтримання енергетичних показників дизелів;

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

технологія створення паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, технологія визначення оптимального вмісту палива біологічного походження в цих сумішах, а також технологія контролю показників робочого циклу суднових дизелів – під час викладання освітніх компонентів «Технологія використання робочих речовин» та «Суднові двигуни внутрішнього згорання» (для здобувачів наукового ступеня бакалавр);

послідовність визначення оптимальних кутів впорскування палива під час переведення суднових дизелів на використання паливних

сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, – під час викладання освітніх компонентів «Екологічна безпека та альтернативні джерела енергії» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження – під час викладання освітніх компонентів «Обробка та оцінка навігаційної інформації», «Організація логістичних систем», «Проблеми безпеки судноводіння та охорони навколишнього середовища» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

метод визначення втрат енергії, які необхідні для забезпечення екологічної стійкості морських засобів транспорту, – під час викладання освітніх компонентів «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр) та «Енергоресурсозбереження на морському та внутрішньому водному транспорті» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Ключові слова: альтернативне паливо, впорскування палива, діагностування, екологічна безпека, екологічні показники, експлуатаційні показники, емісія оксидів азоту, емісія оксидів вуглецю, енергетична ефективність, енергетичні показники, засоби транспорту, морський транспорт, навігаційний перехід, оптимізація, паливна апаратура, паливна система, паливна суміш, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, питома витрата палива, судновий дизель.

Список опублікованих праць за темою дисертації

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

1. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
2. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 2 (1(64)). – P. 34-41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
3. Мадей В.В. Використання альтернативного палива в суднових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 45 - 53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.
4. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // 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.
5. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-110. DOI: 10.31653/smf44.2022. 93-110.
6. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.
7. Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи суднових

дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 28. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

8. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

9. Мадей В.В., Волков О.М., Сторчак О.О. Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 55-68. doi: 10.31653/smf47.2023.55-68.

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

11. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

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

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

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

Статті в іноземних виданнях країни ЄС:

14. 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>.

Статті у збірках матеріалів наукових конференцій

15. Мадей В.В. Використання альтернативних палив в суднових дизелях середньої потужності // 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. 100-102.

16. Мадей В.В. Забезпечення екологічності роботи суднових дизелів під час використання біопалива // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4-5 листопада 2021 р. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 227-230.

17. Сагин С.В., Мадей В.В. Использование биодизельного топлива в судовых вспомогательных дизелях // 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. 160-162.

18. Мадей В.В., Сагин С.В. Використання біопалива в двигунах внутрішнього згоряння // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 91-92.

19. Мадей В.В. Визначення раціональних режимів роботи суднових дизелів під час використання палив нафтового походження // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022. – Одеса : НУ «ОМА», 2022. – С. 61-65.

20. Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Забезпечення екологічності морських суден під час їх експлуатації в спеціальних екологічних районах Північної Європи // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 - 23.03.2023.– Одеса : НУ «ОМА», 2023. – С. 61-65.

21. Мадей В.В., Волков О.М. Екологічні та економічні аспекти використання в суднових дизелях палив біологічного походження // 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. 201-204.

22. Мадей В.В. Забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання палива біологічного походження // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 року. – Херсон : ХДМА. –2023. – С. 238-240.

23. Мадей В.В. Визначення оптимальних фаз подачі палива під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження // 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. 74-78.

24. Sagin S., Madey V., Volkov O. Use of biofuels in marine diesel engines // 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. <https://2024.depas.od.ua>.

25. Мадей В.В. Оптимізація процесу впорскування паливних сумішей // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2024 – 21.03.2024.– Одеса : НУ «ОМА», 2024. – С. 54-56.

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

[1] – проведення експериментальних досліджень, контроль та регулювання показників роботи суднового дизеля, обробка результатів експерименту, розробка рекомендацій щодо подальших досліджень;

[4], [6] – модернізація суднової паливної системи з урахуванням можливості використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, розробка та погодження технології проведення експерименту, проведення досліджень та аналіз отриманих результатів;

[7] – проведення та обробка результатів випробувань;

[8], [10] – проведення інформаційного пошуку, модернізація суднової паливної системи з урахуванням можливості використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження, проведення експериментальних досліджень, обробка результатів та розробка рекомендацій щодо подальших досліджень;

[9], [11] – розробка та погодження технології проведення експериментів, виконання досліджень та аналіз їх результатів, розробка рекомендацій щодо подальшого використання мастила в системі мащення;

[12], [13] – забезпечення технологічних процедур щодо модернізації суднової паливної системи, виконання експериментальних досліджень та аналіз їх результатів;

[17], [18] – проведення експериментальних досліджень під час експлуатації суднових дизелів з використанням паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження;

[20], [21], [24] – проведення експериментальних досліджень та визначення оптимальних режимів роботи суднових дизелів під час використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження.

ANNOTATION

Madey V.V. Ensuring operational performance of diesel engines of marine vessels when using fuel of biological origin.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.22.20 "Maintenance and Repair of Transport Means". National University "Odessa Maritime Academy" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024.

The dissertation research is aimed at solving the scientific and applied task – ensuring the environmental and economic performance indicators of sea and river means of transport during the use of fuel of biological origin in marine diesel engines.

The research, the results of which are given in the dissertation, is caused by the presence of today's practice requests:

- the need to gradually reduce the consumption of petroleum-based fuel by power plants of sea and river means of transport with its proportional replacement by alternative types of fuel;
- the need to increase the environmental friendliness and energy efficiency of sea and river means of transport.

The main task of scientific research is to ensure the ecological and economic indicators of the operation of sea and river means of transport when using fuel of biological origin.

The main task of the dissertation research was solved by solving the following subsidiary tasks:

- 1) determining the fuel system consumable part of diesel engines of marine means of transport, the most appropriate for forming a fuel mixture, which includes fuel of biological origin;

2) determining the appropriate concentration range of biofuel in its mixture with fuel of petroleum origin;

3) determining the criteria for evaluating the efficiency of using a mixture that includes fuel of biological origin;

4) determining the optimal composition of the fuel mixture, which includes fuel of biological origin to ensure the performance of marine diesel engines.

As a result of solving the main and subsidiary tasks, a scientific position was formulated: Increasing the environmental friendliness of sea and river means of transport is achieved through the formation of stable fuel mixtures with the optimal concentration of fuel of biological origin in these mixtures and the subsequent supply of these mixtures to diesel cylinders with optimal injection phases.

The scientific position has been substantiated by the scientific results for the first time:

- it is suggested that producing fuel mixtures, the composition of which includes fuel of biological origin, to be carried out immediately before the fuel pump that pumps fuel to the high-pressure fuel equipment of the diesel engine;

- it was determined that the most appropriate concentration of biofuel in its mixture with fuel of petroleum origin is the range of 5-20 % of the total volume of the fuel mixture,

- it was found that the efficiency of using a mixture that includes fuel of biological origin is most expediently evaluated by the value of the relative decrease in the emission of nitrogen oxides with the exhaust gases of marine diesel engines and by the value of the relative increase in specific fuel consumption;

- the optimal composition of the fuel mixture, which includes fuel of biological origin, is proposed to be determined by changing the fuel injection angles that provide the greatest improvement in environmental and the least deterioration in the economic performance of marine diesel engines.

Improved:

- the technology of creating sustainable fuel mixtures, which include fuel of biological origin;

- the method of determining the optimal concentration of fuel of biological origin in its mixture with heavy or distillate diesel fuel;
- the technology of managing the environmental safety of marine transport vessels during the use of fuel of biological origin in marine diesel engines.

Received further development:

- technology for determining energy consumption, which is necessary to ensure the environmental sustainability of sea transport vessels;
- technology for correcting the navigation transitions of sea transport vessels during the use of fuel of biological origin in marine diesel engines.

The results of the dissertation research were implemented:

- a dosing unit that ensures the formation of stable fuel mixtures, which include fuel of biological and petroleum origin, in the fuel system of the 6N165LW Yanmar diesel of a General Cargo class vessel with a dead weight of 14,800 tons, which contributed to a more than 20 % reduction in nitrogen oxide emissions and 15-20 % reduction in carbon dioxide emissions;
- an improved fuel system that allows you to create and use fuel mixtures that include fuel of biological origin – on the 5H17/28 Hyundai Heavy Industries diesel engine of a specialized marine vessel with a deadweight of 9,600 tons, which ensured a relative decrease in the concentration of biological fuel in the fuel mixture of nitrogen oxides in exhaust gases by 24.4-26.6 % and a relative decrease in the volumetric content of carbon monoxide in exhaust gases by 18.9-23.6 %;
- fuel mixture formation technology – in the fuel system of a 6H17/28 Hyundai Heavy Industries marine diesel engine of a specialized marine vessel with a deadweight of 14,745 tons, which provided a reduction by 18.3-23.3 % of the relative change in the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases, as well as an improvement of diesel performance indicators;
- the technology for correcting the navigation transitions of sea transport vessels when using fuel of biological origin, as well as the module for preparing fuel mixtures with the optimal content of the components that make it up – in the fuel system of the marine diesel 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel of a specialized

marine vessel with a deadweight of 10,820 tons, which contributed to a decrease in the emission of nitrogen oxides by 23.8-24.3 % and a decrease in the volumetric content of carbon monoxide in exhaust gases by 17.8-25.4 %;

- the technology for ensuring operational performance of marine diesel engines by adjusting the setting of high-pressure fuel equipment when using fuel mixtures that include fuel of biological origin, as well as the technology for managing the environmental safety of marine transport vessels by using fuel of biological origin – on 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo marine diesel engines and 6EY18ALW Yanmar vessels of the Bulk Carrier class with a deadweight of 63,246 tons, which ensured the improvement of the environmental and energy maintaining performance of diesel engines;

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

the technology of creating fuel mixtures, which include fuel of biological origin, the technology of determining the optimal content of fuel of biological origin in these mixtures, as well as the technology of controlling indicators of the work cycle of marine diesel engines – during the teaching of the educational components "Technology of the use of working substances" and "Ship internal combustion engines » (for Bachelor's degree candidates);

the sequence of determining the optimal fuel injection angles during the transfer of marine diesel engines to the use of fuel mixtures that include fuel of biological origin – during the teaching of the educational components "Environmental safety and alternative energy sources" (for Master's degree candidates);

the technology for correcting the navigation passages of sea transport vessels during the use of fuel of biological origin in marine diesel engines – during the teaching of the educational components "Processing and evaluation of navigational information", "Organization of logistics systems", "Problems of safety of navigation and environmental protection" (for Master's degree candidates);

the method of determining energy losses, required to ensure the environmental sustainability of marine means of transport – during the teaching of the educational components "Processes of energy conversion of ship power plants" (for master's degree holders) and "Energy resource conservation in marine and inland water transport" (for obtaining a scientific degree of Doctor of Philosophy).

Key words: alternative fuel, diagnostics, emission of carbon oxides, emission of nitrogen oxides, energy efficiency, energy indicators, environmental indicators, environmental safety, fuel equipment, fuel injection, fuel mixture, fuel of biological origin, fuel of petroleum origin, fuel system, marine diesel, means of transport, navigation transition, operational indicators, optimization, sea transport, specific fuel consumption.

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. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.

2. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 2 (1(64)). – P. 34-41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

3. Мадей В.В. Використання альтернативного палива в суднових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 45 - 53. doi: [10.31653/smf343.2021.41-53](https://doi.org/10.31653/smf343.2021.41-53).

4. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // 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.

5. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-110. DOI: 10.31653/smf44.2022. 93-110.

6. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

7. Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 28. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

8. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

9. Мадей В.В., Волков О.М., Сторчак О.О. Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 55-68. doi: 10.31653/smf47.2023.55-68.

10. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту

// Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 157-171. doi: 10.31653/smf47.2023.157-171.

11. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

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

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

13. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // 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:

14. 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>.

Articles in collections of materials of scientific conferences

15. Мадей В.В. Використання альтернативних палив в суднових дизелях середньої потужності // 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. 100-102.

16. Мадей В.В. Забезпечення екологічності роботи суднових дизелів під час використання біопалива // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4-5 листопада 2021 р. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 227-230.

17. Сагин С.В., Мадей В.В. Использование биодизельного топлива в судовых вспомогательных дизелях // 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. 160-162.

18. Мадей В.В., Сагин С.В. Використання біопалива в двигунах внутрішнього згоряння // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 91-92.

19. Мадей В.В. Визначення раціональних режимів роботи суднових дизелів під час використання палив ненафтового походження // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022.– Одеса : НУ «ОМА», 2022. – С. 61-65.

20. Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Забезпечення екологічності морських суден під час їх експлуатації в спеціальних екологічних районах Північної Європи // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 - 23.03.2023.– Одеса : НУ «ОМА», 2023. – С. 61-65.

21. Мадей В.В., Волков О.М. Екологічні та економічні аспекти використання в суднових дизелях палив біологічного походження // 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. 201-204.

22. Мадей В.В. Забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання палива біологічного походження // Матеріали

міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 року. – Херсон : ХДМА. –2023. – С. 238-240.

23. Мадей В.В. Визначення оптимальних фаз подачі палива під час використання в судових дизелях палива біологічного походження // 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. 74-78.

24. Sagin S., Madey V., Volkov O. Use of biofuels in marine diesel engines // 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. <https://2024.depas.od.ua>.

25. Мадей В.В. Оптимізація процесу впорскування паливних сумішей // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2024 – 21.03.2024.– Одеса : НУ «ОМА», 2024. – С. 54-56.

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

[1] – conducting experimental studies, control and regulation of ship diesel performance indicators, processing of experimental results, development of recommendations for further studies;

[4], [6] – modernization of the ship's fuel system, taking into account the possibility of using fuel mixtures that include fuel of biological origin, development and approval of the technology for conducting the experiment, conducting research and analyzing the results obtained;

[7] – conduct and processing of test results;

[8], [10] – conducting information search, modernizing the ship's fuel system taking into account the possibility of using fuel mixtures that include fuel of

biological origin, conducting experimental research, processing results and developing recommendations for further research;

[9], [11,] – development and approval of the technology for conducting experiments, conducting research and analyzing their results, developing recommendations for the further use of lubricant in the lubrication system;

[12], [13] – provision of technological procedures for modernization of the ship's fuel system, performance of experimental studies and analysis of their results;

[17], [18] – conducting experimental studies during the operation of marine diesel engines using fuel mixtures that include fuel of biological origin;

[20], [21], [24] – conducting experimental studies and determining the optimal modes of operation of marine diesel engines when using fuel mixtures that include fuel of biological origin.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	25
ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗАСОБІВ МОРСЬКОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ	38
1.1. Загальна характеристика засобів морського та внутрішнього водного транспорту	38
1.1.1. Енергетичні показники засобів морського та внутрішнього водного транспорту	42
1.1.2. Економічні показники засобів морського та внутрішнього водного транспорту	44
1.1.3. Екологічні показники засобів морського та внутрішнього водного транспорту	47
1.2. Вимоги Міжнародних конвенцій та класифікаційних товариств щодо екологічності роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту	51
1.3. Аналіз структурного та фракційного складу нафтових палив, що використовуються під час експлуатації дизелів морських та річкових засобів транспорту	62
1.4. Аналіз способів зменшення шкідливого впливу дизелів морських та річкових засобів транспорту на довкілля	68
1.5. Аналіз сучасних тенденцій розвитку альтернативних палив для дизелів морських та річкових засобів транспорту	74
1.6. Висновки за розділом 1	83
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	84

2.1. Вибір теми наукового дослідження та визначення шляхів досягнення завдань дослідження	84
2.2. Вибір об'єкта дослідження, предмета та методів дослідження	90
2.3. Використання системного аналізу під час розв'язання завдань із технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту	94
2.4. Висновки за розділом 2	105
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, ЩО ВІДОБРАЖАЮТЬ ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ, ЯКІ МІСТЯТЬ ПАЛИВО БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ	
3.1. Аналіз гідродинамічних процесів, що перебігають у паливних системах дизелів морських суден	106
3.2. Аналітичне визначення процесів дифузійної кінетики в рідинах	108
3.3. Конвективна дифузія в рідинах	113
3.4. Аналіз конструктивного виконання та комплектації паливних систем дизелів морських суден	123
3.5. Аналіз технологічних рішень, що забезпечують використання паливних сумішей під час експлуатації дизелів морських суден.....	126
3.6. Експериментальне визначення характеристик паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження	136
3.7. Висновки за розділом 3	148
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКИХ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ	
4.1. Екологічні та економічні критерії використання біопалива під час експлуатації морських засобів транспорту	150
4.2. Експериментальне визначення раціонального вмісту біопалива в його суміші з нафтовим паливом	152
4.2.1. Випробування під час експлуатації морського судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн	152

4.2.2. Випробування під час експлуатації спеціалізованого морського судна дедвейтом 9600 тонн	164
4.2.3. Випробування під час експлуатації спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн	170
4.2.4. Випробування під час експлуатації спеціалізованого морського судна дедвейтом 10820 тонн	178
4.3. Висновки за розділом 4	186
РОЗДІЛ 5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ	188
5.1. Забезпечення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів шляхом корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження.....	188
5.1.1. Експериментальні дослідження під час експлуатації морського спеціалізованого судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн	189
5.1.2. Експериментальні дослідження під час експлуатації морського спеціалізованого судна дедвейтом 14745 тонн	199
5.2. Управління екологічною безпекою суден морського транспорту шляхом використання палива біологічного походження	206
5.3. Корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання палива біологічного походження	220
5.4. Висновки за розділом 5	227
ВИСНОВКИ	229
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	235
ДОДАТОК.....	265

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВГ	– випускні гази
ВОД	– високообертовий дизель
ГД	– головний двигун
ДВЗ	– двигун внутрішнього згоряння
ДД	– допоміжний двигун
ККД	– коефіцієнт корисної дії
ККЕЕ	– конструктивний коефіцієнт енергетичної ефективності
МАРПОЛ	– Міжнародна конвенція про запобігання забрудненню з суден
МОД	– малообертовий дизель
ПУЕС	– план управління енергоефективністю судна
ПНВТ	– паливний насос високого тиску
СЕУ	– суднова енергетична установка
СОД	– середньообертовий дизель
СПК	– судновий пропульсивний комплекс
IMO	– International Marine Organization
SCR	– Selective Catalytic Reduction
NSCR	– Non-Selective Catalytic Reduction
SECAs	– Sulphur Emission Control Areas
MARPOL	– The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
SOLAS	– International Convention for the Safety of Life at Sea
EPA	– Environmental Protection Agency
EEDI	– Energy Efficiency Design Index
EEOI	– Energy Efficiency Operational Index
NECAs	– Nitrogen Emission Control Areas
SEEMP	– Ship Energy Efficiency Management Plan

ВСТУП

Морський та внутрішній водний транспорт під час перевезення вантажів та пасажирів, споживає велику кількість палива. На морських і річкових судах як теплові двигуни використовуються паротурбінні, газотурбінні та дизельні установки. При цьому дизелі встановлюються на всіх судах без винятку, незалежно від їх типу, класу та дедвейту [1, 2]. Ефективна потужність дизелів використовується для руху судна або забезпечення електричної енергії суднового обладнання, механізмів і систем. Її отримання не можливе без згоряння палива в циліндрі. Сучасні наукові проекти, спрямовані на використання сонячної енергії та енергії вітру, у морському транспорті можуть застосовуватись лише частково. Встановлення сонячних батарей на відкритих палубах потребує їх постійного демонтажу до та після виконання вантажних робіт. Застосування вітряних генераторів та жорстких вітрил збільшує аеродинамічний опір у випадку погіршення гідрометеорологічних умов. Використання акумуляторних батарей на транспортних судах потребує постійного відновлення їхньої ємності, що неможливо в умовах тривалих морських переходів. Таким чином, основним джерелом енергії для суднових енергетичних установок на найближчу перспективу залишиться рідке паливо. При цьому світові потреби в рідкому паливі постійно зростають, його природні запаси щорічно знижуються, обсяги видобутку регламентуються країнами-виробниками [3, 4]. Водночас посилюються вимоги, що висуваються до екологічних показників роботи енергетичних установок суден морського та внутрішнього водного транспорту під час використання палива нафтового походження, а саме:

- розширюються спеціальні зони контролю викидів оксидів сірки з випускними газами (Sulfur Emission Control Areas – SECAs) [5, 6];
- регламентується концентрація оксидів азоту у випускних газах [7, 8];
- обмежуються викиди оксидів вуглецю [9, 10].

Україна, як Європейська держава, імплементувала всі основні міжнародні резолюції та конвенції країн ЄС, у тому числі такі, що спрямовані на захист довкілля та насамперед Міжнародну конвенцію про запобігання забрудненню з суден – МАРПОЛ73/78, а також вимоги Міжнародної морської організації (International Marine Organization – IMO) щодо розробки плану управління енергоефективністю судна [11, 12].

Усе це є однією з причин використання в судновій енергетиці альтернативних видів палива, не нафтового походження. Інтенсивні дослідження можливості його застосування проводять у даний час у різних країнах. Основними видами альтернативного палива є:

- зріджені горючі гази;
- водень;
- спирти та їх суміші з нафтовим паливом;
- рослинні олії;
- штучне рідке та газове паливо (біопаливо та біогаз) [13, 14].

Дослідження альтернативних видів суднових палив (у тому числі палив біологічного походження, або біопалива) та вивчення їх впливу на економічні та екологічні показники суднових дизелів є **актуальним** завданням. Її розв'язання сприятиме покращенню експлуатаційних показників роботи дизелів морських суден у складі пропульсивного комплексу морських та річкових засобів транспорту та зменшенню їх негативного впливу на довкілля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана зі світовими тенденціями, що визначені в Транспортній стратегії України на період до 2030 року (розп. КМУ 30.03.18 р. № 430-р), а саме:

- використання високотехнологічних та ергономічних транспортних засобів, принципів мультимодальності, інтелектуальних транспортних систем, інформаційних технологій, електронного документообігу;
- покращення безпечності транспортних засобів;

- використання паливно-економічних та екологічних транспортних засобів, застосування альтернативних видів палива, «зелених» видів транспорту, пріоритетність потреб охорони навколишнього природного середовища та збереження цінних природоохоронних територій під час розвитку транспортної інфраструктури.

Дослідження, результати яких наведені в роботі, виконувались згідно з держбюджетною науково-дослідною роботою Національного університету «Одеська морська академія» «Прогнозування експлуатаційного технічного стану суднової пропульсивної установки на основі контролю її вібраційно-коливальних характеристик» № ДР 0119U001654 (2021–2024 рр.), в якій автор дисертації брав участь як виконавець окремих розділів.

Дослідження, результати яких наведені в роботі, погоджуються з вимогами резолюції МЕРС.346(78) «Керівництво про розробку плану енергоефективності судна», що прийнята ІМО 10.06.22 р., стосовно рекомендацій щодо передової практики паливо-зберігаючої експлуатації суден та методології збору даних про витрату суднового палива, пройденої відстані та часу на переходах у годинах; вимогами резолюції МЕРС.324(75) «Поправки до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ (Процедури відбору проб та перевірки вмісту сірки в судновому паливі та конструктивний коефіцієнт енергоефективності)», що прийнята ІМО 20.11.20 р., стосовно контролю вмісту сірки в судновому паливі та розрахунку конструктивного коефіцієнта енергоефективності, а також з вимогами резолюції МЕРС.305(73) «Поправки до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ (Заборона на перевезення судна, що не відповідає вимогам суднового палива, призначеного для згоряння з метою забезпечення руху або експлуатації судна)», що прийнята Міжнародною морською організацією 26.10.18 р., стосовно вмісту сірки в паливі, коли судно експлуатується в районі та за межами району контролю викидів.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення екологічності роботи морських та річкових засобів транспорту.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза, що підвищення екологічності роботи морських та річкових засобів транспорту досягається використанням у суднових дизелях паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження з оптимальною концентрацією.

Як головне завдання дослідження було визначено забезпечення екологічних та економічних показників роботи морських та річкових засобів транспорту під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження.

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

1) визначення ділянки витратної паливної системи дизелів морських засобів транспорту, найбільш доцільної щодо утворення паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

2) визначення діапазону доцільної концентрації біопалива в її суміші з паливом нафтового походження;

3) визначення критеріїв оцінки ефективності використання суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

4) визначення оптимального складу паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, для забезпечення експлуатаційних показників роботи дизелів морських суден.

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

Предмет дослідження – процес забезпечення експлуатаційних показників роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження.

Під час дослідження використовувались емпіричні, комплексні та теоретичні **методи дослідження**:

- аналізу і синтезу, індукції та дедукції (під час інформаційного пошуку шляхів розв'язання завдань дослідження);

- діалектики, сходження від абстрактного до конкретного (під час розробки методології та визначення основних складових наукового дослідження);

- математичного моделювання, математичної статистики (під час розробки моделі предмета дослідження та обробки результатів випробувань);

- абстрагування, конкретизації (під час визначення впливу зовнішніх і внутрішніх збурень на об'єкт дослідження);

- спостереження, порівняння, вимірювання, експерименту (під час проведення випробувань на суднах морського транспорту).

Наукова новизна роботи полягає в тому, що підвищення екологічності роботи морських та річкових засобів транспорту досягається шляхом утворення стійких паливних сумішей з оптимальною концентрацією в цих сумішах палива біологічного походження та подальшою подачею цих сумішей в циліндри дизеля з оптимальними фазами впорскування.

У результаті дослідження вперше:

- запропоновано підготовку паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, виконувати безпосередньо перед паливним насосом, що підкачує паливо до паливної апаратури високого тиску;

- встановлено, що найбільш доцільною концентрацією біопалива в її суміші з паливом нафтового походження є діапазон 5...20 % від загального об'єму паливної суміші,

- встановлено, що ефективність використання суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, найбільш доцільно оцінювати за значенням відносного зниження емісії оксидів азоту з випускними газами дизелів морських суден та за значенням відносного підвищення питомої витрати палива;

- запропоновано оптимальний склад паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, визначати такою його концентрацією, за якою гарантується максимальне збільшення екологічних

та мінімальне зниження економічних параметрів роботи суднового дизеля з одночасним забезпеченням значення ефективної потужності дизеля.

Удосконалено:

- технологію створення стійких паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження;
- спосіб визначення оптимальної концентрації палива біологічного походження в її суміші з важким або дистилатним дизельним паливом;
- технологію управління екологічною безпекою засобів морського транспорту під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження.

Отримала подальший розвиток:

- технологія визначення витрат енергії, що необхідна для забезпечення екологічної стійкості засобів морського транспорту;
- технологія корегування навігаційних переходів засобів морського транспорту під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- запропонована технологія, що сприяє утворенню стійких паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, дозволяє виконувати використання цих сумішей під час експлуатації будь-яких типів суднових дизелів, забезпечує при цьому поліпшення їх екологічних показників роботи та сприяє екологічній стійкості та енергетичній ефективності засобів морського транспорту;
- розроблений алгоритм визначення оптимальних фаз подачі палива, за якими забезпечується підвищення екологічності роботи засобів морського транспорту, гарантує підтримання енергетичних показників роботи суднових дизелів.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- блок дозування, що забезпечує утворення стійких паливних сумішей, до складу яких входить палива біологічного та нафтового походження, – у

паливній системі дизеля 6N165LW Yanmar судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн, що сприяло більш ніж на 20 % зниженню емісії оксидів азоту та 15...20 % зниженню емісії оксидів вуглецю;

- вдосконалена паливна система, яка дозволяє утворювати та використовувати паливні суміші, до складу яких входить паливо біологічного походження, – на дизелі 5H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 9600 тонн, що для оптимального вмісту палива біологічного походження в складі паливної суміші забезпечило відносне зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах на 24,4...26,6 % та відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах на 18,9...23,6 %;

- технологія утворення паливних сумішей – у паливній системі суднового дизеля 6H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн, що забезпечило зниження на 18,3...23,3 % відносної зміни концентрації оксидів азоту у випускних газах, а також покращення експлуатаційних показників дизеля;

- технологія корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання палива біологічного походження, а також модуль підготовки паливних сумішей з оптимальним вмістом компонентів, що її складають, – в паливній системі суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel спеціалізованого морського судна дедвейтом 10820 тонн, що сприяло зниженню емісії оксидів азоту на 23,8...24,3 % та зниженню об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах на 17,8...25,4 %;

- технологія забезпечення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів шляхом корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, а також технологія управління екологічною безпекою суден морського транспорту шляхом використання палива біологічного походження – на суднових дизелях 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar судна класу Bulker Carrier дедвейтом

63246 тонн, що забезпечило поліпшення екологічних та підтримання енергетичних показників дизелів;

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

технологія створення паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження, технологія визначення оптимального вмісту палива біологічного походження в цих сумішах, а також технологія контролю показників робочого циклу суднових дизелів – під час викладання освітніх компонентів «Технологія використання робочих речовин» та «Суднові двигуни внутрішнього згорання» (для здобувачів наукового ступеня бакалавр);

послідовність визначення оптимальних кутів впорскування палива під час переведення суднових дизелів на використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, – під час викладання освітніх компонентів «Екологічна безпека та альтернативні джерела енергії» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження – під час викладання освітніх компонентів «Обробка та оцінка навігаційної інформації», «Організація логістичних систем», «Проблеми безпеки судноводіння та охорони навколишнього середовища» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

метод визначення втрат енергії, які необхідні для забезпечення екологічної стійкості морських засобів транспорту, – під час викладання освітніх компонентів «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр) та «Енергоресурсозбереження на морському та внутрішньому водному транспорті» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Особистий внесок здобувача полягає у:

- виконанні патентного та інформаційного пошуку, проведенні пошуку технічної інформації та наукових розробок, що односпрямовані з темою дисертації та напрямком наукового дослідження;

- розробці математичної моделі гідродинамічних процесів, що перебігають в паливних системах дизелів морських суден, а також процесів конвективної дифузії під час утворення паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження;

- модернізації суднових паливних систем під час проведення експериментальних досліджень, розробці технології проведення випробувань та її погодженні з наглядовими товариствами;

- проведенні досліджень на суднових дизелях, обробці та аналізі отриманих результатів, розробці рекомендацій щодо їх впровадження на морських засобах транспорту.

Роботи [102], [103], [104], [111], [137], [138], [176], [183], [201], [202] виконані автором самостійно.

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

[21], [57] – забезпечення технологічних процедур щодо модернізації суднової паливної системи, виконання експериментальних досліджень та аналіз їх результатів;

[25] – проведення експериментальних досліджень, контроль та регулювання показників роботи суднового дизеля, обробка результатів експерименту, розробка рекомендацій щодо подальших досліджень;

[56], [67] – проведення інформаційного пошуку, модернізація суднової паливної системи з урахуванням можливості використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження, проведення експериментальних досліджень, обробка результатів та розробка рекомендацій щодо подальших досліджень;

[109], [112] – проведення експериментальних досліджень під час експлуатації суднових дизелів з використанням паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження;

[110], [175], [192] – проведення експериментальних досліджень та визначення оптимальних режимів роботи суднових дизелів під час використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження;

[168], [182] – модернізація суднової паливної системи з урахуванням можливості використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, розробка та погодження технології проведення експерименту, проведення досліджень та аналіз отриманих результатів;

[196], [203] – розробка та погодження технології проведення експериментів, виконання досліджень та аналіз їх результатів, розробка рекомендацій щодо подальшого використання мастила в системі мащення;

[209] – проведення та обробка результатів випробувань.

Апробація результатів дисертаційної роботи здійснювалась через їх доповідання, обговорення, погодження та ухвалення на наступних міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, що проводили в провідних морських вишах України:

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

X-й Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4-5 листопада 2021 р., Національний університет кораблебудування, Миколаїв;

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;

I-й міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології засобів транспорту», 23-24 вересня 2021 р., Харків-Миргород, Український державний університет залізничного транспорту;

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

Науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 - 23.03.2023 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 «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 року, Херсон, Херсонська державна морська академія;

IV-й міжнародній науково-практичній конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р., Київ, Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій;

V-й міжнародній морській науково-практичній конференції кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації Одеського національного морського університету «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2024», 05 березня 2024 р., Одеса, Одеський національний морський університет;

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 25 наукових праць, з яких 11 – 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; 2 – в іноземних виданнях, 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.

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 271 сторінка, зокрема: основний текст 158 сторінок з анотацією на 20 сторінках, перелік використаних джерел із 209 найменувань на 30 сторінках, додаток на 7 сторінках, 40 рисунків, 44 таблиці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗАСОБІВ МОРСЬКОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Перший розділ дослідження відображає результати інформаційного пошуку науково-прикладних досліджень, які присвячені вивченню можливих шляхів розв'язання завдання забезпечення експлуатаційних показників засобів морського та внутрішнього водного транспорту під час використання нафтових палив.

Основні результати розділу 1 наведені в джерелах [21], [25], [56], [57], [67], [102], [103], [104], [109], [110], [111], [112], [137], [138].

1.1. Загальна характеристика засобів морського та внутрішнього водного транспорту

Засоби морського та внутрішнього водного транспорту забезпечують перевезення вантажу та пасажирів, а також використовуються під час:

- буксирування суден та плавучих об'єктів,
- проведення спеціальних робіт з поглиблення та розширення морських та річкових фарватерів,
- виконання гідротехнічних, гідрографічних та дослідницьких робіт,
- забезпечення видобування корисних копалин, що знаходяться на континентальному шельфі та морському дні,
- прокладення морських кабелів та трубопроводів,
- охорони державного кордону.

Ці функції виконуються в акваторіях морських та річкових портів; на внутрішніх водних шляхах; у прибережних морських районах; внутрішніх, окраїнних, міжострівних, середземних морях, а також океанах.

Європейські країни постійно розвивають транспорт та транспортну інфраструктуру, в тому числі морський та внутрішній водний транспорт. Судноплавні компанії Європи, такі як: Maersk (Данія), Mediterranean Shipping Company (Швейцарія), CMA CGM (Франція), – будують або замовляють на азіатських суднобудівних верфях сучасні судна, які відповідають вимогам американських та європейських класифікаційних товариств і здатні працювати в будь-яких акваторіях Світового океану. Потужність енергетичних установок цих суден може досягати 80000...100000 кВт, а швидкість руху – 25...27 вузлів.

На суднах морського та внутрішнього водного транспорту як теплові двигуни використовуються паротурбінні, газотурбінні та дизельні установки. Паротурбінні установки (які включають до свого складу паровий котел і парову турбіну) встановлюються на морських танкерах і суднах типу LNG – Liquid Natural Gas Carrier / Tanker та LPG – Liquid Petroleum Gas Carrier / Tanker дедвейтом 75000...80000 тонн та більше. Газотурбінні установки зазвичай використовуються на пасажирських суднах і виконують функції допоміжних двигунів – забезпечуючи електричною енергією суднові споживачі. Дизелі встановлюються на всіх без винятку суднах, незалежно від їх типу та дедвейту та виконують функції як головних, так і допоміжних двигунів [15, 16]. У першому випадку їх потужність забезпечує рух судна, у другому – їх корисна механічна енергія перетворюється на електричну енергію генераторів, забезпечуючи функціонування судових допоміжних механізмів і систем [17, 18].

Засоби морського та внутрішнього водного транспорту забезпечують перевезення пасажирів та транспортування вантажів між морськими та річковими портами, що розташовані в межах однієї країни, різних країнах, а також різних континентах. В залежності від вантажу, який транспортується,

як засоби морського та внутрішнього водного транспорту використовуються судна, що призначені для перевезення:

- генеральних вантажів / General Cargo (при цьому їх водотоннажність становить 30000...40000 тонн, потужність головної енергетичної установки – 10000...12000 кВт);

- навалювальних вантажів / Bulk Carrier (водотоннажність яких досягає 100000...120000 тонн, потужність головної енергетичної установки – 18000...20000 кВт);

- сирої нафти та нафтопродуктів Oil Product / Crude Oil / Chemical Tanker (з водотоннажністю до 300000...350000 тонн та потужністю головного двигуна 18000...20000 кВт);

- скраплених вантажів / liquefied natural gas – LNG – та Liquefied petroleum gas – LNG (обсяг вантажних танків яких досягає 250000 м³, потужність головного двигуна 30000...35000 кВт);

- контейнерів / Container Ship (здатних до перевезення 20000 контейнерів, обладнаних головною енергетичною установкою до 80000 кВт);

а також круїзних суден, спеціалізованих морських суден (класів ролкери Ro-Ro та Lo-Ro, лісовози, рефрижератори), спеціальних суден (пороми, буксири, судна-постачальники нафтовидобувних платформ, судна для проведення кабелів та заведення якорів та інші) та суден технічного флоту.

Як головні двигуни (ГД) на більшості суден морського та внутрішнього водного транспорту використовуються двигуни внутрішнього згоряння, в яких через впорскування палива у високотемпературне повітряне середовище здійснюється його самозаймання, горіння та перетворення кінетичної енергії продуктів згоряння на корисну роботу та обертання колінчатого валу та гребного гвинта, яким може бути гвинт фіксованого кроку, або гвинт, крок якого регулюється. Найбільшого поширення у функції ГД отримали судові малообертові дизелі (МОД), що працюють за двотактним циклом, які встановлюються на судах майже будь-якої водотоннажності. Провідні

дизелебудівні концерни (MAN-Diesel&Turbo, Mitsubishi Heavy Industries, Wartsila-Sulzer) випускають двотактні дизелі з діаметром циліндра від 0,26 м до 0,98 м та кількістю циліндрів від 5 до 14, які забезпечують потужність у діапазоні 1500...88000 кВт [19 20].

На деяких типах засобів морського транспорту (суднах класу Container Ship, Ro-Ro, Lo-Ro та на спеціальних суднах) функції ГД виконують чотиритактні середньообертові дизелі (СОД). Ці дизелі випускаються в рядному та V-подібному виконанні та забезпечують судновий пропульсивний комплекс (СПК) потужністю в діапазоні 1500...20000 кВт. Провідними фірмами, що постачають на судна морського та внутрішнього водного транспорту подібні дизелі є Caterpillar Marine Power Systems, The Hanshin Diesel Works, Hyundai Heavy Industries, MAN-Diesel&Turbo, Mitsubishi Heavy Industries, SEMT Pielstick (як ліцензіат MAN Diesel Group), Wartsila-Sulzer [21, 22].

Як допоміжні двигуни (ДД) у суднових енергетичних установках використовуються чотиритактні СОД, кількість яких у складі суднових енергетичних установок (СЕУ) становить від 2-х до 4-х. Залежно від призначення та водотоннажності судна потужність ДД може знаходитися в діапазоні 350...4500 кВт. Також як ДД на деяких типах суден встановлюють високообертові дизелі (ВОД) з потужністю до 1500 кВт [23, 24].

Суднові дизельні установки порівняно з іншими (газотурбінними та паротурбінними) відрізняються меншою витратою палива (визначеною в будь-яких одиницях – кг/(кВт·год), кг/год або кг/миля) та більшим ефективним ККД. Питома витрата палива сучасних суднових дизелів знижена до значень 0,168...0,170 кг/(кВт·год) з одночасним підвищенням ефективного ККД до 54...56 %, обидва цих значення на 10...15 % у позитивний бік відрізняються від аналогічних показників інших теплових двигунів. Саме тому дизелі займають домінуюче положення на всіх без винятку типах суден морського та внутрішнього водного транспорту, незалежно від їх водотоннажності та призначення.

1.1.1. Енергетичні показники засобів морського та внутрішнього водного транспорту

Основним функціональним призначенням будь-якого теплового двигуна, що встановлений на будь-якому засобі транспорту, є отримання корисної роботи. Стосовно суден морського та внутрішнього водного транспорту в подальшому ця робота трансформується або в крутний момент гребного гвинта (в разі коли цей двигун виконує функції головного), або в потужність електричного генератора (в разі, коли двигун використовується як допоміжний).

Енергетична ефективність кругового циклу двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) визначається середнім ефективним тиском p_e , що діє на поршень під час робочого ходу; ефективною потужністю N_e , яка передається від вала дизеля до гвинта, генератора або іншого споживача енергії; та крутним моментом $M_{кр}$, що характеризує спроможність дизеля до обертання гребного гвинта або електрогенератора [25, 26].

Під час теоретичного розрахунку робочого циклу дизеля ці показники визначаються за виразами:

$$p_e = L_e / V_S,$$

$$N_e = \frac{V_S z n i}{60} p_e,$$

$$M_{кр} = \frac{30 N_e}{\pi n},$$

у яких L_e – середня ефективна робота в одному циліндрі дизеля за цикл, кДж/цикл;

V_S – корисний об'єм циліндра, м³;

n – частота обертання колінчатого валу, об/хв (хв⁻¹);

z – коефіцієнт тактності дизеля;

i – кількість циліндрів [27-29].

Під час експлуатації ДВЗ середній ефективний тиск p_e визначається або через середній індикаторний тиск p_i (який своєю чергою вимірюється через індіціювання дизеля), або через ефективну потужність N_e (яка визначається через момент скручування вала за допомогою торсіометру – у випадку роботи дизеля на гвинт, або через потужність генератора – у випадку роботи дизеля як привід електрогенератора).

Посередніми показниками, що характеризують ефективність роботи ДВЗ, є тиск наприкінці стиснення p_c , максимальний тиск згоряння p_z та середній тиск за часом p_t . Визначення цих показників забезпечується за допомогою засобів діагностування робочого циклу [30, 31].

До енергетичних показників суднового пропульсивного комплексу відносяться корисна тяга гребного гвинта

$$P_e = \frac{k_1 \rho n_s^2 D^4 (1-t)}{1000},$$

буксирувальна потужність судна

$$N_6 = \frac{2\pi k_2 \rho n_s^3 D^5}{1000 \eta_{вл}}$$

та пропульсивний ККД судна

$$\eta_{пу} = \frac{N_6}{N_e \eta_{вл} \eta_{пер}},$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти упору та моменту гребного гвинта відповідно;

ρ – густина морської води, кг/м^3 ;

n_s – частота обертання гребного гвинта, об/с ;

D – діаметр гребного гвинта, м ;

t – коефіцієнт засмоктування.

$\eta_{вл}, \eta_{пер}$ – ККД валопроводу та передачі відповідно [32, 33].

1.1.2. Економічні показники засобів морського та внутрішнього водного транспорту

Економічні показники роботи ДВЗ перш за все визначаються витратою палива, яке необхідно для отримання необхідної потужності, а також ККД.

Витрата палива для судових котельних установок, а також для судових газотурбінних установок вимірюється в кг/с, та далі ці значення є базовими для подальшого порівняння між собою паропродуктивності котлів або потужностей газових турбін, а також визначення необхідного об'єму палива для забезпечення навігаційного переходу.

Стосовно ДВЗ розмірність кг/с (точніше кг/год, або годинна витрата палива) використовується лише для оцінки або розрахунку об'єму палива, яке необхідно отримати під час бункерування судна [34, 35]. Для оцінки економічної ефективності режимів роботи дизеля, визначення найбільш економічних режимів, а також з метою порівняння між собою економічних характеристик різних дизелів використовують питому витрату палива, що вимірюється в кг/(кВт·год) – як відношення годинної витрати палива B_r до ефективної потужності дизеля N_e

$$b_e = B_r / N_e.$$

У сучасних двотактних дизелях значення питомої витрати палива b_e не перебільшує 0,175...0,178 кг/(кВт·год); у чотиритактних дизелях – 0,180...0,185 кг/(кВт·год).

Під час відхилення режиму роботи дизеля від номінального питома витрата палива змінюється. Мінімальне значення b_e для судових дизелів зазвичай досягається за частотою обертання, що відповідає 80...90 % від номінального значення.

Для суднових дизелів дуже важливим є забезпечення низької питомої ефективної витрати палива на режимах, не тільки близьких до номінального, а й малих навантажень. Це досягається в результаті ретельного налагодження систем газообміну, наддуву, подачі палива і вдосконалення процесів сумішоутворення і згоряння палива.

На значення b_e суттєво впливає технічний стан паливної апаратури високого тиску та газовипускної системи дизеля. Знос контактуючих деталей та сопел форсунки, підвищений знос в прецизійній парі плунжер-втулка паливного насоса високого тиску сприяють підвищенню протічок палива та відповідно зменшенню кількості палива, що впорскується в циліндр дизеля. Відкладення в газоповітряному тракті та лопатках газотурбокомпресора, а також засмічення його повітряного фільтра зменшує кількість повітря, що потрапляє в циліндр та підвищує аеродинамічний опір в газоповітряному тракті, що призводить до підвищення питомої ефективної витрати палива.

Питома витрата палива під час розрахунку та аналізу робочого циклу дизеля може бути визначена за рівнянням економічності, яке відображає вплив основних показників на цю величину

$$b_e = \frac{3600 p_s \eta_n \eta_m}{\mu_s R_s \alpha L_0 T_s p_i},$$

де p_s – тиск повітря в продувному ресивері, МПа;

η_n – коефіцієнт наповнення циліндра свіжим повітрям;

η_m – механічний ККД дизеля;

μ_s – молярна маса 1 кг повітря, кг/кмоль;

R_s – газова постійна повітря, кДж/(кг·К);

α – коефіцієнт надлишку повітря;

L_0 – теоретичне необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг палива, кмоль/кг;

T_s – температура повітря в продувному ресивері, К;

p_i – середній індикаторний тиск, МПа [27, 36].

Економічність роботи суднового пропульсивного комплексу може бути оцінена за витратою палива на одиницю пройденого шляху, наприклад, за милю плавання – кг/миля. Але отримані при цьому величини необхідно порівнювати лише для суден одного призначення та під час здійснення схожих навігаційних переходів.

Ефективний ККД судових дизелів визначається як відношення кількості теплоти, що перетворилась на ефективну роботу на валу L_e , до кількості теплоти, що була підведена до дизеля $Q_{\text{підв}}$ для здійснення цієї роботи:

$$\eta_e = L_e / Q_{\text{підв}}.$$

Виразивши ефективну роботу L_e через ефективну потужність N_e

$$L_e = 3600 N_e,$$

а кількість підведеної теплоти $Q_{\text{підв}}$ через нижчу теплотворну здатність палива Q_H та питому витрату палива b_e

$$Q_{\text{підв}} = b_e Q_H,$$

вираз для визначення ефективного ККД запишемо у вигляді

$$\eta_e = \frac{3600}{b_e Q_H}.$$

Значення ефективного ККД для сучасних двотактних дизелів досягають значення 0,53...0,55, для чотиритактних – 0,45...0,48 [37, 38].

1.1.3. Екологічні показники засобів морського та внутрішнього водного транспорту

Засоби морського та внутрішнього водного транспорту є генераторами та перевізниками забруднюючих речовин, що утворюються під час здійснення транспортної роботи. Основними джерелами, що забруднюють довкілля під час експлуатації суден, є випускні гази (ВГ), що утворюються під час здійснення робочого циклу в будь-якому тепловому двигуні (дизелі, паровому котлі або газовій турбіні), продукти очищення палива та мастила, що утворюються в результаті попередньої підготовки палива та мастила до використання в дизелях, а також залишки нафтопродуктів, що потрапляють до суднових лляльних вод [39, 40].

Експлуатація суднових дизелів супроводжується неминучим забрудненням довкілля ВГ, до складу яких входять токсичні компоненти – оксиди сірки SO_x , азоту NO_x та вуглецю CO. Оксиди сірки SO_x та азоту NO_x у подальшому конденсуються в повітрі та перетворюються в кислоти, які повертаються на поверхню Світового океану, острівну або материкову частину Землі [41, 42]. Монооксид вуглецю CO залишається в атмосфері та руйнують озоновий шар, діоксид вуглецю CO_2 зменшує енергетичну ефективність судна [43, 44].

У зв'язку з цим всі провідні Світові країни розвивають наукові дослідження, що спрямовані на зменшення негативного впливу засобів транспорту (авіаційного, автомобільного, залізничного, морського та внутрішнього водного) на довкілля.

Оксиди сірки, що позначаються SO_x , є збиральним поняттям, що включає наступні поєднання різновалентної сірки та кисню: закис сірки S_2O , монооксид SO, діоксид SO_2 , триоксид SO_3 . У той час, як на процес утворення в результаті згоряння палива деяких шкідливих з'єднань та небезпечних складових, що входять до складу випускних газів, можливо впливати через

спеціальну організацію процесів, що перебігають в циліндрі та газовипускній системі, викиди компонентів, що містять з'єднання сірки, залежать та визначаються вмістом сірки в паливі. Сірка, що знаходиться в паливі, не видаляється під час його сепарування або фільтрування. Гідродинамічні та ультразвукові методи обробки палива сприяють лише подрібненню сірковмісних сполук, що забезпечує більш якісну роботу паливної апаратури високого тиску та інтенсифікують процес згоряння палива, при цьому сірка залишається в загальному обсязі палива, окислюється та утворює вищеперелічені з'єднання SO_x . Оксиди сірки відносяться до токсичних компонентів ВГ суднових ДВЗ [45, 46].

До поняття оксиди азоту, що позначається як NO_x , входять п'ять основних з'єднань азоту та кисню, які негативно впливають на довкілля (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

З'єднання азоту та кисню та їх екологічні характеристики

Позначення	Найменування	Вплив на довкілля
N_2O	Закис азоту	Не утворює солей. Відноситься до парникових газів. Руйнує стратосферний озон
NO	Монооксид азоту	Не взаємодіє з водою. З'єднується з киснем та утворює NO_2 , який в подальшому перетворюється на азотисту кислоту HNO_2
N_2O_3	Триоксид діазоту	Взаємодіє із водою. Утворює азотисту кислоту HNO_2
NO_2	Діоксид азоту	Взаємодіє із водою. Утворює азотисту HNO_2 та азотну HNO_3 кислоти
N_2O_5	Пентаоксид діазоту	Розчиняється у воді. Утворює азотну кислоту HNO_3

За механізмом утворення відрізняють термічні та швидкі NO_x (що утворюються з азоту, який знаходиться в повітрі), а також паливні NO_x (що утворюються з азоту, який входить до складу палива). Оксиди азоту NO_x відносяться до токсичних компонентів ВГ та є найбільш небезпечними зі всіх шкідливих домішок, що потрапляють в атмосферу.

Особливо гострою проблема забезпечення екологічності суднових ДВЗ за викидами оксидів азоту NO_x стала для чотиритактних дизелів через використання в них важких та середньоважких моторних палив. Скорочений (порівняно з двотактними дизелями) час перебігу робочого циклу цих дизелів призводить до окислення азоту у випускному колекторі (в умовах знижених температур). Це зсуває механізм утворення оксидів азоту з швидкого до теплового, що сприяє збільшенню їх загальної кількості у ВГ. Це зумовлює необхідність постійного контролю вмісту оксидів азоту у ВГ, особливо під час знаходження суден у спеціальних екологічних зонах або в прибережних акваторіях [47, 48].

Оксиди вуглецю, що утворюються в циліндрі дизеля під час згоряння палива, поділяються на монооксид вуглецю (угарний газ) CO , що є токсичним з'єднанням, та діоксид вуглецю (вуглекислий газ) CO_2 , що являє собою кислотний оксид вуглецю та відноситься до парникового газу.

Протягом тривалого часу залишається відкритим питання, як скоротити викиди вуглекислого газу, який є основним парниковим газом, що викидається з суден. На скорочення викидів вуглекислого газу не вдається вплинути зміною умов робочого процесу в циліндрах двигуна, як це використовується для скорочення викидів NO_x (наприклад, впорскуванням води в продувний ресивер або безпосередньо в циліндр). Також на кількість викидів CO_2 не впливає також попередня обробка палива, як це виконується для зниження викидів SO_x (наприклад, використання ультразвукової обробки). Під час спалювання певного типу суднового палива в атмосферу викидається відповідна кількість вуглекислого газу, яка оцінюється за

безрозмірним коефіцієнтом приведення витрат палива до викидів CO_2 до визначеного палива – $\text{tCO}_2/\text{т}$.

До токсичних складових ВГ також відносяться продукти неповного згоряння палива: альдегіди (органічні з'єднання, що містять альдегідну групу $-\text{CH}-\text{O}$), незгорілі вуглеводні C_nH_m (найбільш небезпечним з яких є бензол C_6H_6), сажа (чорний вуглець) С.

Незгорілі вуглеводні та чорний вуглець утворюються в кінцевій частини впорскування та горіння палива як правило безпосередньо поблизу розпилювачів форсунок. За масою незгорілі вуглеводні та чорний вуглець перебільшують інші складові ВГ, тому перш за всіх інших компонентів осаджуються на водневій та материковій поверхні.

Викиди незгорілих вуглеводнів та чорного вуглецю в атмосферу сприяють глобальному потеплінню двояким чином – прямо, впливаючи на поглинаючу здатність атмосфери, та побічно, прискорюючи танення льоду і снігу, на яких ці викиди осідають. Останнє особливо актуально для Арктики, де щорічно збільшується судновий трафік, отже, зростає кількість шкідливих викидів.

Міжнародною директивою, що захищає полярні регіони від морських загроз, є Міжнародний кодекс для суден, що плавають у полярних водах (International Code for Ships Operating in Polar Waters) – «Полярний кодекс». Полярний кодекс набув чинності 1 січня 2017 року та представляє нові правила охорони життя на морі та запобігання розповсюдженню забруднюючих речовин із суден. Вимоги, викладені у Кодексі, повинні виконуватись усіма суднами, що плавають у складних умовах полярних регіонів. Кодекс був створений через морський транспорт, що розвивається, в полярних регіонах, зростання якого прогнозується найближчими роками. Суворі вимоги Кодексу мають сприяти мінімізації негативного впливу судноплавства на вразливе полярне середовище [49, 50].

1.2. Вимоги Міжнародних конвенцій та класифікаційних товариств щодо екологічності роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту

Екологічна безпека роботи морських суден регламентується вимогами міжнародних конвенцій (якими зокрема є The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – MARPOL та International Convention for the Safety of Life at Sea – SOLAS) та контролюється міжнародними організаціями (зокрема International Maritime Organization – IMO та Environmental Protection Agency, EPA). У даний час спеціальні державні організації (Port State Control) здійснюють контроль за екологічністю роботи морських суден у всіх портах Європи, а також у більшості портів світу. У разі невідповідності судна, енергетичної установки або палива екологічним нормам з боку Port State Control можуть бути введені штрафні санкції, у тому числі затримання судна в порту стоянки [52, 53].

Під час експлуатації суден морських та річкових засобів транспорту з боку класифікаційних товариств (насамперед Регістру судноплавства України) здійснюється постійний нагляд та контроль за корпусом судна, палубним та навігаційним обладнанням, а також за енергетичною установкою. При цьому контролюється не лише ходові характеристики судна, технічний стан обладнання та енергетичні показники суднової енергетичної установки (головної, що забезпечує рух судна, та допоміжної, що постачає електричну та теплову енергію судновим споживачам), але також екологічність роботи суднового пропульсивного комплексу.

Експлуатація суден морського та внутрішнього водного транспорту повинна виконуватися з суворим забезпеченням вимог Міжнародної конвенції МАРПОЛ щодо попередження забруднення довкілля. Ця конвенція поруч з додатками, що регламентує викиди нафти, шкідливих рідких та твердих речовин, стічних вод та сміття, обмежує викиди в повітряне

середовище. Стосовно судових ДВЗ до цієї категорії викидів відносяться оксиди азоту NO_x та оксиди сірки SO_x .

Емісія оксидів азоту NO_x з випускними газами дизелів морського та внутрішнього водного транспорту регламентується вимогами Додатку VI МАРПОЛ. Ці вимоги висуваються до кожного судового дизельного двигуна вихідної потужності понад 130 кВт, встановленому на судні, за винятком судових дизельних двигунів, призначених для використання виключно в аварійних ситуаціях, або встановлених на рятувальних шлюпках. Відповідно до рівня Tier-I, Tier-II, Tier-III (які відносяться до дизелів суден, побудованих після 2000, 2011 та 2016 років відповідно) максимальна кількість NO_x у випускних газах не повинна перевищувати значень, що визначаються за спеціальними виразами (рис. 1.1) [54, 55].

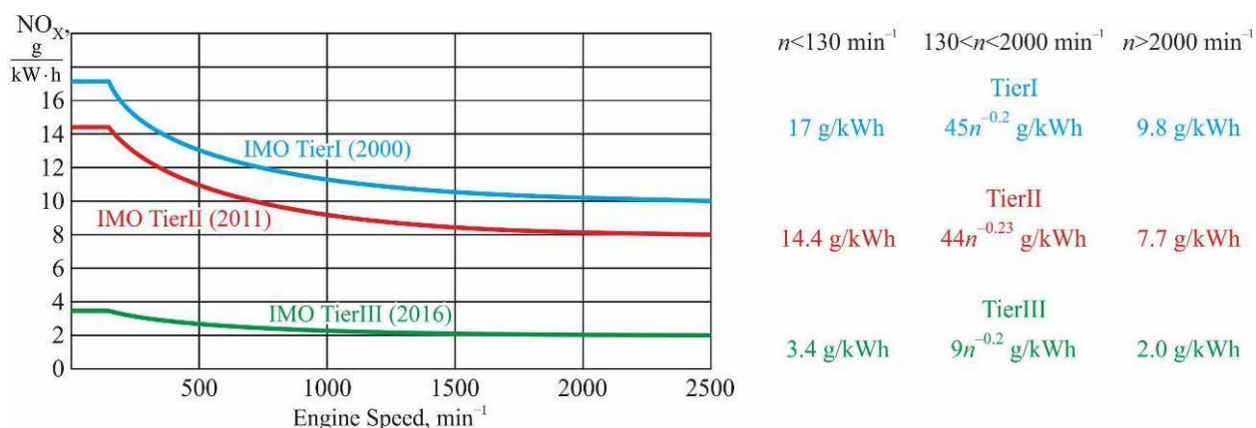


Рис. 1.1. Вимоги Додатку VI МАРПОЛ до кількості NO_x у випускних газах судових дизелів

Емісія оксидів сірки SO_x лімітується вмістом сірки в моторному паливі, що використовується під час експлуатації ДВЗ. Відповідно до вимог Додатку VI МАРПОЛ вміст сірки в судовому паливі, яке використовується або транспортується для подальшого використання на судні, не повинен перевищувати 0,5 % за масою.

До особливостей експлуатації ДВЗ суден морського та внутрішнього водного транспорту належить їх періодична (залежно від виконуваного

транспортного завдання) робота у спеціальних екологічних районах контролю викидів оксидів сірки – Sulfur Emission Control Areas (SO_x -ECAs, або SECAs) та оксидів азоту – Nitrogen Emission Control Areas (NO_x -ECAs, або NECAs). Кордоні цих районів схвалюються Міжнародною морською організацією – ІМО. Під час експлуатації дизеля в таких районах можливо використання суднового палива із вмістом сірки, як документально оформлено накладними на поставку бункерного палива, що не перевищує граничного значення 0,1 % за масою. До особливих районів контролю викидів відносяться район Балтійського моря та район Північного моря, Північноамериканський район, район Карибського моря Сполучених Штатів, а також деякі територіальні (морські та внутрішні) води Китаю та Північної Кореї. Як приклад цих районів на рис. 1.2 надана акваторія Північної Європи.

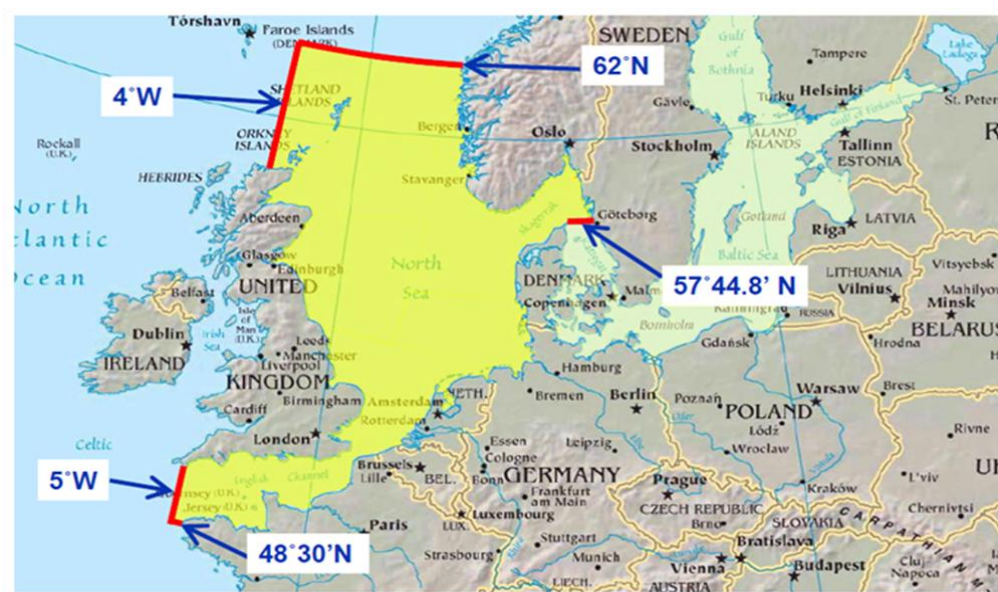


Рис. 1.2. Особливі екологічні райони Північної Європи

Морські, прибережні та континентальні райони Північної Європи характеризуються високою вологістю, зниженою температурою, високою інтенсивністю вітру. Це прискорює перетворення оксидів азоту NO_x в азотну кислоту HNO_3 та її подальше випадання з природними опадами (дощем та снігом) на поверхню землі та моря. Інтенсивні вітри сприяють поширенню токсичних компонентів випускних газів великої території. Тому райони, наведені на рис. 1.2, відносять до особливих екологічних районів і

приділяють підвищену увагу суднам морського транспорту під час роботи в них [56, 57].

Максимальне значення емісії оксидів сірки не повинно перевищувати відношення діоксиду сірки SO_2 до діоксиду вуглецю CO_2 (таблиця 1.2), при цьому використання палива, вміст сірки в якому перевищує 0,5 %, можливе лише у разі застосування додаткових технологій з очищення випускних газів від сірчистих домішок [58, 59].

Таблиця 1.2

Вимоги з обмеження вмісту оксидів сірки у випускних газах суднових дизелів

Вміст сірки в паливі, масові %	Відношення викидів SO_2/CO_2 , ppm/об'ємні %
3,50	151,7
1,50	65,0
1,00	43,3
0,50	21,7
0,10	4,3

Вимоги ІМО щодо викидів оксидів сірки регламентуються Резолюцією МЕРС.340(77), що прийнята 26.11.2021 р., «Щодо систем очищення випускних газів», Резолюцією МЕРС.324(75), що прийнята 20.11.2020 р., «Процедури відбору проб та перевірки вмісту сірки в судновому паливі», Резолюцією МЕРС.305(73), що прийнята 26.10.2018 р., «Заборона на перевезення суднового палива, що не відповідає вимогам, призначеного для згоряння з метою забезпечення руху або експлуатації судна» [60-62].

Викиди діоксиду вуглецю CO_2 позиціонуються насамперед з позиції обмеження його негативного впливу на глобальне потепління. За масовою кількістю вуглекислий газ займає перше місце серед усіх шкідливих викидів, що потрапляють в атмосферу в результаті робочого процесу в циліндрі дизеля. Кількість CO_2 , яку викидають у повітря СЕУ, впливає на енергетичну

ефективність судна. У 2013 р. набули чинності розроблені ІМО правила управління енергоефективністю судна. Ці правила як нормативні положення включені до Додатка VI Конвенції МАРПОЛ 73/78 [63, 64]. При цьому ІМО затвердило посібник з розробки плану управління енергоефективністю судна (ПУЕС) або Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), який вимагає виконання наступного:

- для кожного нового судна валовою місткістю понад 400 т повинні бути розраховані необхідний та допустимий конструктивний коефіцієнт енергетичної ефективності (ККЕЕ) або Energy Efficiency Design Index (EEDI), величини яких не повинні перевищувати обмеження, встановлені резолюцією МЕРС.203(62) [65];

- на кожному існуючому та новому судні валовою місткістю понад 400 т повинен бути та виконуватись індивідуальний SEEMP, який можна включити до суднової системи управління безпекою (у зв'язку з тим, що він спрямований на зниження викидів парникових газів) [66].

Починаючи з 01.01.2019 р всі судна валовою місткістю 5000 і більше мають збирати та надавати дані щодо витрат палива відповідно до методології, включеної до ПУЕС.

Вимоги ІМО щодо енергетичної ефективності повинні забезпечуватись усіма морськими суднами, що здійснюють міжнародні перевезення, а також суднами класу «річка-море», які здійснюють транспортні перевезення за межі територіальних вод держави, якій вони належать. Вимоги ІМО відносно ККЕЕ повинні виконуватися всіма судновласниками незалежно від форми власності (за винятком військових суден).

У загальному вигляді формулу розрахунку ККЕЕ можна подати так:

$$ККЕЕ = \frac{\text{кількість викидів } CO_2}{\text{виконана транспортна робота}} \cdot$$

Кількість викидів CO_2 визначається за витраченим за рейс паливом певного гатунку. У свою чергу, витрата палива СЕУ базується на потужності двигунів пропульсивного комплексу на певному експлуатаційному режимі та

інших споживачів палива на судні. Проведена транспортна робота судном визначається його конструктивними особливостями, обсягом вантажних відсіків та швидкістю судна, заміряною за умови максимального завантаження по літню вантажну марку та 75 % потужності ГД.

Судноплавна компанія розробляє для кожного судна план керування енергоефективністю судна з використанням експлуатаційного коефіцієнта енергетичної ефективності (ЕКЕЕ) або Energy Efficiency Operational Index (EEOI), який є інструментом оцінки рівня викидів діоксиду вуглецю СЕУ. Вимоги ІМО щодо EEOI включені до Посібника з використання експлуатаційного показника енергетичної ефективності МЕРС.1/Circ.684, яке рекомендує EEOI як ефективний інструмент для обмеження впливу судноплавства на глобальну зміну клімату.

Експлуатаційний коефіцієнт енергетичної ефективності виражає кількість CO₂, викинутого в атмосферу СЕУ на одиницю транспортної роботи, виробленої судном:

$$EEOI = \frac{M_{CO_2}}{\text{транспортна робота}},$$

де викиди CO₂ визначаються на основі витрат палива (M_{CO_2} – маса викидів CO₂); транспортна робота – як маса вантажу, тонн, помножена на загальну пройдену відстань, що вимірюється в морських милях.

Маса викидів CO₂ визначається за кількістю палива певного гатунку, витраченого СЕУ протягом рейсу. У свою чергу витрата палива СЕУ базується на потужності двигунів, що входять до складу пропульсивного комплексу на експлуатаційному режимі, що відповідає 75 % навантаження, а також потужності допоміжної енергетичної установки судна.

Проведена транспортна робота судна визначається його дедвейтом та швидкістю судна, що відповідає 75 % потужності головних двигунів.

EEOI для рейсу розраховується за такою формулою, в якій менше значення EEOI відповідає більш енергоефективному судну:

$$EEOI = \frac{\sum FC_{ij} \cdot C_{Fj}}{m_{\text{cargo}} \cdot D_i},$$

де FC_{ij} – маса палива, що споживається j головними та допоміжними двигунами, котлами та іншими споживачами, як записано в машинному журналі, у рейсі i , тонн;

CF_j – безрозмірний переводний коефіцієнт приведення витрати палива до викидів CO_2 для палива j , тонн CO_2 /тонн;

m_{cargo} – маса вантажу, що перевозиться відповідно до транспортної накладної та журналу вантажних операцій, тонн;

D_i – пройдена судном відстань для рейсу i , як записано в судовому журналі, миля.

Коефіцієнт ККЕЕ / EEDI поєднує в оцінці енергоефективності суден викиди шкідливих речовин та обсяги перевезень ($\text{гCO}_2/\text{т}\cdot\text{міля}$), що оцінюється за формулою (1.1) у вигляді

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

$$+ \frac{\left[\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right]}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} -$$

$$- \frac{\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}, \quad (1.1)$$

у якій основними складовими є:

V_{ref} – швидкість судна;

$Capacity$ – водотоннажність судна;

f_i, f_j, f_w – фактори, що враховують вплив водотоннажності, особливостей конструкції та умов хвилювання та вітру відповідно;

$P_{ME(i)}$ – розрахункова потужність головного двигуна, що дорівнює 75 % від його номінальної потужності за вирахуванням потужності, що споживається валогенератором (у разі його наявності);

P_{AE} – розрахункова потужність допоміжних двигунів;

$SFC_{ME(i)}$, SFC_{AE} – питома ефективна витрата палива головними та допоміжними двигунами;

$C_{FME(i)}$, C_{FAE} – викиди CO_2 головними та допоміжними двигунами.

Максимально допустиме значення KKEE / EEDI визначається за виразом

$$EEDI_{\max} = a_i \cdot Dw_{(i)(j)}^{-c_i},$$

в якому a_i , c_i – емпіричні коефіцієнти для відповідного типу судна ($i=1\dots7$, балкер, газовоз, танкер, контейнеровоз, універсальне, рефрижераторне, комбіноване) [65].

Судно вважається енергоефективним, коли значення EEDI не перевищує $EEDI_{\max}$.

Оцінивши ефективність обов'язкового визначення EEDI, ІМО 13.04.2018 р. прийняла Резолюцію МЕРС.304(72) «Первісна стратегія ІМО з зниження викидів парникових газів з суден», яка спрямована на:

- збільшення вкладу ІМО у глобальні зусилля щодо вирішення проблеми викидів парникових газів із суден, що здійснюють міжнародні перевезення. Міжнародні зусилля, спрямовані на вирішення проблеми викидів парникових газів, включають Паризьку угоду та її цілі, а також Порядок денний Організації Об'єднаних Націй у галузі сталого розвитку на період до 2030 року та її циркуляра 13: «Прийняття термінових заходів щодо боротьби зі зміною клімату та його наслідками»; визначення заходів, які мають вживатися міжнародним судноплавним сектором за обставинами при одночасному врахуванні їх наслідків для держав та визнанні найважливішої ролі міжнародного судноплавства у підтримці подальшого розвитку послуг глобальної торгівлі та морського транспорту; збільшення вкладу ІМО у

глобальні зусилля щодо вирішення проблеми викидів парникових газів із суден, що здійснюють міжнародні перевезення;

- зниження середньої вуглецевої місткості міжнародного судноплавства не менше ніж на 40 % до 2030 р. з подальшими зусиллями для досягнення 70 % до 2050 р. порівняно з рівнями викидів CO₂ 2008 р.;

- скорочення загальних щорічних викидів парникових газів від судноплавства не менше ніж на 50 % до 2050 р. порівняно з 2008 р. з одночасним прагненням повністю відмовитися від них у цьому столітті.

Ці цілі мають бути досягнуті за допомогою набору заходів, які застосовуються в короткостроковій, середньостроковій та довгостроковій перспективі. Однак питання про те, які заходи мають бути включені до «кошика», залишається предметом інтенсивних дискусій. Поки що як короткострокові заходи було вирішено включити як поправки до Додатка VI до МАРПОЛ (правило 23-25) індекс енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) як технічний захід та індекс інтенсивності викидів вуглецю (СІІ) як оперативний захід [68].

Паралельно із цим законодавством у деяких регіонах світу почали з'являтися ще більш амбітні правила. ЄС, підтримуючи прогрес ІМО у скороченні вуглецевих викидів від судноплавства, вирішив створити свій власний режим регулювання в цій галузі. У липні 2021 р. було прийнято Європейський закон про клімат, що закріплює нові кліматичні цілі ЄС щодо скорочення викидів парникових газів не менше ніж на 55 % до 2030 р. порівняно з рівнями 1990 р. та до 2050 р. опубліковано пакет взаємопов'язаних законодавчих пропозицій різних секторів економіки ЄС, у тому числі морського транспорту, відомий як пакет “Fit for 55” [69]. Він включає як поправки до існуючих нормативних актів, так і нові заходи, цілі та інструменти. Що стосується судноплавства, – очікується, що пакет буде включати положення, спрямовані безпосередньо на скорочення викидів у цьому секторі, такі як:

1) посилення обмежень на викиди CO₂, пов'язані з судноплавством у територіальних водах ЄС;

2) рішення щодо збільшення використання альтернативних видів палива в судноплавстві та розвиток інфраструктури для бункерування цих видів палива.

У липні 2022 року до Конгресу США було внесено Закон про чисте судноплавство 2022 року, перший окремий закон про декарбонізацію судноплавства. Закон вимагає поступового зниження вуглецевої місткості судового палива з 2027 до 2029 календарні роки принаймні на 20 % нижче за базовий рівень (якість якого визначено 2024 р.) і до 100 % нижче за базовий рівень у 2040 р. і кожен наступний рік.

Є багато паралелей між цими правилами, прийнятими ІМО, ЄС чи США. Незважаючи на деякі відмінності, важливим моментом є те, що всі ці зусилля та правила рухаються в одному напрямку, тобто в напрямку декарбонізації судноплавства. Тим не менш, існують різні шляхи для досягнення масштабів та своєчасності скорочення відповідно до цих правил. Судновласники можуть вибирати з багатьох заходів, таких як зниження швидкості (повільна пара), зміна конструкції корпусу та гребного гвинта, своєчасне прибуття в порт, альтернативні джерела енергії (наприклад, вітер). Крім того, кожна з цих законодавчих рамок прямо підкреслює важливість розробки альтернативних паливних технологій як ключового шляху до скорочення викидів парникових газів, оскільки вони мають особливо сильний потенціал для досягнення рівнів амбіцій, викладених у Вихідній стратегії ІМО щодо викидів парникових газів, а також в інших нормативні акти.

Справді, передбачається, що більше 60% зусиль зі скорочення викидів CO₂ до 2050 р. буде досягнуто за рахунок використання альтернативних видів палива з нульовим вмістом вуглецю та низьким вмістом вуглецю. Однак для того, щоб такі види палива стали життєздатним варіантом, вони повинні бути доступними, рентабельними, сумісними з існуючими та

майбутніми технологіями та відповідати поточним та майбутнім екологічним вимогам.

Використання у засобах транспорту альтернативних видів палива стає все більш важливим саме для дизельних двигунів, через зростання забруднення довкілля, а також кілька соціально-економічних аспектів [70, 71]. У цьому сенсі рослинні олії та тваринні жири є перспективними альтернативами звичайному дизельному паливу. Однак декілька хімічних властивостей мастил і жирів, серед них виділяють висока в'язкість і висока молекулярна маса, спричиняють погане розпилення паливо та його низьку здатність до утворення сумішей з повітрям. Це призводить до неповного згоряння та підвищенню відкладення незгорілого палива на деталях двигуна. Дослідження показали, що одним із способів поліпшення паливних властивостей мастил і жирів є їх переетерифікація. Переетерифікація – це хімічна реакція з використанням спирту в присутності каталізатора, яка відноситься до перетворення органічної кислоти в інший ефір тієї ж кислоти, так званий біодизель. Через цей процес утворюється паливо, яке можна спалювати в циліндрі дизельного двигуна з максимальною ефективністю – без виникнення температурних перенавантажень та за короткий проміжок часу, який відповідає процесу згоряння під час використання дизельного або дистилятного палива. Крім того, кілька досліджень виявили, що під час згоряння цього палива утворюється набагато менше найбільш забруднюючих речовин в порівнянні із стандартне дизельне паливо, серед них CO_2 . Це означає, біодизельне паливо сприяє зменшенню викидів парникових газів порівняно зі звичайним дизельним або дистилятним паливом. Крім того, використання біодизельного палива призводить до значно менших викидів канцерогенних сполук в порівнянні зі звичайними дизельним паливом [72, 73].

Ці сприяє розвитку використання альтернативних видів палива під час експлуатації дизелів морських та річкових засобів транспорту.

1.3. Аналіз структурного та фракційного складу нафтових палив, що використовуються під час експлуатації дизелів морських та річкових засобів транспорту

Отримання енергії та корисної роботи теплових двигунів не можливе без використання рідкого палива [74, 75]. Реалізація сучасних наукових технологій, спрямованих на використання сонячної енергії та енергії вітру стосовно засобів морського транспорту, можлива лише частково. Встановлення сонячних батарей на відкритих палубах потребує їх постійного демонтажу до та після виконання вантажних робіт. Вітрогенератори, жорсткі вітрила та скайт-вітрила збільшують аеродинамічний опір під час зміни гідрометеорологічних умов, а при критичному погіршенні погоди (яке в морських та океанських умовах відбувається постійно) втрачають здатність до управління [76]. Використання акумуляторних батарей на транспортних суднах вимагає постійного відновлення їхньої ємності, що неможливо в умовах тривалих морських переходів [77]. Застосування газоподібного палива можливе лише на обмеженому типі суден (газовозах та деяких танкерах), на яких це паливо перевозиться як вантаж [78]. Таким чином, основним джерелом енергії для суднових енергетичних установок на найближчу перспективу залишиться рідке паливо [79, 80]. При цьому світові потреби в паливі постійно зростають, його природні запаси щорічно знижуються, обсяги видобутку регламентуються країнами-виробниками, вартість транспортування до країн-споживачів постійно підвищується, динаміка цін зазнає стрибкоподібних змін.

Також необхідно враховувати, що країни-споживачі як «рідке паливо» купують сиру нафту. Для отримання дизельного або важкого палива нафту піддають нагріванню, випаровуванню, термічному або каталітичному крекінгу. Ці операції не лише вимагають додаткових фінансових витрат, а й сприяють забрудненню повітряного та водного середовища.

Експлуатація суден морських та внутрішніх водних засобів транспорту під час забезпечення перевезення вантажів та пасажирів не можлива без споживання палива. Найбільш економічним з теплових двигунів, що встановлюються на морських та річкових судах, є дизелі. Порівняно з газовими турбінами та паровими котлами суднові дизелі характеризуються найменшою питомою витратою палива (для сучасних моделей її значення не перевищує $175...180 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ для двотактних дизелів та $190...195 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ для чотиритактних). Найбільш поширеним типом суднового палива є рідке паливо нафтового походження. Використання газоподібного палива, а також його сумішей з рідким паливом знаходить поширення лише на спеціалізованих судах класів LNG та LPG, на які це паливо транспортується як вантаж. При цьому, як правило, його використання можливе впродовж лише «вантажного» переходу. Після розвантаження судна та під час його повернення в баласті експлуатація дизелів здійснюється на рідкому паливі [81, 82].

Палива для суднових дизелів традиційно поділяють на важкі та легкі. Подібна градація пов'язана з їхньою питомою вагою / густиною. Густина важких палив становить $950...980 \text{ кг/м}^3$ (при цьому можливі випадки використання палива густиною понад 1000 кг/м^3). Густина легких – $850...900 \text{ кг/м}^3$. Забезпечити якісне впорскування палива з подібною густиною через розпилювачі форсунок суднових дизелів неможливо. Тому паливо піддається нагріванню, у процесі якого змінюється як густина, так і в'язкість палива. До категорії важких відносяться палива, в'язкість яких за 50°C перевищує $50 \text{ мм}^2/\text{с}$ (у сучасних дизелях використовуються палива з в'язкістю до $500...700 \text{ мм}^2/\text{с}$). Легкі палива характеризуються в'язкістю $2...40 \text{ мм}^2/\text{с}$. Експлуатація суднових дизелів на режимах, що встановилися (під час навантаження $25...105\%$) відбувається на важкому паливі. У цьому діапазоні роботи тепловий стан циліндрової групи дизеля забезпечує концентрацію енергії від стиснення повітря у верхній частині циліндра, що забезпечує надійне самозаймання палива. Температура самозаймання легких

сортів палива нижча, ніж важких. Тому легкі сорти використовуються під час пуску та реверсу дизеля. На цих режимах (через малу частоту обертання валу дизеля) теплова енергія стиснутого повітря розосереджується по всьому циліндру. Це зменшує температуру повітря в момент упорскування палива і може бути причиною відсутності самозаймання палива [83, 84].

Палива нафтового походження, що використовують як джерело енергії теплових двигунів морських засобів транспорту, отримують шляхом дистиляції та крекінг обробки сирової нафти. Це процес пов'язаний з виділенням з нафти різних фракцій, що википають за різною температурою. Діапазон температур, за яким здійснюється википання нафти, знаходиться в широкому інтервалі – 30...400°C. Палива, що отримують за цих умов (так званої прямої перегонки нафти), відносять до палив з легким фракційним складом. Частина нафти, що не википіла за цієї температури, підлягає подальшій обробці за підвищеним тиском та википає за температури 350...700°C. Ці палива (що отримують як результат так званої вторинної перегонки нафти) відносять до палив погіршеного, або важкого, фракційного складу, саме вони складають більшість суднових моторних палив, що постачаються на морські та річкові засоби транспорту.

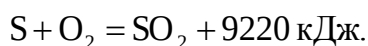
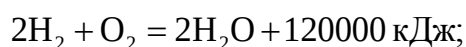
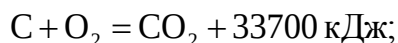
Повною мірою визначити «повний» хімічний склад суднового моторного палива або неможливо, або вкрай важко. За деякими оцінками в паливі знаходиться до 250 хімічних елементів та їх з'єднань. Основними хімічними елементами в складі палива є вуглець (carbon) C, водень (hydrogen) H, сірка (sulphur) S, азот (nitrogen) N, зола (ash) A, волога (water) W.

Структурний склад палива характеризує його нижчу теплоту згоряння Q_H , кДж/кг, – кількість енергії, що виділяється під час повного згоряння 1 кг палива. Визначення Q_H можливо за емпіричним виразом

$$Q_H = 339,15C^p + 1256H^p - 108,86(O^p - S^p) - 25,12(9H^p + W^p),$$

де C^p, H^p, O^p, S^p, W^p – процентний вміст у паливі вуглецю, водню, кисню, сірки та води, відповідно [85].

Горючими компонентами палива є вуглець, водень та сірка. Їх реакції горіння перебігають з виділенням теплоти:



Основною складовою нафтових палив є вуглець, його вміст у паливі знаходиться в межах 82...88 %. Вміст вуглецю у важких паливах та паливах, основу яких складають нафтові продукти вторинної перегонки, вище, ніж в легких паливах первинної перегонки. Вуглецеве паливо в теперішній час є та на найближчі 10...15 років залишиться найбільш розповсюдженим видом палива. Сучасні тенденції на перехід до безвуглецевого палива та кількість виробництва цього палива поки ще не забезпечують потреби енергетики в джерелах енергії. Головним недоліком використання палива, що містить вуглець – є утворення під час згоряння його з'єднання з киснем CO_2 , який є парниковим газом, що сприяє глобальному потеплінню.

Друге місце в паливі за процентною складовою займає водень, вміст якого складає 10...15 % всієї маси палива. Вміст водню у важких паливах менший за вміст в легких. Кількість енергії, що виділяється під час згоряння водню значно перевищує аналогічний показник для вуглецю, тому легкі палива характеризуються більшою теплотворною здатністю порівняно з важкими.

Вуглець та водень є основними складовими палива нафтового походження та саме ці елементи є постачальниками теплової енергії, саме тому ці палива також називають вуглеводними.

Під час згоряння сірки також виділяється певна кількість теплоти, тому технічні засоби, що спрямовані на видалення сірки з палива, призводять до зменшення його теплотворної здатності. Згоряння сірки, що є однією зі складових палива, супроводжується утворенням її оксидів та далі кислот, які становлять небезпеку для довкілля. Вміст сірки в паливі не повинен

перевищувати 0,5 % за масою. У деяких випадках (за умови використання додаткового очищення випускних газів дизеля в скруберах) дозволяється використання палива зі вмістом сірки до 3,5 % з обов'язковим підтвердженням результатів контролю випускних газів.

Вміст азоту в паливі як правило не перевищує 1,0 % (в деяких сортах палива можливо до 1,5 % азоту за масою). Згоряння азоту відбувається за ендотермічною реакцією



Основний недолік під час згоряння азоту – утворення оксидів азоту, найбільш небезпечних зі всіх шкідливих компонентів, що входять до складу випускних газів [86, 87].

Кисень у паливі знаходиться у вигляді різних кислот, його вміст може досягати 1 % за масою. Кисень під час з'єднання з вуглецем та воднем, сприяє окисленню частини цих елементів безпосередньо в об'ємі рідкого палива щодо реакції горіння палива. Це призводить до зниження теплотворної здатності палива.

Суднові моторні палива є сумішшю нафтопродуктів різних фракцій – прямої та вторинної перегонки. Фракційний склад палива пов'язаний та впливає на його експлуатаційні характеристики. Чим менше інтервал температур та нижчі самі температури, за яких википають нафтопродукти, тим краще подальший процес згоряння палива, що отримане за таких умов. Збільшення кількості легких фракцій у суміші, з якої складається паливо, призводить до зменшення температури самозаймання палива, зменшує кут затримки займання та забезпечує підвищення максимального тиску під час згоряння палива. Це сприяє покращенню процесу згоряння, але підвищує динамічність та жорсткість роботи дизеля, що призводить до збільшення ударних навантажень на його підшипникові вузли (головний та мотильовий). Збільшення кількості важких фракцій призводить до збільшення кута затримки займання та зсуву процесу згоряння на лінію розширення. При цьому підвищується кількість палива, що згоряє за верхньою мертвою точкою,

що спричиняє неповне згоряння в циліндрі, догоряння палива у випускному ресивері та зумовлює підвищену димність роботи дизеля [88, 89].

Важкі сорти палива мають більш складний фракційний склад, що пов'язано з тим, що під час їх виробництва використовують суміші, більша частина яких – продукти вторинної перегонки, менша – легкі фракції, що додаються з метою зниження густини, в'язкості та температури застигання суміші.

Розширення фракційного складу палива викликає погіршення його розпилювання та подальшого сумішоутворення з повітрям у циліндрі дизеля, випаровування, окислення та згоряння. Особливо гостро ця проблема виявляється у суднових СОД та ВОД, у яких (через підвищену частоту обертання) зменшується час, що відповідає процесам впорскування, сумішоутворення та згоряння [90, 91].

Фракційний склад палива нафтового походження, що використовується в дизелях суден морського та внутрішнього водного транспорту, робить вагомий внесок до його експлуатаційних характеристик. Існує пряма залежність між інтервалом температур, в якому здійснюється википання палива (що забезпечується під час його крекінг перегонки), та перебігом процесу його згоряння в циліндрі дизеля. Однорідність фракційного складу звужує інтервал температур википання та пришвидшує процес згоряння та виділення теплоти. При цьому більша частина палива, що впорскується в дизель, згорає в районі верхньої мертвої точки. Це забезпечує більші кінематичні зусилля на кривошипно-шатунний механізм та підвищує крутний момент на валу дизеля. Палива, які характеризуються широким фракційним складом, містять у своєму складі фракції, що википають за різних температур. Під час згоряння таких палив у циліндрі дизеля уповільнюються швидкість їх згоряння та виділення теплоти. Це стає причиною зміщення процесу згоряння на лінію розширення та виникнення явища догоряння палива на лінії розширення. Це зменшує кількість теплоти, що виділяється під час згоряння палива в момент, коли поршень знаходиться в районі верхньої мертвої точки, та знижує індикаторну роботу циклу.

1.4. Аналіз способів зменшення шкідливого впливу дизелів морських та річкових засобів транспорту на довкілля

Негативний вплив, якому піддається довкілля з боку дизелів суден морських засобів транспорту, перш за все пов'язаний із залишками нафтопродуктів (палива та мастила, які утворюються під час їх очищення, а також бункерування) та ВГ, що викидаються в атмосферу під час кругового робочого циклу. Залишки нафтопродуктів додатково очищуються, накопичуються, зберігаються, скидаються або передаються на берегові або плавучі транспортні засоби. В будь-якому випадку всі операції із залишками нафтопродуктів виконуються відповідно до вимог МАРПОЛ [92, 93]. Накопичення, а також зберігання та передача ВГ неможливі технологічно та недоцільні з будь-якої точки зору. Тому єдиним способом зменшення шкідливого впливу ВГ на довкілля є їх очищення, або забезпечення процесу їх утворення з меншим вмістом забруднюючих компонентів [94, 95].

Зменшення емісії оксидів азоту NO_x забезпечується двома шляхами. Перший (так звані первинні методи) передбачає попередження утворення NO_x безпосередньо в циліндрі дизеля. Другий (так звані вторинні методи) спрямовані на очищення вже утворених ВГ у газовипускній системі дизеля. Основною метою первинних методів є зниження пікових температур у циліндрі дизеля, тобто забезпечення умов, за яких температура в циліндрі дизеля під час перебігу робочого процесу не перевищує 1500°C (температури, за якою здійснюється ланцюгова реакція утворення оксидів азоту). До категорії первинних методів попередження утворення NO_x відносяться:

- зволоження повітря наддуву (при цьому спеціальні форсунки забезпечують впорскування прісної води або в повітряну магістраль, або в повітряний ресивер) [96];

- безпосереднє впорскування прісної води в циліндр дизеля (з цією метою додатково встановлений насос підвищеного тиску, який розпорошує воду одночасно з впорскуванням палива, що здійснюється паливним насосом високого тиску) [97];

- впорскування заздалегідь підготовленої суміші палива та води (водопаливної емульсії) [98];

- забезпечення рециркуляції випускних газів (технологічній схемі, за якої частина випускних газів перенаправляється назад у циліндр) [99];

- забезпечення перепуску випускних газів (під час якого частина ВГ спрямовується безпосередньо до газовипускної труби повз ГТН) [100];

- вдосконалення паливної апаратури високого тиску та оптимізація процесу впорскування палива (при цьому через підвищення тиску, що забезпечується паливним насосом високого тиску – ПНВТ, або системою common-rail, скорочується час впорскування, через зміну профілю розпилювача форсунки виключається підтікання палива та його подальше коксування) [101];

- використання альтернативних палив (знижений порівняно з нафтовими вміст азоту в цих паливах сприяє зменшенню утворення «паливних» NO_x , більш низькі температури займання – скорочують кількість «термічних» NO_x) [102-104].

Вторинні методи зниження емісії оксидів азоту NO_x базуються на селективній або неселективній каталізації випускних газів, їх фільтрації під час проходження крізь різноманітні фільтри, а також адсорбції на поверхнях металів. Найбільш розповсюдженим серед цих методів є селективне каталітичне очищення (Selective Catalytic Reduction – SCR). Неселективне каталітичне очищення (Non-Selective Catalytic Reduction – NSCR), а також фільтрація та адсорбція ВГ використовуються для суднових дизелів малої потужності, що встановлюються на морських транспортних засобах допоміжного флоту [105, 106].

Переваги названих методів наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняння методів зниження емісії оксидів азоту

Метод	Переваги	Недоліки
Зволоження повітря наддуву	20...25 % зниження емісії NO _x	Необхідність додаткової підготовки прісної води, виникнення протічок води скрізь з'єднання в продувному ресивері
Використання водопаливних емульсій	30...40 % зниження емісії NO _x	Необхідність комплектації паливної системи додатковим обладнанням
Рециркуляція випускних газів	30...40 % зниження емісії NO _x	Необхідність переобладнання системи випуску газів
Оптимізація процесу впорскування палива	20...25 % зниження емісії NO _x	Необхідність переобладнання або переналаштування паливної системи високого тиску
Використання альтернативних палив	30...60 % зниження емісії NO _x (в разі використання палива біологічного походження, або повна відсутність викидів NO _x (в разі використання водню або аміаку))	Необхідність встановлення додаткових ємностей для отримання, транспортування та збереження альтернативного палива. Необхідність забезпечення додаткового бункерування альтернативним паливом
Селективна або неселективна каталізація випускних газів	80...95 % зниження емісії NO _x	Необхідність використання додаткових реагентів, що забезпечують процес очищення

Зниження концентрації оксидів сірки SO_x у випускних газах досягається або через використання палива, масовий вміст сірки в якому не перевищує 0,5 % (для районів SO_x -ECA 0,1 %), альтернативного палива ненафтового походження та зрідженого природного газу, або за допомогою спеціального обладнання, найбільш розповсюдженим типом якого є скрубери.

Труднощі, що пов'язані з використанням палива з низьким вмістом сірки (менш ніж 0,1 %), передусім обумовлюються скороченими обсягами цього палива на бункерному ринку та нездатністю деяких країн до виробництва цих видів палива.

Перехід на використання LNG перш за все обмежується необхідністю переобладнання системи впорскування та збереження палива, а також обмеженою кількістю морських портів, які здатні забезпечити бункерування суден морського та внутрішнього водного транспорту цим видом палива. Остання підстава відноситься також до інших видів альтернативного палива.

Очищення випускних газів у скруберах пов'язано з обов'язковим додатковим очищенням промивної води, яка в них використовується, та подальшим збереженням цієї води на борту судна до моменту її передачі на спеціальні судна-збиральники. Сучасні вимоги, що висуваються до систем скрубєрного очищення, обмежують, або повністю забороняють скидання промивної води за борт судна. Це пов'язано з тим, що промивна вода, яка виходить зі скрубєрів, має підвищену кислотність, що негативно впливає на морське середовище. Також використання скрубєрів підвищує газодинамічний опір у газовипускній системі, що призводить до збільшення витрати палива та вже через це підвищує емісію іншої шкідливої складової – діоксиду вуглецю CO_2 [107, 108].

Основні особливості технологій та методів, що забезпечують скорочення викидів оксидів сірки, наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Порівняння методів зниження емісії оксидів сірки

Метод	Переваги	Недоліки
Використання дистильованого палива, або паливних сумішей із вмістом сірки до 0,1 %	Підвищення енергетичної ефективності робочого циклу дизеля	Збільшення витрат на придбання палива
Встановлення скрубберів з одночасним використанням палива з вмістом сірки до 3,5 %	Скорочення витрат на придбання палива	Збільшення аеродинамічного опору у випускній системі дизеля та збільшення через це витрати палива
Використання альтернативного палива (зрідженого природного газу та інших палив, що не містять сірку)	Відсутність з'єднань сірки у випускних газах	Зниження енергетичної ефективності робочого циклу дизеля

Єдиним варіантом, що забезпечує зниження викидів оксиду та діоксиду вуглецю (CO та CO_2), є використання безвуглецевого палива (до якого перш за все відноситься водень та в деяких випадках аміак), а також палива зі зниженим вмістом вуглецю (наприклад, палива біологічного походження на основі олійних жирів).

Таким чином, використання палива біологічного походження сприяє зниженню всіх шкідливих речовин, емісія яких контролюється з боку наглядових товариств відповідно до Міжнародних та національних вимог.

Відмінною особливістю палив, основу яких складають рослинні олії, є мінімальний рівень вмісту сірки. Це дозволяє використовувати їх у спеціальних екологічних районах – зонах контролю емісії оксидів сірки SECAs [109, 110].

Екологічна ефективність використання біопалива також характеризується меншою кількістю вуглекислого газу, що утворюється під час його згоряння. Під час спалювання традиційного палива утворюється велика кількість вуглекислого газу, який вважається парниковим газом та причиною утримання сонячного тепла на планеті. Спалювання палива нафтового походження підвищує температуру та зумовлює глобальне потепління. Використання біопалива зменшує вплив парникових газів на довкілля [111, 112].

У різних наукових дослідженнях містяться суперечливі дані щодо кількості викидів оксидів азоту NO_x під час використання біодизельного палива. Ця невідповідність пов'язана з варіативністю експерименту, типом нафтового палива, а також умовами проведення експерименту (концентрацією біопалива в паливній суміші з паливом нафтового походження, режимами роботи дизеля, особливостями та характеристиками його систем охолодження та випуску газів).

Негативний вплив на довкілля з боку незгорілих вуглеводнів C_nH_m , а також сажи (чорного вуглецю) C зменшується через регулювання процесу згоряння палива – вибору оптимальних фаз впорскування палива та показників в паливній системі високого тиску (насамперед тиску впорскування), через вдосконалення конструкції паливних насосів та розпилювачів форсунок, через додаткове зволоження ВГ, а також через встановлення спеціальних фільтрів в системі випуску газів.

Специфічною особливістю процесу згоряння в дизелях морських засобів транспорту, яка визначає та ускладнює в значному ступені вивчення механізму утворення токсичних речовин, є наявність гетерогенної суміші палива та повітря. В цьому випадку виникає додаткові реакції, що пов'язані з випаруванням та згорянням крапель рідкого палива, з їх самозайманням, з утворенням, випарування, окислюванням та згорянням розпиленої паливної струї, з утворенням турбулентних потоків в камері згоряння дизеля.

1.5. Аналіз сучасних тенденцій розвитку альтернативних палив для дизелів морських та річкових засобів транспорту

Енергетичні комплекси морських засобів транспорту забезпечують виконання комерційних завдань з перевезення вантажів та пасажирів, а також технологічні процеси, що відбуваються на суднах (наприклад, вилов риби, або видобуток вуглеводнів), або виконуються суднами (наприклад, заведення якорів, прокладення кабелів, постачання нафтових платформ). Джерелом їх функціонування є рідке паливо, яке використовують для всіх теплових двигунів, що входять до складу суднової енергетичної установки. Сонячні та електричні батареї, повітряні генератори (у тому числі «жорсткі» та «м'які» вітрила) здатні лише компенсувати частину енергії, що витрачається на рух судна або роботу допоміжного обладнання. Найбільш поширеним типом рідкого палива є паливо нафтового походження, під час згоряння якого разом з ВГ до довкілля потрапляє велика кількість шкідливих речовин, частина яких є токсичними. До несприятливих характеристик палива також відноситься постійне коливання цін на ринку їх виробництва та постачання, суворі вимоги до їх якості та складу, а також поступове зниження їх запасів у природних родовищах [113, 114].

Викладені обставини є підставою для впровадження в СЕУ альтернативного палива, одним з якого є паливо біологічного походження (біодизельне паливо) [115, 116]. Нині багато країн ЄС, і навіть США, Бразилія, Китай активно розвивають виробництво альтернативного палива (зокрема біопалива). Однак, застосування альтернативних видів палива набуває поширення в автомобільному та залізничному транспорті [117, 118].

На даний момент на морських та річкових засобах транспорту використовуються та активно впроваджуються наступні види альтернативного палива.

Природний газ посідає перше місце серед альтернативних видів палива у стаціонарній енергетиці. Сучасний скраплений природний газ складається з 85...95 % з метану CH_4 , а до решти входять етан, пропан, бутан, азот. Найнижча теплота згоряння близько 50000 кДж/кг. Стехіометричне співвідношення складає 5...19. У разі перевищення верхньої межі газу буде недостатньо для початку займання, якщо стехіометричне співвідношення буде менше 5, в суміші буде замало кисню. Для використання скраплений природний газ піддається регазифікації – випаровуванню без наявності повітря. При цьому збільшується його питомий об'єм – це (у зв'язку з необхідністю додаткових паливних танків) обмежує можливість застосування на морських засобах транспорту. Найбільш оптимальним варіантом використання зрідженого газу є судна типу LNG, на яких він перевозиться як вантаж. Густина газової фази природного газу принципово відрізняється від густини рідкого нафтового палива та за 20 °C становить 0,7 кг/м³. Це змушує використовувати для його подачі в циліндр дизеля окремих форсунок і спеціальної системи постачання [119, 120].

Нафтовий газ є сумішшю зріджених під тиском легких вуглеводнів, основні компоненти: пропан C_3H_8 та бутан C_4H_{10} . Нижча теплотворна здатність нафтового газу знаходиться в межах 47500...48500 кДж/кг, густина газової фази за 20 °C складає 1,8...2,5 кг/м³. Аналогічно зрідженому природному газу під час використання зрідженого нафтового газу потрібна зміна конструкції паливної системи, зокрема використання спеціальних форсунок.

Використання природного та нафтового газу як паливо, як правило, здійснюється на судах, які виконують їх перевезення. При цьому (у зв'язку з тим, що вони є не тільки джерелом енергії, а й частиною вантажу, що перевозиться) робота дизеля на цих сортах альтернативного палива можлива тільки під час руху судна в одному напрямку. У разі баластного переходу робота енергетичної установки відбувається на паливі нафтового походження. Крім того, у разі зміни температури або тиску в системі подачі

газу в циліндр дизеля може відбуватися їх часткова або повна конденсація. Це призводить до погіршення чи неможливості розпилювання газу паливною форсункою [121, 122].

Використання водню як палива пропонувалося для різних видів транспорту: автомобільного, залізничного, авіаційного. Водень є екологічно чистим паливом – вступаючи в реакцію з киснем, що міститься в повітрі, він утворює лише водяну пару. Згоряння водню супроводжується виділенням великої кількості енергії, його нижча теплота згоряння становить 120000...140000 кДж/кг. При цьому в циліндрі дизеля горіння переходить у детонацію, що збільшує механічні навантаження на деталі циліндрової групи, підшипники та колінчатий вал. Водень при суміші з повітрям утворює вибухонебезпечну суміш – гримучий газ. Зберігання водню повинно проводитись у спеціальних балонах. Усе це обмежує застосування водню на морських та річкових засобах транспорту [123, 124].

Ще одним видом альтернативного палива є суміші спиртів з дизельним паливом (метанол, етанол), які мають густину за 20 °С 790...800 кг/м³. Це дозволяє під час їх подачі в циліндр дизеля використовувати паливні насоси та форсунки, що призначені для впорскування основного (нафтового) палива. При цьому в чистому вигляді метанол та етанол є особливо небезпечними легкозаймистими рідинами з температурою спалаху 7...10 °С, температурою займання 12...15 °С. Теплота згоряння метанолу становить 22500...23000 кДж/кг, її втрати (порівняно з дизельним паливом) компенсуються високою швидкістю згоряння, повнотою згоряння та зниженням теплових втрат. Однак у чистому вигляді метанол та етанол як паливо використовуються тільки в автомобільних дизелях. Суміші метанолу / етанолу з паливом нафтового походження повинні піддаватися постійній гідродинамічній обробці та використовуватися одразу після приготування. Зберігання подібних сумішей призводить до їх розшаровування та під час використання є причиною нерівномірності згоряння, що підвищує нерівномірність частоти обертання вала дизеля [125-128].

Найбільшого поширення серед рослинних олій, за умови їх використання як альтернативного палива, набула ріпакова. Густина ріпакової олії за 20 °C становить 900...920 кг/м³, температура спалаху 55...60 °C. Це дозволяє використовувати ріпакову олію без зміни чи модернізації конструкції паливної системи дизеля. Використання ріпакової олії суттєво скорочує викиди CO₂ з ВГ. Ріпакова олія містить до 0,02 % сірки, що також покращує екологічні характеристики дизеля. Негативною характеристикою ріпакової олії є її знижена теплотворна здатність (до 37000...37500 кДж/кг), а також підвищена димність під час згоряння. Крім того, більш висока (порівняно з дизельним паливом) густина ріпакової олії змушує використовувати її в суміші з етиловим спиртом. Густина такої суміші (за умови вмісту спирту до 30 %) знижується до 880...890 кг/м³, проте разом з цим знижується її теплотворна здатність – до 34000...35000 кДж/кг [129, 130].

Одним із перспективних та поширених видів альтернативного палива є штучне рідке паливо біологічного походження (біопаливо). Біодизельне паливо (або FAME – Fatty Acid Methyl Ester, метилові ефіри жирних кислот) виготовляється з різних продуктів, переважно з олій сільськогосподарських культур, якими є ріпакова, соняшникова, пальмова, соєва та інші олії. Перевага біодизельного палива – сировина, доступна у великих обсягах. Біодизельне паливо можна змішувати з дизельним паливом або використовувати у чистому вигляді [131, 132]. Останніми роками розробки ведуться у сфері створення біодизельного палива з водоростей (біопаливо «третього покоління») [133, 134]. Експлуатаційні характеристики та властивості біодизельного палива (як будь-якого іншого палива, що використовується для роботи засобів транспорту) повинні відповідати вимогам, що визначаються спеціальним стандартом [135, 136].

Як окреме джерело енергії біодизельне паливо не використовується. Перш за все це пов'язане з його більш високою (порівняно з дизельним паливом) густиною та в'язкістю. Це негативно впливає на параметри процесу паливоподачі, впорскування та розпилювання палива, що погіршує якість

перебігу цих процесів. Зниження в'язкості біодизельного палива шляхом його додаткового нагріву призводить до підвищеного утворення парафіну та подальшого коксування паливної апаратури високого тиску. У зв'язку з цим біодизельне паливо поєднується в різних пропорціях з моторним (дизельним / легким або важким) паливом. Додавання біопалива до традиційних видів моторного палива підвищує екологічні характеристики дизеля. Використання біопалива дозволяє країнам із незначними запасами власних енергоресурсів знизити економічну та політичну залежність від імпортованих поставок палива.

Використання біодизельного палива в останні роки знайшло застосування в залізничному та автомобільному транспорті (у тому числі на автотракторних дизелях), а також в промислових енергетичних установках (в яких дизелі використовуються для приводу електрогенераторів). При цьому біодизельне паливо входить до складу суміші з дизельними (легкими) паливами, густина яких не перевищує $830...850 \text{ кг/м}^3$. Використання біодизельного палива в енергетичних установках морських засобів транспорту на теперішній час не має широкого розповсюдження. Існують лише поодинокі дослідження з визначення ефективності використання біодизельного палива в дизелях суден морського та внутрішнього водного транспорту [137, 138].

Не існує також загальновизначеної концентрації біодизельного палива в його суміші з моторним (дизельним або важким). Наприклад транснаціональна нафтогазова компанія British Petroleum постачає на морські судна паливну суміш Marine B30, яка складається з 30 % біодизельного палива та 70 % важкого палива з наднизьким вмістом сірки (Very Low Sulphur Fuel Oil – VLSFO); нафтова корпорація Exxon Mobil – подібну суміш, яка містить 25 % біодизельного палива.

Собівартість виробництва біодизельного палива в більшості країн світу вища, ніж собівартість нафтопродуктів (у тому числі імпортованих), а рентабельність біопаливного бізнесу поступається рентабельності переробки

нафти. Однак використання біодизельного палива суттєво покращує екологічні характеристики суднових дизелів, зокрема емісію оксидів азоту, оксидів вуглецю та оксидів азоту. Це стає суттєвою перевагою використання біодизельного палива під час знаходження морських транспортних засобів в спеціальних екологічних районах.

Основними компонентами, що використовуються під час виробництва біодизеля, є жири та олії, отримані з рослинних та тваринних жирів, хімічний склад яких незначною мірою відрізняється [139, 140]. У результаті етерифікації у наявності метанолу або етанолу, а також каталізатора (у вигляді NaOH, KOH, NaOCH₃ або KOCH₃) ці речовини реагують з утворенням моноалкілових ефірів, також відомих як біодизель. Далі біодизельна фаза додатково очищується за допомогою дистиляції та мембранного поділу.

Рослинні олії як моторні палива можна використовувати як у чистому вигляді, так і в суміші з дизельним та іншими нафтовими паливами, а також із газовими конденсатами, спиртами, ефірами та іншими альтернативними паливами. Джерелом рослинних олій служать олійні культури, в насінні або плодах яких містяться рослинні жири. До олійних відноситься більше 150 видів рослин, з яких виробляють рослинні олії. Залежно від кліматичних умов та доступності вирощування, сировиною для виробництва біодизелю можуть бути різні рослинні олії – від оливкової олії до тваринного жиру. Динаміка світового виробництва рослинних олій за останні п'ять років наведена у таблиці 1.5 [138, 141].

Близько 87,4 % світового виробництва рослинних олій припадає на пальмову, соєву, рапсову та соняшникову олії, решту 12,6 % – на арахісову, бавовняну, оливкову, кокосову та пальмоядрову. Безумовно, більша частина цього обсягу використовується в харчовій промисловості. Однак, частина олій використовується як сировина для виробництва біопалива. Ріпакова олія займає третє місце за обсягом виробництва у світі після пальмової та соєвої.

Таблиця 1.5

Світове виробництво рослинних олій, 2017/2018...2021/2022 рр., млн. тонн

	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
Пальмова	65,3	70,5	74,2	73,0	72,9
Соєва	53,8	55,2	56,0	58,5	59,4
Ріпакова	27,5	28,0	27,7	28,0	29,1
Соняшникова	18,3	18,6	19,6	21,2	19,1
Пальмоядрова	7,6	8,3	8,6	8,5	8,4
Арахісова	5,7	5,9	5,9	6,2	6,4
Бавовняна	4,4	5,1	5,0	5,2	4,8
Кокосова	3,3	3,6	3,6	3,6	3,4
Оливкова	2,5	3,3	3,2	3,1	2,9
Разом:	188,4	198,4	203,8	207,3	206,5

У структурі світового виробництва рослинних олій у сезоні 2021/22 р. на ріпакову олію припало близько 14,1 % ринку (29,1 млн. тонн). При цьому, для виробництва біодизельного палива найактивніше використовується саме ріпакова олія. У різних рослинних оліях міститься різна кількість жирних кислот, що призводить до певної відмінності в їх характеристиках. Деякі характеристики рослинних олій, які використовуються для виробництва біодизельного палива, наведено у таблиці 1.6 [138, 142].

Усі рослинні палива мають схожі одне з одним основні характеристики – густину, температуру спалаху, нижчу теплотворну здатність. При згорянні вони виділяють приблизно на 10...12 % менше тепла, ніж дизельне паливо на нафтовій основі. Стандартів для теплоти згоряння палива з олії не існує, проте більш висока теплотворна здатність палива є важливою властивістю, що використовується під час визначення їх якості.

Таблиця 1.6

Характеристики рослинних олій

	Олія каноли (канадський ріпак)	Кукуруд- зяна олія	Пальмо- ва олія	Ріпако- ва олія	Соєва олія	Відпра- цьована рослинна олія
Вміст сірки, ppm	2	4	2	4	2	5
Кінематична в'язкість за 40°C, cSt	4,38	4,19	4,61	4,50	4,26	4,80
Температура спалаху, °C	153	171	163	169	159	161
Цетанове число	61,5	60,9	50,5	54,7	52,3	48,5
Густина, кг/м ³	883	883	873	879	882	879
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	38900	39900	37300	37600	37000	37600

Американське товариство з випробувань та матеріалів (American society of testing and materials – ASTM) як основну характеристику якості палива на основі рослинних олій визначає цетанове число. Специфікація ASTM D6751 вказує на мінімальне цетанове число 47 для рослинного палива. Усі палива на основі рослинних олій, приготовані з сировини, що найчастіше використовується, перевищують це значення.

Екологічна ефективність використання біопалива також характеризується меншою кількістю вуглекислого газу, що утворюється за

його згоряння. При спалюванні традиційне паливо виробляє велику кількість вуглекислого газу, який вважається парниковим газом та причиною утримання сонячного тепла на планеті. Спалювання вугілля та нафти підвищує температуру та зумовлює глобальне потепління. Використання біопалива зменшує вплив парникових газів на довкілля [143, 144].

У різних наукових дослідженнях містяться суперечливі дані щодо кількості викидів оксидів азоту NO_x під час використання біодизельного палива. Ця невідповідність пов'язана з варіативністю експерименту, типом нафтового палива, а також умовами проведення експерименту (концентрацією біопалива в паливній суміші з паливом нафтового походження, режимами роботи дизеля, особливостями та характеристиками його систем охолодження та випуску газів).

Для дизелів морського та внутрішнього водного транспорту використання альтернативного палива має частковий характер. При цьому завдання дослідження впливу альтернативного палива на енергетичні, економічні та екологічні показники роботи суднових дизелів (як головного типу теплових двигунів морських суден) не відрізняється системним підходом і перебуває на стадії початкового вивчення. Її розв'язання та знаходження оптимальних режимів роботи суднових дизелів під час використання альтернативного палива сприятиме підвищенню екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Використання альтернативного палива (зокрема біопалива) в енергетичних установках морських суден регламентується рекомендаціями виробників палива. При цьому вказуються лише мінімальні та максимальні концентрації біопалива у паливній суміші, при яких забезпечується згоряння. Ефективність його використання безпосередньо залежить від компетентностей суднового екіпажу та наявності рекомендацій щодо технології застосування біопалива на різних експлуатаційних режимах роботи дизеля.

1.6. Висновки за розділом 1

Як результат досліджень, виконаних у розділі 1, визначимо наступне.

1. Необхідність забезпечення вимог міжнародних конвенцій та норм Європейського Союзу щодо екологічних показників та енергоефективності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту сприяє використанню в суднових дизелях (як основному джерелі генерації енергії) біопалива. Однак, на даний час не розроблені рекомендації щодо оптимального складу паливної суміші (що складається з палива нафтового походження та біопалива), а також особливостей використання цієї суміші на різних режимах роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту.

2. Більшість наукових досліджень, які спрямовані на вивчення можливості використання біопалива, переважно присвячені автомобільному та залізничному транспорту. Крім того, не розроблені критерії, за якими можна виконати оцінку ефективності використання біопалива в дизелях суден морських засобів транспорту.

3. Незважаючи на застосування різних видів альтернативного палива, загальних рекомендацій щодо визначення його оптимальної концентрації у дизельному паливі не створено. Також не існує рекомендацій щодо економічної та екологічної ефективності використання суміші дизельного палива та біопалива на різних режимах роботи дизеля.

4. Наведений літературний огляд підтверджує, що вивчення можливості використання біопалива в суднових дизелях є актуальним завданням, розв'язання якого нині не знайдено. При цьому необхідно:

- встановити оптимальні схеми комплектації суднових паливних систем, у яких можливе використання біопалива;
- визначити критерії оцінки ефективності використання біопалива;
- встановити оптимальну концентрацію біопалива в суміші з паливом нафтового походження.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Другий розділ дослідження присвячено визначенню загальної методики дисертаційної роботи.

2.1. Вибір теми наукового дослідження та визначення шляхів досягнення завдань дослідження

Результати інформаційного пошуку та досвід експлуатації морських та річкових засобів транспорту дозволяють сформулювати наступні тези:

- дизелі, що встановлені на морських та річкових засобах транспорту та виконують функції головних або допоміжних двигунів, є основним джерелом механічної енергії, за допомогою якої забезпечується рух судна, а також його функціонування, виконання технологічних операцій та живучість;

- під час згоряння нафтового палива, що використовується в круговому робочому циклі дизелів, у довкілля потрапляє велика кількість забруднюючих речовин, які знижують екологічність та енергоефективність морських та річкових засобів транспорту;

- сучасний рівень видобування та споживання палива нафтового походження стимулює впровадження в дизелях морських та річкових засобів транспорту альтернативних видів палива, одним з яких є паливо біологічного походження.

Одночасно з цим існують наступні запити практики:

- необхідність поступового зниження споживання палива нафтового походження енергетичними установками морських та річкових засобів транспорту з пропорційною його заміною альтернативними видами палива;

- необхідність підвищення екологічності та енергетичної ефективності роботи морських та річкових засобів транспорту.

З урахуванням цього, а також відповідно до паспорта спеціальності 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» була сформульована тема дисертаційного дослідження: **«Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження».**

Визначенню наукового напрямку та формулювання теми дисертаційного дослідження також сприяло наступне:

- дизелі є найбільш поширеним типом теплових двигунів, що використовуються на морських та річкових засобах транспорту;

- ефективна потужність дизелів морських та річкових засобів транспорту забезпечує рух судна (у разі, коли вони виконують функції головних двигунів) та привід суднових електричних генераторів та подальше живлення суднових споживачів енергії (у разі, коли вони виконують функції допоміжних двигунів);

- сучасні тенденції, що спрямовані на зниження шкідливого впливу з боку дизелів морських суден на довкілля, а також на скорочення споживання нафтових палив, сприяють розвитку та поширенню використання альтернативних видів палива, до одного з яких відноситься паливо біологічного походження;

- поодинокий досвід використання палива біологічного походження не виявляє оптимальних режимів його використання та не надає рекомендацій щодо забезпечення під час його використання експлуатаційних показників роботи дизелів морських суден.

У зв'язку з викладеним **метою** виконання дисертаційного дослідження визначено **підвищення екологічності роботи морських та річкових засобів транспорту.**

Головним завданням дослідження було визначено забезпечення екологічних та економічних показників роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту.

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

1) визначення ділянки витратної паливної системи, найбільш доцільного щодо утворення паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

2) визначення діапазону доцільної концентрації біопалива в її суміші з паливом нафтового походження;

3) визначення критеріїв оцінки ефективності використання суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

4) визначення оптимального складу паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, для забезпечення експлуатаційних показників роботи дизелів морських суден.

З метою визначення варіантів розв'язання головного завдання дослідження була виконана експертна оцінка варіантів, за допомогою яких можливо його досягнення [145, 146]. При цьому як критерії оцінювання доцільності використання тих чи інших варіантів розв'язання головного завдання були прийняті:

1) актуальність;

2) наукова новизна;

3) практична доцільність;

4) можливість використання на морських та річкових засобах транспорту;

5) відповідність спеціальності 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту».

За умови позитивної оцінки варіанту розв'язання головного завдання йому присвоюється знак «+», в іншому випадку – знак «-» – таблиця 2.1.

Таблиця 2.1

Використання методу експертних оцінок для визначення варіантів
розв'язання завдання дослідження

Варіант розв'язання поставленого завдання	Критерії					
	актуальність	наукова новизна	практична доцільність	можливість використання на морських та річкових засобах транспорт	відповідність спеціальності 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту»	сума балів
1. Використання палива нафтового походження з наднизьким вмістом сірки	+	+	–	+	+	4
2. Вдосконалення паливної апаратури високого тиску	+	–	–	+	+	3
3. Вдосконалення системи наддуву	+	+	–	+	–	4
4. Використання присадок до палива	+	–	+	–	+	3
5. Використання палива біологічного походження	+	+	+	+	+	5

Як варіанти розв'язання головного завдання були обрані:

- 1) використання палива нафтового походження з наднизьким вмістом сірки;
- 2) вдосконалення паливної апаратури високого тиску;
- 3) вдосконалення системи наддуву;
- 4) використання присадок до палива;
- 5) використання палива біологічного походження.

Експертна оцінка варіанту розв'язання головного завдання, яким є використання палива нафтового походження з наднизьким вмістом сірки, висвітила, що він відповідає наступним критеріям оцінювання: актуальність, наукова новизна, можливість використання на морських та річкових засобах транспорту, відповідність спеціальності. При цьому такий варіант не відповідає критерію практична доцільність. Це пов'язано з тим, що, по-перше, палива з наднизьким вмістом сірки відрізняються від інших більшою вартістю, по-друге, під час їх постійного використання необхідно здійснювати перевстановлення паливної апаратури високого тиску (що пов'язано з меншою густиною цих палив та виникненням його надмірних протічок крізь ущільнення та з'єднання); по-третє, згоряння цих палив підвищує температурні навантаження в циліндрі та випускної системі дизеля.

Розв'язання головного завдання шляхом вдосконалення паливної апаратури високого тиску відповідає вимогам щодо актуальності, можливості використання на морських та річкових засобах транспорту та відповідності спеціальності. Але, на жаль, технології його забезпечення вимагають додаткових витрат енергії на забезпечення процесу впорскування паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, що не відповідає вимогам щодо практичної доцільності, а також сучасні темпи розвитку елементів паливної апаратури високого тиску випереджають темпи впровадження цих технологій на морських та річкових засобах транспорту, тому це обмежує наукову новизну такого методу.

Варіант, що базується на вдосконаленні системи наддуву дизеля вимагає додаткових конструкційних змін у системі постачання повітря (наприклад, зміни профілю або прохідного перетину лопатей повітряного компресора або газової турбіни, зміни фаз випуску газів або подачі повітря). Це призводить до того, що цей варіант не відповідає вимогам щодо практичної доцільності.

Забезпечення екологічних та економічних показників роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту (як головного завдання дослідження) також розглядалось шляхом використання присадок до палива. Цей варіант найбільш сприятливий для дизелів автомобільного та в деяких

випадках залізничного транспорту, експлуатація яких передбачає майже без обмежене поповнення паливом та присадками до палива за будь-яких умов, а також не вимагає тривалого збереження присадок. Стосовно дизелів морських та річкових засобів транспорту використання палива та присадок до нього неможливе без транспортування цих речовин. Це з негативного боку характеризує такий критерій оцінювання, як можливість використання на морських та річкових засобах транспорту.

Отже, як результат використаного методу експертних оцінок найбільш сприятливим та доцільним варіантом розв'язання головного завдання дисертаційного дослідження є використання палива біологічного походження. Його застосування забезпечує виконання всіх висунутих вимог, тому саме його розвиненню присвячені дослідження, результати яких наведені в дисертаційній роботі.

Дослідження, що виконувались з метою досягнення головного та допоміжних завдань дисертаційній роботі, односпрямовані з завданнями, які визначені Транспортною стратегією України на період до 2030 року [147], а саме **підвищення рівня безпеки судноплавства** шляхом:

- створення національного сегмента системи обміну інформацією про рух суден та діяльність суб'єктів господарювання у сфері морського судноплавства;

- впровадження спільних з ЄС процедур забезпечення безпеки судноплавства, моніторингу руху морських суден, надання допомоги на морі; та **підвищення рівня екологічної безпеки на транспорті** шляхом:

- забезпечення пріоритетності вимог екологічної безпеки, обов'язковості дотримання екологічних стандартів, нормативів та лімітів використання природних ресурсів під час провадження господарської, управлінської та іншої діяльності;

- здійснення запобіжних заходів щодо охорони навколишнього природного середовища в транспортній галузі;

- впровадження новітніх технологій тестування транспортних засобів за екологічними параметрами;
- створення умов для запобігання аваріям на транспортних засобах, які можуть призвести до погіршення екологічного стану водних об'єктів (забруднення), що може шкідливо вплинути на здоров'я людей і стан водних екосистем.

Одночасно з цим дослідження, що виконані в дисертаційній роботі, спрямовані на забезпечення експлуатаційних показників та надійності роботи судових дизелів (двотактних та чотиритактних, головних та допоміжних) – як основного джерела механічної енергії енергетичних установок засобів морського та внутрішнього водного транспорту.

2.2. Вибір об'єкта дослідження, предмета та методів дослідження

Із системних позицій судовий пропульсивний комплекс морських та річкових засобів транспорту може бути розглянутий як складна система, що створена ієрархічною послідовністю взаємозалежних підсистем, утворених різними технічними засобами. Кожна з них та судовий пропульсивний комплекс у цілому можуть бути об'єктами моделювання під час розв'язання завдань технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту. Надсистемою по відношенню до судового пропульсивного комплексу є система транспортування вантажу, яка може бути об'єктом моделювання. Вибір виду та складу моделі кожного об'єкта великою мірою залежить від цілей моделювання, структури об'єкта, природи фізичних та інших процесів, пов'язаних з його функціонуванням тощо [148].

З огляду на велику різноманітність типів і модифікацій судових технічних засобів навіть у складі одного пропульсивного комплексу, а тим більше в складі пропульсивних комплексів різних суден, для конкретного

дослідження з безлічі можливих об'єктів моделювання вибираються ті, які необхідні та достатні для отримання розв'язань головних завдань технічної експлуатації суднового пропульсивного комплексу в загальному вигляді на рівні єдиної концепції технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту з урахуванням інформаційних технологій.

Тип і склад моделі пропульсивного комплексу визначається її роллю сполучної ланки між моделлю судна, моделлю головного двигуна, моделлю споживачів енергії. Наприклад, у разі гвинта фіксованого кроку до цієї моделі повинні входити потужність головного двигуна, частота обертання гребного гвинта та швидкість судна, тобто. параметри, що традиційно використовуються для побудови паспортної діаграми судна. У випадку визначення екологічної та енергетичної ефективності морських та річкових засобів транспорту до моделі входять процеси, що перебігають під час експлуатації головного двигуна та систем, що забезпечують його функціонування.

Визначаючи підходи до вибору складу моделі, необхідно пам'ятати різноманітність можливостей їх використання. Під час використання таких моделей для оцінки технічного стану складових суднового пропульсивного комплексу достатньо провести дезагрегування на функціонально самостійні елементи та кожен із них описувати своєю математичною моделлю. В цьому випадку в неї достатньо ввести як функцію відгуку діагностичний або контрольний параметр, а також режимні фактори.

Прагнення спрощення діагностичних та інших математичних моделей характерне для всіх досліджень, що належать до технічної експлуатації засобів транспорту. На практиці багато діагностичних і контрольованих параметрів залежать одночасно від декількох факторів. Облік їх впливу дозволяє розширити область адекватності одержуваних моделей та можливості їх використання з метою діагностування.

Однією з найважливіших цілей моделювання є отримання кількісних взаємозв'язків зміни технічного стану елементів суднового пропульсивного

комплексу вибором допустимого режиму їх використання. Для її досягнення недостатньо використання локальних моделей окремих функціонально самостійних елементів. Використання інформаційних технологій у розвиток методів технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту вимагає застосування моделей різних типів – еталонних і поточних, та різних рівнів – локальних та інтегральних. При цьому має виконуватися умова сумісності моделей, що використовуються в рамках єдиної інформаційної структури. Для виконання цієї умови бажано, щоб усі моделі виходили на єдиній методичній основі, що забезпечує універсальність застосовуваних інформаційних технологій для всіх елементів суднового пропульсивного комплексу, незалежно від рівня їх конфігурації, типів, потужності, а також характеристик судових технічних засобів, що використовуються для забезпечення їх функціонування, контролю, регулювання та управління.

По відношенню до природи вихідної інформації, яка використовується для побудови математичних моделей, можна розділити їх на три категорії:

- аналітичні (чи фізико-хімічні);
- статистичні (або емпіричні);
- змішані [149].

Для побудови аналітичних моделей за основу приймаються фізико-хімічні закономірності процесів, що описуються моделлю, у тому числі, у вигляді рівнянь матеріального або енергетичного балансу або кінетичних рівнянь перетворення речовини. Побудова аналітичних моделей для таких складних об'єктів, як пропульсивний комплекс або головний двигун пов'язане з проведенням великих і тривалих досліджень взаємозв'язків параметрів цих процесів з конструктивними та технологічними характеристиками об'єктів, що моделюються. Результати цих досліджень зазвичай є складними системами алгебраїчних, звичайних диференціальних рівнянь або рівнянь у часткових похідних. Головною перевагою таких моделей є їх високий рівень узагальнення, що дозволяє моделювати поведінку не тільки вже існуючих, але ще проєктованих об'єктів. Вони дають

можливість досліджувати їхню поведінку на режимах, що далеко виходять за межі нормальної експлуатації. Однак, велика складність та недостатня конкретність таких моделей обмежують можливості їх практичного використання для розв'язання експлуатаційних завдань. Досвід показує, що модель такого типу може бути налаштована на конкретний об'єкт (наприклад, ГД) з виконанням умови адекватності, але врахувати індивідуальні особливості конкретного механізму, а тим більше окремих циліндрів, з урахуванням місць розташування датчиків та характеристик вимірювальних каналів при цьому не вдається.

Альтернативний напрямок моделювання складних технічних об'єктів і технологічних процесів відноситься до відомого класу завдань ідентифікації і спирається на кібернетичне уявлення об'єкта, що моделюється, «чорною скринькою», (внутрішня структура якого і процеси, що в ньому тривають не відомі). При цьому для побудови моделі використовується інформація про взаємопов'язані зміни входних і вихідних параметрів об'єкта. Таким чином, приймається вимога щодо існування об'єкта та виконується безперервне або періодичне спостереження його параметрів. Водночас відпадають будь-які обмеження, пов'язані з фізичною природою об'єкта або конкретикою його конструктивного оформлення. За кількістю контрольованих параметрів, різноманіттям їхніх взаємозв'язків та вимог до точності їх оцінки найбільш складним об'єктом моделювання в складі суднового пропульсивного комплексу є головний дизель.

З урахуванням викладеного, як **об'єкт дослідження** визначено процес експлуатації дизелів морських та річкових засобів транспорту, як **предмет дослідження** обрано процес забезпечення експлуатаційних показників роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту.

2.3. Використання системного аналізу під час розв'язання завдань із технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту

Відповідно до системного аналізу, система – безліч елементів, що у відносинах і зв'язках один з одним, утворюють певну цілісність, єдність. Ергатична система – складна система управління, складовий елемент якої «людина-оператор». Людина-оператор (група операторів) взаємодіє з технічними пристроями, утворюючи систему «людина-машина». Саме до таких систем відносяться усі системи морських та річкових засобів транспорту. Система вважається складною, якщо вона складається з великої кількості взаємопов'язаних та взаємодіючих між собою елементів. Для технічних систем більш прийнятне та зрозуміле трактування, сенс якого зводиться до того, що будь-яку систему можна описати або як деяке перетворення вхідних впливів у вихідні величини, або з позиції досягнення певної мети. Для пропульсивних комплексів морських та річкових засобів транспорту під системою також можна розуміти сукупність елементів та зв'язків, що перетворюють вхідні дії у вихідні величини для досягнення певної мети [150].

Застосування системного методу передбачає виконання чотирьох послідовних операцій, базою яких є послідовно: теорія систем, системний підхід, системний аналіз. Кожна складова системного методу дозволяє розв'язувати певне коло завдань, необхідних для постановки та розв'язання наступних завдань.

Перша операція (теорія систем) базується на загальній теорії систем і дозволяє визначити межі системи, що розглядається. Під час визначення меж системи зазвичай застосовуються методи декомпозиції, тобто виділення зі складних систем підсистем із достатньою оглядовістю та автономією. Наприклад, із системи технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту виділяються підсистеми експлуатація корпусу, гребного гвинта,

головного двигуна. З підсистеми експлуатації головного двигуна – експлуатація паливної системи, системи мащення, системи охолодження підсистема експлуатації допоміжного двигуна. Далі з підсистеми технічна експлуатації паливної системи – забезпечення експлуатаційних показників головного та допоміжних двигунів. З цієї підсистеми виділяються окремі компоненти, що характеризують роботу дизелів (рис. 2.1).

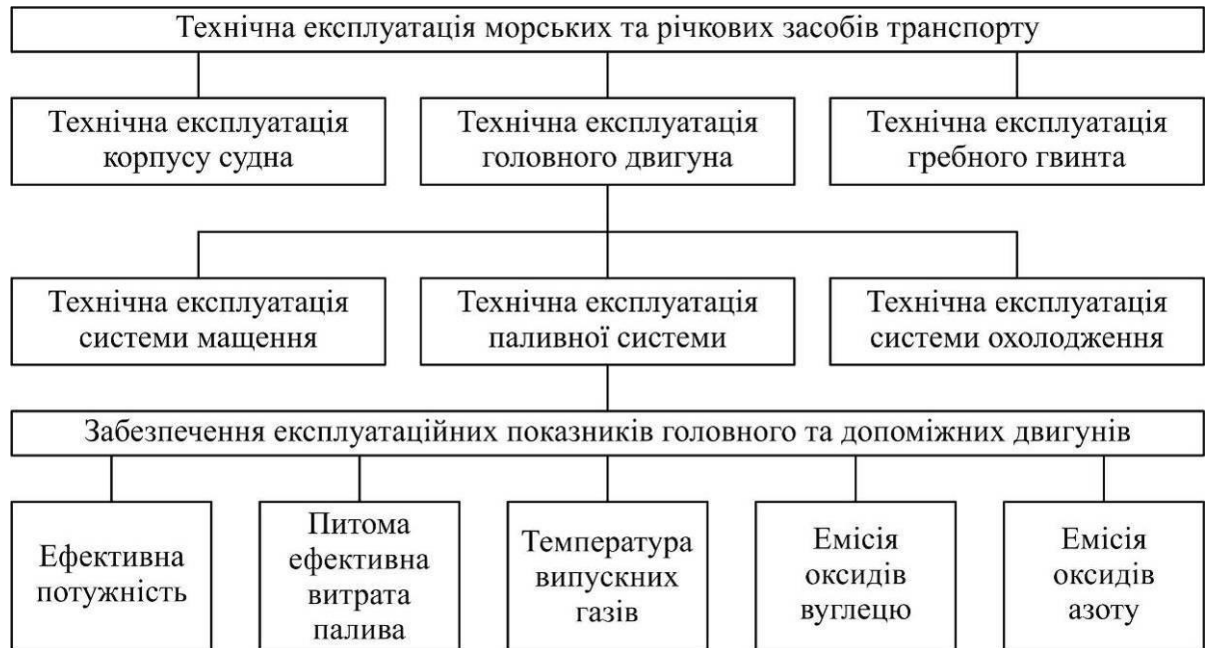


Рис. 2.1. Основні складові системи технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту

Декомпозиція дозволяє будь-яку систему підставити з двох рівнів. Послідовність декомпозицій дає можливість визначити межі системи та її зв'язку із зовнішнім середовищем. За умови послідовної декомпозиції нижній рівень дворівневої системи (підсистеми) приймається за систему та виділяється з нього наступна підсистема. Прагнення уявити будь-яку систему як дворівневу зумовлено властивістю системи поліпшувати якість управління зі зменшенням кількості рівнів. У багаторівневих системах оптимальне управління взагалі недосяжне, тому що під час цього виникають взаємно суперечливі критерії.

Друга операція виходить із системного підходу. Після визначення меж досліджуваної системи як двох рівнів (наприклад, «пропульсивний комплекс

– головний двигун», чи «головний двигун – паливна система») визначається ієрархія, внутрішньосистемні зв'язки, потоки енергії та інформації. Формується спрямований міжрівневий зв'язок «мета – цільова функція – критерій оптимізації». При цьому під «метою» розуміється логічно чітко сформульоване завдання, яке вирішується на верхньому рівні. Під «цільовою функцією» – функція чи функціонал залежності мети від змінних параметрів. Як «критерії оптимізації» приймаються математичні умови мінімального відхилення від мети. Під час формування цільової функції вибір змінних незалежних параметрів здійснюється за правилом, згідно з яким слід розглядати тільки ті змінні параметри, які суттєво впливають на критерій оптимальності. Вагова значимість змінних параметрів цільової функції може бути оцінена за допомогою експертної оцінки або швидкості накопичення інформаційної негентропії [151].

Третя операція (системний аналіз) здійснюється після визначення меж системи (перша операція), ієрархії та внутрішньосистемних зв'язків (друга операція). Саме ця операція називається системним аналізом чи структуризацією системи. Елементи системи та внутрішньосистемні зв'язки розглядаються в наступній послідовності:

- 1) розробляється добре доступна для огляду принципова схема системи за елементами. У принципову схему вносяться всі змінні фізичні параметри входів і виходів за кожним елементом системи. Визначаються потоки енергії та інформації. Розглядаються всі необхідні обмеження щодо енергетичних об'єктів (елементів) та обмеження за інформацією;

- 2) принципова схема розчленовується за типовими елементами і будується функціональна схема за принципом «чорної скриньки». При цьому приймається що, «чорна скринька» – це квадрат із найменуванням елемента та позначенням стрілками вхідних та вихідних параметрів; «біла скринька» – квадрат, усередині якого записані процеси, перетворення вхідних параметрів у вихідні величини; «сіра скринька» – поєднання чорної та білої скриньок;

3) кожен елемент функціональної схеми описується математичним аналогом (математичною моделлю). За принципом сірої скриньки будується структурна схема з урахуванням замикання елементів. Структурна схема є математичною моделлю системи та приводиться до вигляду, зручного для постановки математичного експерименту;

4) структурна схема перетворюється на алгоритмічну схему в словесній чи алгоритмічній формі за допомогою алгоритмічної мови;

5) з урахуванням алгоритмічної схеми розробляється програма електронного управління системою.

Системний аналіз високоефективний під час експлуатації та технічного обслуговування морських та річкових засобів транспорту. Він дозволяє не тільки глибоко розібратися та зрозуміти технологічні процеси, а й активно впливати на систему з метою оптимізації її використання, підвищення надійності та ефективності.

Для теорії систем, за допомогою якої визначаються межі системи, об'єктом дослідження є не «фізична реальність», а «система», тобто формальний взаємозв'язок між ознаками, що спостерігаються, та властивостями [152].

Дослідження пропульсивних комплексів суден морського та річкового транспорту показують, що складні багаторівневі системи можуть бути перетворені на дворівневі лінійні системи. Таке перетворення дозволяє провести математичну формалізацію функціонування системи. З метою задоволення підпорядкованості локальних критеріїв глобальним, керуючись вимогами теорії системи з мінімальною кількістю рівнів, представимо систему «судновий пропульсивний комплекс» як дворівневу систему з послідовною декомпозицією нижнього рівня. При цьому входом кожного рівня буде критерій, а виходом – мета. За кожної наступної декомпозиції нижній рівень стає верхнім. Послідовність композиції представлена на рис. 2.2 (римськими цифрами позначено послідовність композицій; арабськими цифрами – рівні системи; K – критерій; C – ціль).

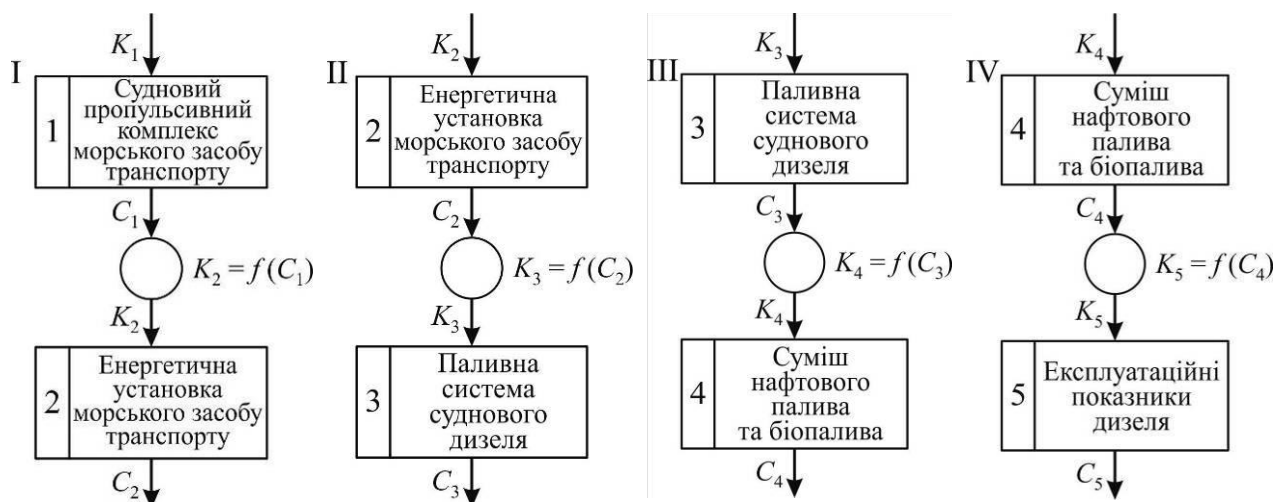


Рис. 2.2. Послідовність композицій під час експлуатації морських засобів транспорту

При цьому як перша композиція приймається судновий пропульсивний комплекс морського засобу транспорту; як друга – енергетична установка морського засобу транспорту; як третя – паливна система суднового дизеля; як четверта – суміш нафтового палива та біопалива; як п’ята – експлуатаційні показники дизеля.

Як критерії K та цілі C для кожної композиції відповідно приймаються:

K_1 – транспортна робота з перевезення вантажу;

C_1 – забезпечення заданого часу транспортування вантажу;

K_2 – технічний стан головної та допоміжної енергетичної установки;

C_2 – забезпечення необхідної швидкості морського судна;

K_3 – комплектація паливної системи обладнанням, що забезпечує утворення паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

C_3 – забезпечення стійкості паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

K_4 – фази впорскування палива;

C_4 – забезпечення процесу впорскування та згоряння паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

K_5 – енергетичні та екологічні показники роботи дизеля;

C_5 – підвищення екологічності та енергетичної ефективності судна.

Міжрівняний спрямований зв'язок «мета – цільова функція – критерій» формуються послідовно. Метою будь-якого рівня дворівневої системи приймається логічно сформульований «максимальний дохід», під яким розуміється найширше коло визначень – економічних, соціальних, стратегічних та інших.

За умови багатоцільової системи, критерії, що отримані однією послідовністю композицій, фіксуються як обмеження. Для кожної мети верхнього рівня будується своя послідовність композицій. Глобальним критерієм будь-якого транспортного засобу (зокрема морського судна) є мінімізація експлуатаційних витрат.

Принципово кількість композицій не обмежена, залежить від рівня, а також від постановки завдань (цілей).

Сучасні суднові дизелі, що виконують функції головних або допоміжних двигунів на морських та річкових засобах транспорту є складними технічними системами. Системний підхід (друга операція) дозволяє в рамках встановлених меж системи (перша операція), вказати формальні цілі, критерії та умови функціонування системи. Суднова дизельна установка є підсистемою системи технічної експлуатації та має задовольняти двом аспектам:

- 1) забезпечити найвигідніші режими роботи суднового пропульсивного комплексу морського засобу транспорту;
- 2) безпосередньо замикатися до системи технічної експлуатації судна.

Із зазначених аспектів впливає склад системи, що складається з таких ланок: об'єкт; зовнішнє середовище; ресурси; обмеження; цілі функціонування; критерії ефективності; системи управління.

Цінність і старіння інформації залежать від цільового призначення. Знання цінності інформації дозволяє раціонально розміщувати датчики та вимірювальні прилади, скорочувати обсяг інформаційного потоку, планувати черговість вимірювань, призначати пріоритети контролю та управління об'єктом. Будь-яка затримка сигналів управління енергетичних об'єктів

призводить до старіння інформації та за досить великих затримок передача інформації взагалі втрачає сенс.

Проблема оперативного подання інформації особливо гостро стоїть у людино-машинних системах. У цих системах результат вимірювання, зафіксований датчиком, не цікавить оператора сам по собі, а служить вихідним матеріалом для подальшої обробки, в результаті якої має з'явитися управляючий вплив. У цьому найефективнішим є прагматичний підхід до інформації, тобто оцінка її практичної корисності. Прагматика як розділ семіотики, що вивчає відношення знакових систем до тих, хто їх використовує, дозволяє зробити формалізацію за цінністю та старінням інформації. Семіотична оцінка інформації експлуатаційних параметрів відкриває широкі можливості раціонального зберігання та автоматичного оброблення інформації для транспортних засобів [145].

Для оцінки інформаційної значущості експлуатаційних параметрів дизелів морських та річкових засобів транспорту можуть бути застосовані методи теорії ймовірності та експертної оцінки. Існують також методи, що базуються на аналізі аварійних ситуацій. Проте ці методи вимагають великої витрати часу, оскільки вихідні матеріали з розслідування аварій дають абсолютно достовірні дані, лише передбачувані причини аварійних ситуацій.

До оцінки інформації прийнято підходити з ситуації конфлікту та зіставлення з кількістю інформації значення критерію якості. Цінність інформації виражається через підвищення значення критерію якості. Такий підхід страждає на той недолік, що для кожного завдання необхідно користуватися окремим критерієм, при цьому оцінки можуть виявитися незрівнянними. Необхідний загальний підхід до питань оцінки інформації енергетичних об'єктів засобів транспорту, придатний до всіх експлуатаційних режимів роботи. Метод має бути досить оперативним і придатним як для сталих, також до перехідних (маневрових) режимів роботи. Тільки в цьому випадку оцінки параметрів легко піддаються автоматизації, обробці та правильному прийняттю рішень.

Оптимальне керування режимами роботи енергетичних об'єктів морських та річкових засобів транспорту вимагає об'єктивної оцінки факторів, що впливають на роботу об'єкта та взаємозв'язки робочих параметрів в умовах експлуатації.

Під час сталих режимів роботи оцінка вагомості значення експлуатаційних параметрів визначається розрахунком коефіцієнтів впливу. Розрахунок коефіцієнтів впливу заснований на детермінованих моделях процесів лінеаризованих залежностей методу малих відхилень, тому може бути використаний тільки для сталих режимів роботи об'єктів за умови відхилення параметрів від номінальних значень до 15 %. За більших відхилень оцінка інформації за допомогою коефіцієнтів впливу стає менш інформативною, а тому менш ефективною.

Під час оцінки інформації внутрішньосистемних зв'язків необхідно враховувати те, що всередині системи, а також між середовищем та системою переміщуються потоки речовини та енергії різних видів, які називають поточними компонентами та розрізняють їх індексами i :

$$iEI = \{1, 2, 3, \dots, m\}.$$

Структура системи побудована з елементів і вузлів, які називаються фондами та позначаються індексами j

$$jEI = \{1, 2, 3, \dots, m\}.$$

Побудова моделі виконується таким чином, щоб у кожному вузлі перебігав лише один процес. При цьому під процесом розуміється перетворення деякого набору поточних компонент, заданих їх кількістю:

$$X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{kj})$$

(де x_{kj} – позитивне число, результат вимірювання компоненти у заданій системі одиниць) до іншого набору компонент

$$Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{lj})$$

Необхідною умовою перебігу процесу є наявність фондових компонентів у наборі, що задається як

$$Z_j = (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj})$$

У прагматичному аспекті система може накопичувати негентропію під час функціонування. У цьому випадку швидкість накопичення негентропії можна розглядати як критерій якості інформації, що використовується для керування. Якщо повідомлення про накопичення негентропії утворюють стаціонарний потік, можна запровадити середні оцінки щодо кількості інформації [149].

Нехай у середовищі деяка автономна система існує зі сприйняттями u_1 чи u_2 . Різниця швидкостей накопичення негентропії буде мірою відносної якості для двох сприйнятів. Наприклад розглянемо дизель транспортного судна як знакову систему. Сприйняття дизеля характеризується його параметрами, що вимірюються, тому що всяка зміна режиму роботи знаходить свій відбиток у зміні параметрів.

Приймемо R_1 за певний режим роботи двигуна. Стан вимірюваних параметрів позначимо $S_1 = (a_1, a_2, \dots, a_n)$. Під час зміни режиму роботи на R_1 стан параметрів зміниться на $\Delta S_1 = (\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n)$.

За цінність інформації параметра, що вимірюється, можна прийняти відносну швидкість його зміни в проміжку часу зміни режиму роботи ΔR . Наприклад, припустимо, що робота транспортного дизеля характеризується кількістю обертів вала n , тоді будь-який параметр розглядається залежно від обертів, тобто $a_i = f(n)$. Під час зміни режиму відбувається зміна n на Δn тоді параметр a_i зміниться на $a_i = f(n)\Delta n$, при цьому він пройде «шлях»

$$\Delta l = \Delta n \sqrt{(a'_i)^2 + 1},$$

$$\text{де } a'_i = \frac{\Delta a_i}{\Delta n}.$$

Відносна зміна параметра a_i щодо режиму $[n]$ виразиться відношенням

$$\frac{\Delta a_i}{\Delta l} = \frac{a_i'}{\sqrt{(a_i')^2 + 1}}.$$

Цю величину можна вважати цінністю параметра за інформацією, що він несе за зміни режиму роботи дизеля. Позначимо цю величину

$$Ca_i = \frac{a_i'}{\sqrt{(a_i')^2 + 1}}.$$

Маючи експериментальні або розрахункові дані щодо зміни параметрів двигуна під час зміни n , легко отримати цінність параметрів для кожного значення n за максимальним значенням Ca_i . Цінність параметра є функцією режиму роботи. Тому, природно очікувати, що у різних режимах роботи інформаційна цінність деяких параметрів виявиться різною [150].

Слід зазначити, що такі експлуатаційні параметри, як потужність, годинна витрата палива, середній індикаторний тиск, температура випускних газів, емісія шкідливих речовин зберігають інформаційну цінність дуже стабільно на змінних режимах.

Використання семіотичної оцінки інформації особливо ефективно, коли стоїть завдання вибору методу або способу вимірювання одного й того самого параметра за наявності декількох методів або способів вимірювання цього параметра.

Як свідчить досвід, розрахункові характеристики ніколи не співпадають з експериментальними. Це пояснюється тим, що статичний режим рівноваги відводу та підводу енергії під час експлуатації засобів транспорту безперервно порушується.

З урахуванням принципів системного підходу замкнений цикл наукового дослідження представлений у вигляді технологічної карти дослідження [145], що наведена на рис. 2.3.

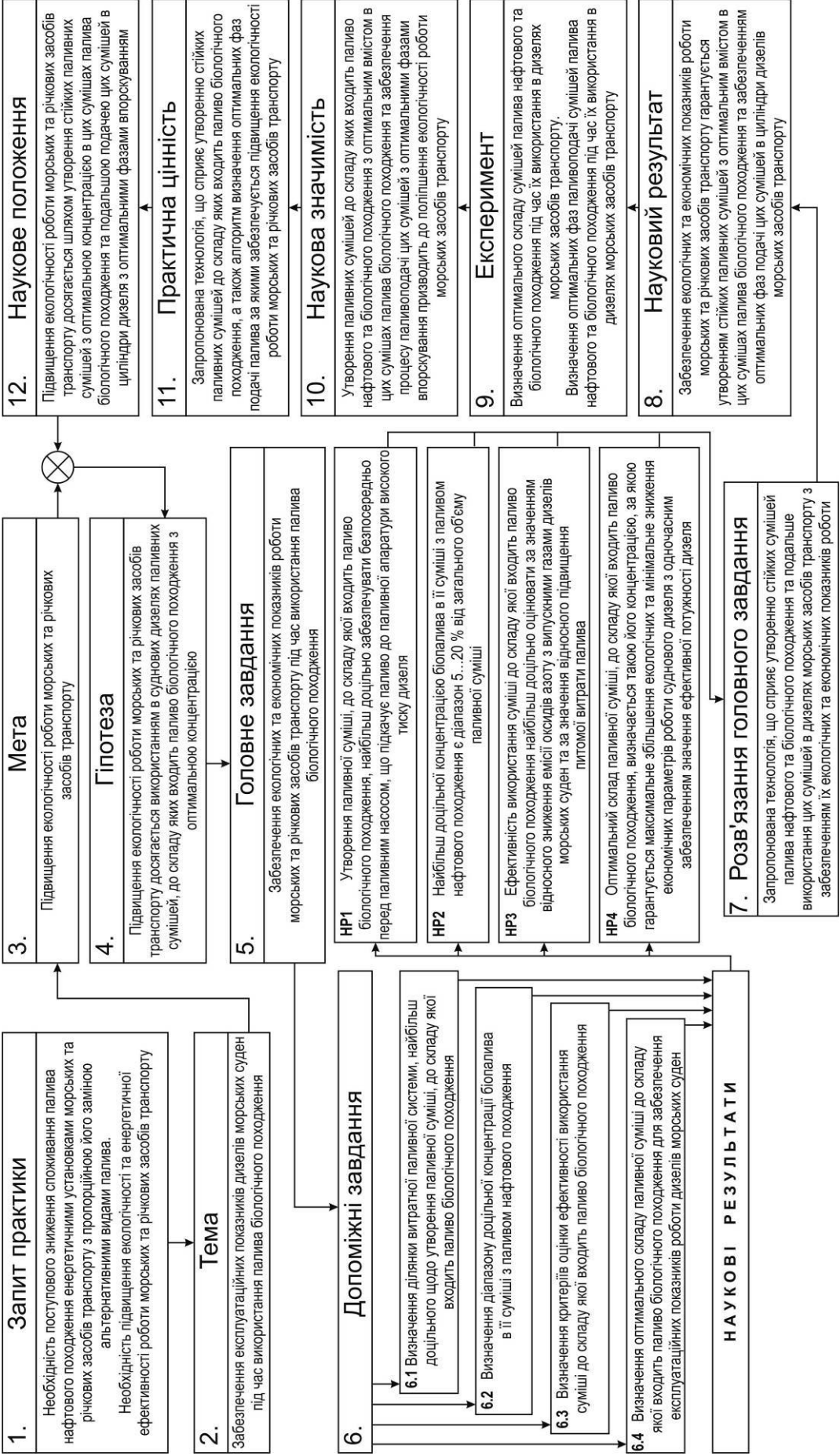


Рис. 2.3. Технологічна карта наукового дослідження

2.4. Висновки за розділом 2

Як результат загальної методики виконання дисертаційної роботи визначимо наступне.

1. Експертна оцінка з можливих варіантів розв'язання сучасного науково-прикладного завдання (яким є забезпечення екологічних та економічних показників роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту) за критеріями: актуальність, наукова новизна, практична доцільність, можливість використання на морських та річкових засобах транспорту, відповідність спеціальності 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» – визначила, що найбільш сприятливим із них є використання палива біологічного походження.

2. Використання системного аналізу дозволило сформулювати мету, висунути наукову гіпотезу, визначити головне завдання дослідження та виконати його декомпозицію на сукупність допоміжних завдань, розв'язання яких забезпечує розв'язок головного завдання.

3. Як об'єкт дослідження визначено процес експлуатації дизелів морських та річкових засобів транспорту, як предмет дослідження обрано процес забезпечення експлуатаційних показників роботи дизелів морських та річкових засобів транспорту.

4. Спираючись на принципи системного підходу під час виконання наукових досліджень, розроблено технологічну карту, яка відображає замкнений цикл дослідження та визначає його основні етапи.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, ЩО ВІДОБРАЖАЮТЬ ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ, ЯКІ МІСТЯТЬ ПАЛИВО БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Третій розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню першого та другого допоміжного завдань, якими є:

визначення ділянки витратної паливної системи, найбільш доцільного щодо утворення паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

визначення діапазону доцільної концентрації біопалива в її суміші з паливом нафтового походження.

Основні результати розділу викладені в роботах [56], [57], [102], [103], [109], [112], [138], [168], [175], [176].

3.1. Аналіз гідродинамічних процесів, що перебігають у паливних системах дизелів морських суден

Гідродинамічні явища, що виникають під час руху технічних рідин (в тому числі палива нафтового та біологічного походження), сприяють утворенню сумішей цих рідин з різним ступенем стійкості. На стійкість суміші, що складається з декількох рідин, впливають експлуатаційні характеристики рідини, перш за все її густина або в'язкість та тиск, за яким вона рухається. Також стійкість сумішей залежить від явищ кінетичної та конвективної дифузії, що виникають під час руху та взаємодії рідин, що змішуються.

Гідродинамічні чинники значною мірою визначають характер перебігу багатьох хімічних та фізико-хімічних процесів. До таких процесів

відносяться перш за все гетерогенні перетворення в рідинах і газах. Під гетерогенними перетвореннями або реакціями маються на увазі хімічні або фізико-хімічні перетворення, що відбуваються на деяких поверхнях, наприклад, на межах розділу фаз або на поверхнях, що мають каталітичні властивості. При такому широкому розумінні терміна «гетерогенні перетворення» до них слід віднести всі каталітичні реакції, адсорбцію та десорбцію на твердих та рідких поверхнях; розчинення та осадження кристалів з розплавів та розчинів; електрохімічні реакції, що йдуть на поверхні електрода, зануреного в розчин електроліту: випаровування, сублімацію та конденсацію; адсорбцію газів рідкими та твердими поверхнями та інше [153].

Будь-яка гетерогенна реакція включає кілька стадій: першою є стадія перенесення частинок, що реагують, до поверхні, де відбувається реакція (реакційної поверхні); на другій стадії процесу відбувається власне гетерогенна реакція (хімічне перетворення, адсорбція-десорбція, розряд та утворення іонів, сумішоутворення тощо); третя стадія полягає у відведенні частинок, що прореагували від місця реакції.

Іноді перебіг гетерогенної реакції супроводжується побічними процесами: значним тепловиділенням, утворенням бульбашок під час виділення газоподібних продуктів реакції і таке інше, що ускладнюють перебіг процесу.

Сумарна швидкість гетерогенного процесу визначається швидкостями окремих етапів реакції. Якщо, однак, швидкість одного з етапів процесу менша, ніж швидкість інших, то, як завжди для реакцій, що йдуть у кілька послідовних стадій, сумарна швидкість процесу визначатиметься швидкістю найбільш повільної стадії. У тому випадку, коли повільною стадією процесу є подача або відведення одного з компонентів від місця реакції, кажуть, що реакція йде в дифузійній ділянці або дифузійній кінетиці. Якщо повільною стадією є стадія хімічного чи фізичного перетворення, швидкість реакції визначається кінетикою цього процесу. Якщо швидкості перенесення

реагентів та хімічної реакції можна порівняти між собою, відповідні реакції називаються гетерогенними реакціями змішаного типу [154].

З хімічної точки зору найбільший інтерес становлять реакції, швидкість яких визначається хімічною кінетикою. Проте фактично більшість гетерогенних реакцій перебігає дифузійною кінетикою. Прикладами подібних реакцій можуть бути процеси адсорбції добре розчинних газів рідинами, більшість випадків розчинення твердих тіл у рідинах, більшість електрохімічних і швидких каталітичних реакцій, сумішоутворення двох та більше рідин зі схожими функціональними та структурними характеристиками та інші.

Між дифузією речовини (до якої в тому числі відноситься утворення сумішей двох рідких речовин) і перенесенням тепла в рідкому середовищі існує тісний зв'язок, і може бути проведена ціла низка аналогій. Одним з найцікавіших додатків теорії дифузійної кінетики є її застосування до досліджень складних питань сумішоутворення (не тільки палива та повітря в циліндрі дизеля, а й двох різних видів палива) та теплопередачі, особливо в умовах підвищених швидкостей та тисків середовищ, що рухаються.

3.2. Аналітичне визначення процесів дифузійної кінетики в рідинах

Процеси дифузійної кінетики в рідинах визначаються рівняннями Нернста та Ленгмюра [155, 156].

Вивчення швидкостей гетерогенних процесів у рідинах ґрунтується на вивченні найпростішої дифузійної кінетики розчинення однієї речовини в іншій. Експериментальний закон розчинення Нернста може бути записаний як

$$Q = k(c_n - c_0)S,$$

де Q – кількість речовини, розчиненої в одиницю часу;

S – площа, на якій здійснюється розчинення;

c_n – концентрація насиченого розчину;

c_0 – фактична концентрація розчину в даний момент часу;

k – коефіцієнт пропорційності.

Коефіцієнт k пропорційний коефіцієнту дифузії речовини в рідині D , так що вираз Q може бути записаний у вигляді

$$Q = D \frac{c_n - c_0}{\delta} S, \quad (3.1)$$

де δ – деяка постійна.

Формула (3.1) виражає основний зміст теорії гетерогенних реакцій, запропонованої Нернстом. Відповідно до теорії Нернста, у шарі рідини, безпосередньо прилеглому до поверхні твердого тіла, що розчиняється, завжди виникає насичений розчин речовини, що розчиняється. Швидкість гетерогенних реакцій, що перебігають по дифузійній кінетиці, визначається дифузією, яка виникає внаслідок наявності різниці концентрацій речовини, що розчиняється між шаром рідини, безпосередньо прилеглим до поверхні, і товщі рідини. Якщо δ означає розмір області, що проходить дифузійними частинками, формула (3.1) виражає звичайний закон стаціонарної дифузії в нерухомому середовищі між нескінченними площинами, на яких задані різні концентрації c_n і c_0 , що знаходяться на відстані δ . У простору, утвореному між цими площинами, залежність концентрації від координати визначається лінійним законом.

Як правило, однак, швидкості реакцій, що йдуть по дифузійній кінетиці в нерухомому середовищі, надзвичайно малі, оскільки коефіцієнт дифузії в рідинах D дуже малий. З останньою обставиною пов'язано те, що в нерухомому середовищі доводиться обмежуватися реакціями, що йдуть по дифузійній кінетиці в нестаціонарному режимі. Так, наприклад, швидкість електрохімічної реакції в нерухомому середовищі настільки мала, що помітні

струми між електродами виникають тільки протягом часу, що не перевищує період встановлення стаціонарного режиму. Насправді у переважній більшості випадків прагнуть підвищити швидкість реакцій, вдаючись до розмішування середовища з допомогою штучної чи природної конвекції. Більше того, оскільки в малов'язких рідинах, до яких відносяться зокрема паливні суміші, поява невеликих змін густини призводить до виникнення природної конвекції, дуже рідко вдається проводити реакцію за умов повної нерухомості середовища. Різниці концентрацій, що виникають у ході реакції або тепловиділення, зумовлюють зміну густини рідини, що, у свою чергу, веде до природної конвекції, завдяки якій відбувається енергійне перемішування рідини та прискорює сумішоутворення [157].

Таким чином, необхідно розглянути питання про механізм перенесення речовини в розчині, що рухається. Експериментальний закон (3.1) дозволяє знайти значення δ , виходячи з відомих значень Q , концентрацій c_n і c_0 та відомого коефіцієнта дифузії D . Товщина δ має назву товщини дифузійного шару Нернста. Оскільки в межах товщини дифузійного шару рідина вважається нерухомою, розподіл концентрацій у ньому знаходиться легко з розв'язання рівняння дифузії в нерухомому середовищі. Таким чином, згідно з теорією Нернста, у випадку рідини, що рухається, як і у випадку нерухомої, формула (3.1) повинна інтерпретуватися як вираз для потоку речовини, що дифундує під дією різниці концентрацій ($c_n - c_0$).

Теорія Нернста не дозволяє обчислювати значення товщини дифузійного шару δ та її залежності від швидкості руху рідини. Експериментально було показано (з вимірювання значень потоків Q), що вона має вигляд статечної залежності

$$\delta \approx \frac{1}{v^n},$$

де v – швидкість руху рідини.

Показник ступеня n залежить від умов експерименту і лежить у межах від $n=0,5 \dots 1$.

Теорія Нернста набула широкого поширення, особливо в електрохімії, і зіграла свого часу позитивну роль у розвитку теорії гетерогенних реакцій. Загальна ідея теорії Нернста – уявлення про те, що поблизу електрода є тонкий шар рідини, в якому відбувається зміна концентрації, – була підтверджена прямими вимірами. Проте в останні роки з'явилася значна кількість робіт, у яких ця теорія піддавалася справедливій критиці, і на даний час вона має бути визнана незадовільною. Досить, наприклад, зазначити, що прямі експериментальні вимірювання показали, що на відстанях $\approx 10^{-5}$ см від твердої стінки спостерігається рух рідини [158, 159]. Якщо, однак, вважати, що рідина в межах дифузійного шару не є нерухомою, лінійний закон розподілу концентрації втрачає обґрунтування.

Формула (3.1), що представляє теоретично обґрунтований вираз для дифузійного потоку в нерухомому середовищі, у випадку середовища, що рухається, повинна розглядатися як суто емпірична формула. Особливо ясно емпіричний характер цієї формули проявляється в тому, що товщина дифузійного шару виявляється залежною від коефіцієнта дифузії частинок. Останнє означає, що за заданих умов досліду кожному іону або атому, що дифундує у розчині, відповідає своя товщина дифузійного шару. Теорія Нернста незадовільна ще й в іншому відношенні: вона не дозволяє визначити або хоча б оцінити значення потоку теоретично, оскільки товщина в ній не обчислюється. Тому вона є якісною теорією дифузійної кінетики гетерогенних перетворень. Необхідно, однак, підкреслити, що з того факту, що рідина зберігає свою рухливість аж до вельми малих відстаней до твердої стінки, значно менших δ , аж ніяк не можна робити висновок про відсутність дифузійної стадії процесу.

Теорія Нернста стала вельми поширеною під час розгляду проблеми розчинення та сумішоутворення, теоретичного проходження струмів рідини

через сталу рідину, а також в інших випадках, коли вивчалися гетерогенні реакції на межах розділу «рідина – тверде тіло».

Інша дуже близька до неї по суті теорія дифузійної кінетики гетерогенних реакцій набула загального поширення в хімічній технології. Це плівкова (фільмова) теорія, запропонована Ленгмюром [155, 156]. Відповідно до цієї теорії, поблизу поверхні розділу рухомих фаз (як рідина – тверде тіло, також і рідина – рідина) є тонкий шар речовини, відмінний за своїми властивостями від головної маси дисперсного середовища, що рухається. Цей шар отримав назву плівки чи фільму. Плівка являє собою зону, що лежить між нерухомим і середовищем, що рухається. Так, наприклад, згідно з фільмовою (плівковою) теорією, поблизу межі розділу «тверде тіло – рідина» є рідинна плівка, в якій властивості рідини, зокрема щодо перенесення в ній речовини або енергії, відмінні від властивостей об'ємної рідкої фази. На межі розділу рухомих фаз «рідина – рідина» утворюються дві плівки – з кожного боку рідини, що рухається. З часом завдяки дифузійному потоку межі цих плівок розчиняються, проте спочатку властивості рідини з кожного боку цієї плівки відмінні від властивостей в об'ємі.

У плівковій теорії вводяться припущення щодо властивості плівки. Зокрема, передбачається, що у плівці відсутній відносний рух фаз. Це означає, що на поверхні розділу «тверде тіло-рідина» плівка є нерухомою, як це вважається в теорії Нернста. У разі плівки на поверхні розділу «рідина – рідина» та «рідина – газ» вважається, що в рідинній та газовій плівках відсутній рух плівок одна щодо одної. Вважається, що рух рідини і газу плівок має суворо ламінарний характер, причому швидкості руху мають лише компоненти, паралельні поверхні розділу. Тоді, за припущенням плівкової теорії, рух у плівці не відіграє роль перенесенні речовини і останнє обумовлено молекулярною дифузією через плівку.

Під час обґрунтування плівкової теорії посилаються зазвичай на досліді Ленгмюра, який виявив існування в газі поблизу поверхні твердого тіла досить широкого шару (близько декількох міліметрів), в якому відбувається

основна зміна температури. Надалі подібні властивості були виявлені для меж розділу рідина – тверде тіло [160], а також рідина – рідина [161].

Плівкова теорія, подібно до нернстової, характеризує процес перенесення речовини в рідині, що рухається, лише в якісному відношенні. Вона не дозволяє обчислювати величини дифузійних потоків.

Явища, дуже подібні до конвективної дифузії, докладно вивчалися в теорії теплопередачі. У дифузійній кінетиці вивчається процес перенесення речовини в рідині, що рухається, у той час як у теорії теплопередачі розглядається процес перенесення енергії в тих самих умовах.

У доповнення до теорій Нернста і Ленгмюра в області дифузійних явищ може бути використана кількісна теорія теплопередачі в середовищах, що рухаються, яка розроблена для різних режимів течії та різних геометричних умов руху рідини. У разі рідин, однак, необхідно враховувати деякі їх специфічні особливості, які, не змінюючи принципової схеми теорії, призводять до інших кількісних результатів. Також під час вивчення явища перенесення речовини необхідно використовувати методи подібності, що набули широкого поширення в гідродинаміці та теорії теплопередачі. Однак при всій цінності методу подібності він не відображає механізм процесів дифузії в рідких середовищах, що рухаються.

3.3. Конвективна дифузія в рідинах

З прикладного боку гідромеханіки найбільший інтерес викликає поведінка рідини (або газу), що містить домішки певної речовини. Така сполука двох речовин є розчином (у разі використання твердої та рідкої речовини) або сумішшю (у разі використання двох рідких речовин). Існують також газові суміші (у разі, коли однією з речовин є газ, іншою – тверда або рідка речовина).

Склад розчину / суміші характеризується концентрацією, яка визначається як число частинок розчиненої речовини, що містяться в одиниці об'єму рідини [162].

У стані рівноваги в рідині, що містить розчинені речовини, виконуються умови термодинамічної рівноваги: відсутність макроскопічного руху, сталість температур T , тиску p і парціального (хімічного) потенціалу $\mu = f(T, p, c)$.

Порушення рівноваги в рідині пов'язане з наявністю в ній макроскопічного руху (течії) та зі зміною концентрації розчиненої речовини від точки до точки. Для паливних сумішей, що використовуються в суднових дизелях, їхня температура вважається постійною. Тиск в об'ємі паливної суміші не є постійним, проте градієнт тиску передбачається досить малим. Ці умови забезпечують створення однорідних паливних сумішей.

Рух рідини визначатиметься об'ємними та поверхневими силами, що діють на неї. Воно описуватиметься рівняннями руху

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\text{grad} p + \mu \Delta v + f, \quad (3.2)$$

або

$$\frac{dv}{dt} + (v \text{ grad}) v = -\text{grad} \frac{p}{\rho} + v \Delta v + \frac{f}{\rho}$$

(яке є однієї з форм подання рівняння Нав'є – Стоксу)

та безперервності

$$\text{div } v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (3.2)$$

в яких v , p , ρ , ν , μ – швидкість руху, тиск, густина, динамічна та кінематична в'язкість рідини відповідно;

f – об'ємна сила, яка діє на елемент рідини.

Рівняння (3.2), (3.3) визначають стан рідини, що не стискається та рухається. При цьому густина рідини є величиною постійною за часом та в просторі. Також рівняння (3.2), (3.3) відображають в кожній точці простору та в кожний момент часу величини основних компонентів, що характеризують рух рідини, а саме складових швидкості за трьома осями v_x , v_y , v_z та тиску p .

Перенесення речовини в рідині, що рухається, обумовлений двома абсолютно різними механізмами. По-перше, за наявності різниці концентрацій у рідині виникає молекулярна дифузія; по-друге, частинки речовини, розчиненої в рідині, захоплюються останньою в процесі її руху та переносяться разом із нею. Сукупність обох процесів обумовлюється конвективною дифузією речовини в рідині [163].

Якщо в аналізованій рідині або на її межі відбувається деяке перетворення, в якому беруть участь розчинені частинки, їх концентрація може змінюватися від точки до точки і залежати від часу.

Напишемо диференціальне рівняння, якому повинна задовольняти функція $c(x, y, z, t)$ в рідині, що рухається. Рух рідини вважатимемо стаціонарним і ламінарним, а саму рідину – такою, що не стискується.

Наявність змінної від точки до точки концентрації обумовлює порушення умови рівноваги та появу в рідині дифузійного потоку речовини. Якщо градієнти концентрації, що виникають в рідині, малі, можна вважати малими і градієнти парціального потенціалу. Тоді для дифузійного потоку (числа частинок, що проходять за 1 с через 1 см² уявної площини, проведеної в розчині) можна написати:

$$j_D = -\alpha \text{grad} \mu,$$

де α – деякий коефіцієнт пропорційності, що вважається позитивним.

Механізмом перенесення частинок, що зумовлює появу дифузійного потоку рідини, є молекулярна дифузія. Виражаючи градієнт μ через концентрацію, маємо:

$$j_D = -\alpha \left(\frac{\partial \mu}{\partial c} \right)_{T,p}.$$

При цьому градієнт температури відсутній, а градієнт тиску настільки малий, що викликаним ним потоком частинок можна знехтувати порівняно з потоком, зумовленим змінною концентрацією. Знак мінус показує, що дифузійний потік частинок спрямований від місць з більшою до місць меншою концентрацією. Ввівши коефіцієнт дифузії D , що визначається рівністю

$$D = \alpha \left(\frac{\partial \mu}{\partial c} \right)_{T,p},$$

можна подати дифузійний потік у вигляді

$$j_D = -D \text{grad} c.$$

Коефіцієнт дифузії D залежить від концентрації розчину c , і навіть від температури T – $D = f(c, T)$. Якщо концентрація розчину мала, значення D вважатимуться постійним, незалежно від концентрації. Тоді дифузійний потік пропорційний градієнту концентрації і направлений у бік зменшення концентрації розчину [164].

Якщо розчинена речовина знаходиться в рідині, що рухається, то ця рідина захоплює у своєму русі розчинену речовину. При цьому поряд з дифузійним потоком j_D через 1 см^2 уявної площини, проведеної в рідині, за 1 с переноситься потік речовини

$$j_{\text{конв}} = cV,$$

що рухається разом з об'ємом рідини V , що проходить через цей майданчик за 1 с . Повний потік речовини, що складається з конвективного та дифузійного потоків, виражається вектором

$$j = cV - D \text{grad} c.$$

Якщо розчин знаходиться в неізотермічних умовах або на нього діють зовнішні силові поля (наприклад, гравітаційне поле або електричне поле у випадку іонного розчину), то в повний потік входять додаткові доданки. Вираз для повного потоку з постійним значенням коефіцієнта дифузії D справедливий, лише у сумішах із досить малою концентрацією. Суттєво також, що D визначено не безпосередньо як коефіцієнт пропорційності в потоці j , але через похідну $\left(\frac{\partial \mu}{\partial c}\right)_{T,p}$.

Виділимо в тілі довільний об'єм V і знайдемо баланс числа частинок, що входять та виходять із нього в одиницю часу. Число частинок, що проходять через поверхню S протягом секунди, очевидно, дорівнює

$$Q = - \oint j dS,$$

де інтеграл береться з поверхні S , яка оточує об'єм V ; за позитивний напрямок вектора зовнішньої нормалі обрано напрямок від поверхні назовні.

Якщо $\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)$ дорівнює зміні числа частинок в одиниці об'єму за 1 с, то зміна числа частинок в об'ємі V дорівнює $\int \frac{\partial c}{\partial t} dV$. Прирівнюючи зміну числа частинок в об'ємі кількості частинок, що приходять до нього, маємо:

$$\int \frac{\partial c}{\partial t} dV = - \oint j dS.$$

Перетворюючи інтеграл правої частини рівняння за Формулою Гаусса-Остроградського, маємо:

$$\int \frac{\partial c}{\partial t} dV = - \int \operatorname{div} j dV. \quad (3.4)$$

Зважаючи на довільність об'єму з виразу (8.3) випливає, що

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\operatorname{div} j$$

або

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c) - \operatorname{div} c V.$$

Нехтуючи залежністю коефіцієнта дифузії від концентрації та вважаючи його постійним, можна написати:

$$\operatorname{div}(D \operatorname{grad} c) = D \operatorname{div} \operatorname{grad} c = D \Delta c. \quad (3.5)$$

Далі

$$\operatorname{div}(cV) = (V \operatorname{grad})c + c \operatorname{div} V.$$

Через те, що рідина не стискається, $\operatorname{div} V = 0$. Тому остаточно рівняння (3.5) можна подати у вигляді

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (V \operatorname{grad})c = D \Delta c. \quad (3.6)$$

Рівняння (3.6) є загальним рівнянням конвективної дифузії. У координатному поданні його можна записати так:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right). \quad (3.7)$$

Швидкість перебігу рідини v , що входить до рівняння конвективної дифузії, є функцією координат. Тому з математичної точки зору рівняння конвективної дифузії є рівнянням з частинним похідними другого порядку і зі змінними коефіцієнтами. Як відомо з теорії рівнянь з частинним похідними, завдання рівняння, якому має задовольняти шукана величина (у даному випадку – розподіл концентрації $c(x, y, z, t)$), недостатньо для повного

формулювання завдання. У доповнення до рівняння мають бути вказані граничні та початкові умови, яким повинна задовольняти функція $c(x, y, z, t)$.

Рівняння конвективної дифузії суттєво спрощується, якщо розподіл концентрації можна вважати таким, що не змінюється в часі. Законність такого припущення зазвичай стає зрозумілою з аналізу фізичних умов процесу. Якщо c не залежить від часу, то $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$, то замість (3.6) отримуємо для розподілу концентрації рівняння

$$(\mathbf{v} \text{grad})c = D\Delta c.$$

Інше суттєве спрощення рівняння (3.5) має місце у разі нерухомості рідкого середовища. У цьому випадку $\mathbf{v} = 0$, і рівняння (3.5) перетворюється на звичайне рівняння молекулярної дифузії:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c.$$

На відміну від рівняння конвективної дифузії, в якому містяться коефіцієнти, що залежать від координат – компоненти швидкості v_x , v_y та v_z , – рівняння молекулярної дифузії представляє рівняння з частинними похідними другого порядку з постійними коефіцієнтами.

Розв'язання останнього рівняння за різноманітних граничних та початкових умов детально вивчені в математичній фізиці у зв'язку із завданнями теорії теплопередачі. Як відомо, розподіл температур у нерухомому середовищі задовольняє такому ж рівнянню, що і розподіл концентрації, в якому замість коефіцієнта дифузії фігурує температуропровідність середовища [163].

У деяких випадках доводиться вивчати розподіл концентрації речовини, що змінюється в результаті хімічних або інших процесів, у результаті рекомбінації або іонізації, що відбуваються, наприклад, у всьому об'ємі рідини, або деякій об'ємній хімічній реакції, в якій беруть участь розчинені

частинки. У цьому випадку рівняння конвективної дифузії має бути доповнено членом, який враховує появу або зникнення частинок об'ємом рідини. Нехай у деякому елементі dV , що знаходиться в об'ємі рідини, виникає або зникає речовина. Позначимо через $Q_0(r)dV$ число частинок, що виникають в 1 с об'ємом dV , що знаходиться навколо точки r . Розмір Q_0 визначається як потужність джерела. Якщо частки зникають, чи не виникають, то Q_0 негативно. Вводячи Q_0dV в баланс частинок в об'ємі V , маємо замість (3.4)

$$\int \frac{\partial c}{\partial t} dV = -\oint j dS + \int Q_0 dV.$$

Звідки

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div} j + Q_0$$

або

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\mathbf{v} \text{grad}) c = D \Delta c + Q_0.$$

Слід зазначити, що Q_0 – величина, що має об'ємний характер. Частинки, що зникають або виникають на поверхні реакції, враховуються лише граничними умовами. Наявність джерел або стоків на граничній поверхні не може відбиватися безпосередньо на рівнянні дифузії, оскільки воно відображає баланс числа частинок обсягом розчину. Рівняння конвективної дифузії за сутністю і формою схоже з рівнянням гідродинаміки Нав'є-Стокса. Останнє виражає баланс кількості руху, що переноситься у рідини, тоді як перше виражає баланс речовини. Тому в цьому випадку цілком допустимо використання тих самих методів розв'язку, які застосовуються до рівняння Нав'є-Стокса [77]. Наведемо рівняння конвективної дифузії до безрозмірного виду, ввівши характерний розмір L , на якому відбувається основна зміна концентрації, та характерну швидкість руху U_0 [164].

Розглядаючи спочатку випадок стаціонарного процесу, ми можемо написати:

$$\frac{v_x}{LU_0} \frac{\partial c}{\partial \left(\frac{x}{L}\right)} + \frac{v_y}{LU_0} \frac{\partial c}{\partial \left(\frac{y}{L}\right)} + \frac{v_z}{LU_0} \frac{\partial c}{\partial \left(\frac{z}{L}\right)} = \frac{D}{L^2 U_0} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial \left(\frac{x}{L}\right)^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial \left(\frac{y}{L}\right)^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial \left(\frac{z}{L}\right)^2} \right).$$

Вводячи безрозмірні компоненти швидкості

$$V_x = \frac{v_x}{U_0}, V_y = \frac{v_y}{U_0}, V_z = \frac{v_z}{U_0}$$

безрозмірні координати

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, Z = \frac{z}{L},$$

а також безрозмірну концентрацію

$$C = \frac{c}{c_0},$$

де c_0 – постійна концентрація в об'ємі суміші, маємо:

$$V_x \frac{\partial C}{\partial X} + V_y \frac{\partial C}{\partial Y} + V_z \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{D}{U_0 L} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right). \quad (3.8)$$

Безрозмірне відношення $Pe = \frac{U_0 L}{D}$ представляє критерій / число Пекле.

Вводячи до рівняння (3.8) число Пекле, можна записати його як

$$V_x \frac{\partial C}{\partial X} + V_y \frac{\partial C}{\partial Y} + V_z \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right). \quad (3.9)$$

Ліва частина рівняння конвективної дифузії характеризує конвективне перенесення речовини разом із рідиною, права частина – молекулярну дифузію. Вочевидь, що це безрозмірні члени, які входять у рівняння (3.9),

мають порядок одиниці. Тому співвідношення між конвективним та дифузійним перенесенням речовини характеризується єдиним числовим параметром – безрозмірним числом Пекле. Воно грає для процесу конвективної дифузії таку ж роль, як і число Рейнольдса для течії рідини.

Якщо число Пекле Pe мало то вираз, що входить до лівої частини рівняння (3.9), має старший порядок децимі порівняно з членами, що стоять у правій частині. Тому члени, що входять у ліву частину рівняння, як мають старший порядок малості, слід опустити і лише після цього прирівняти члени, що стоять у правій частині, нулю. Це означає, що розподіл концентрації визначається переважно процесом молекулярної дифузії [160]. Перенесення речовини конвекцією має при досить малому Pe дуже мале значення. З визначення числа Пекле випливає, що така ситуація має місце (за даною D) за досить малої швидкості руху рідини та в областях малого масштабу. Навпаки, якщо число Pe велике, то вираз у правій частині рівняння (3.9) малий. У цьому випадку розподіл концентрації визначається переважно конвективним перенесенням і молекулярною дифузією можна знехтувати. Слід відразу підкреслити, що останнє міркування може виявитися несправедливим у тій області рідини, в якій має місце різка зміна концентрації і де похідні від концентрації за однією з координат мають особливо велике значення. У цьому випадку члени, які містять зазначені похідні, матимуть молодший порядок зі всіх найменших, навіть якщо вони помножені на малий числовий множник [162].

Відношення числа Пекле до Рейнольдса є числом Прандтля (Pr):

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{U_0 L}{D} \cdot \frac{U_0 L}{\nu} = \frac{\nu}{D}.$$

Число Прандтля не залежить від швидкості течії та характерних розмірів і визначається виключно матеріальними константами, що характеризують перенесення імпульсу та речовини суто молекулярним механізмом.

3.4. Аналіз конструктивного виконання та комплектації паливних систем дизелів морських суден

Паливна система забезпечує функціонування, підтримання експлуатаційних характеристик та надійність роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Це досягається шляхом приймання, перекачування, збереження, очищення, підігріву, транспортування палива до дизелів та подальшого впорскування палива в циліндри [165].

Паливна система суднової дизельної установки складається з двох систем: низького та високого тиску. Призначення системи низького тиску – транспортування палива від відстійних танків / цистерн до системи високого тиску. При цьому необхідно забезпечити очищення палива, а також безперервність та однорідність потоку палива. Призначення системи високого тиску – впорскування палива в циліндр дизеля в необхідному об'ємі та за необхідними кутами впорскування.

До однієї з особливостей паливної системи відноситься її розповсюдженість майже по всьому корпусу судна, наприклад, на деяких суднах приймальні танки розміщуються в носовій частині судна, енергетична установка – в кормовій частині. Майже на всіх суднах виникає необхідність перекачування палива з одного або з іншого борту, а також з однієї палуби / платформи на іншу під час забезпечення його транспортування до дизеля. Під час транспортування палива воно піддається різному зовнішньому впливу з боку трубопроводів паливних магістралей, обладнання та вимірювальних приладів. Це спричиняє зміну деяких показників палива – насамперед густини та в'язкості (через підвищення або зниження його температури) та структурного складу (через потрапляння до палива води, органічних, неорганічних та механічних домішок) [102, 103].

Принципова схема одного з варіантів паливної системи низького тиску суднової дизельної установки показана на рис. 3.1.

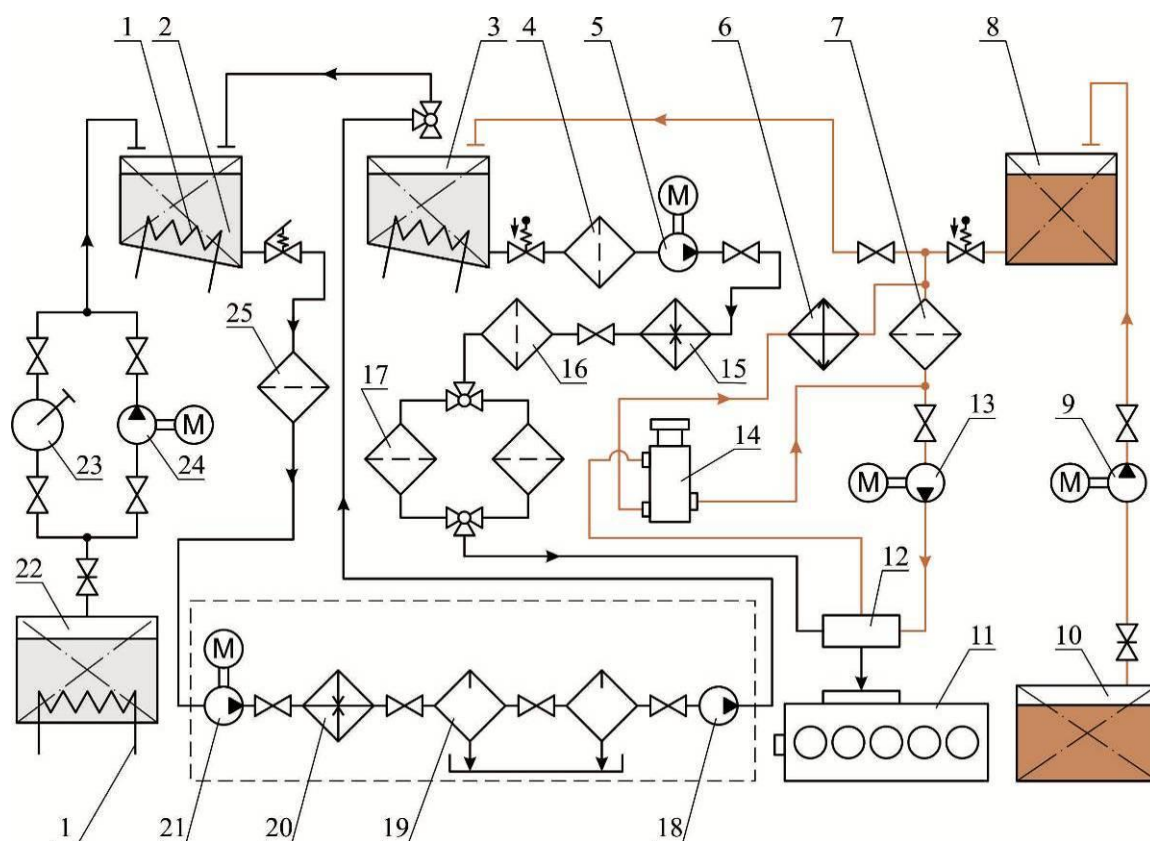


Рис. 3.1. Принципова схема паливної системи суднової дизельної установки

Система працює в такий спосіб. Під час експлуатації дизелів поза спеціальними екологічними районами SECAs для забезпечення його роботи використовується паливо, вміст сірки в якому може досягати 0,5 %. Подібне паливо з запасних цистерн 22, що мають змієвикові підігрівники 1, направляється насосами, що перекачують паливо (з електричним 24 або ручним 23 – в разі аварійної ситуації) до відстійної цистерни 2, яка також обладнана змієвиковим підігрівником 1. З відстійної цистерни 2 через фільтр грубого очищення 25 паливо спрямовується до сепараційної установки, яку складають компоненти 18-21. Паливний насос 21 подає паливо до електричного підігрівача 20 та сепаратори 19, перший з яких є пурифікатором, другий – кларифікатором. Насос 18 закачує паливо в витратну цистерну 3 з підігрівником 1. У схемі передбачено відведення теплоти від сепараційної установки до відстійної цистерни. З витратної цистерни паливо, яке пройшло очищення у фільтрі грубого очищення 4, насосом 5, що перекачує паливо, подається через підігрівник 15, фільтр

грубого очищення 16, спарений фільтр тонкого очищення 17 до блоку клапанів управління подачею палива 12. Блок управління 12 забезпечує подачу палива до паливних насосів високого тиску (у разі механічного нагнітання палива) або до загального трубопроводу високого тиску common rail (в разі електронного управління подачею палива) дизеля 11.

Під час експлуатації дизелів в районах SECAs його робота забезпечується на паливі, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %. Подібне паливо зберігається в окремих цистернах (цистерні 10 на рис. 3.1). Із запасних цистерн 10 паливо подається насосом 9 до витратної цистерни 8, звідки через фільтр 7 насосом 13, що перекачує паливо, потрапляє до блоку управління подачею палива 12. У зв'язку з меншою (порівняно з паливом, вміст сірки в якому досягає 0,5 %) густиною, паливо з низьким вмістом сірки може піддаватися охолодженню в теплообміннику 6. Контроль температури палива здійснюється за допомогою регулятора температури 14. Витоки палива з піддонів вітринних цистерн та фільтрів, а також витоки палива від дизеля збираються в стічну цистерну.

Сучасні сорти палива виробляються з використанням широкого діапазону видів сирової нафти та процесів її перегонки. Досвід експлуатації дизелів морських суден свідчить через несумісність деяких видів палив виявляються нестабільними під час змішування. Тому намагаються уникати змішування палива, яке може виникати в танках запасу палива (через неповне витрачання попередньо отриманого палива та поповнення цих танків іншим сортом палива під час бункерування) та витратних цистернах (через неминусе утворення осаду палива та наявності залишків палива, що використовувалось для роботи дизеля, з об'ємом палива, що додається в цистерну). Змішування несумісних палив у танках запасу та витратних цистернах може призвести до стратифікації густини палива та як наслідок – до прискорення утворення осадів з важких елементів, що входять до складу палива, збільшенню опору під час його перекачування та перериванню суцільності [166, 167].

3.5. Аналіз технологічних рішень, що забезпечують використання паливних сумішей під час експлуатації дизелів морських суден

Виготовлення паливних сумішей завжди використовувалось під час експлуатації суднових дизелів. Перш за все це було пов'язане з експлуатацією дизелів на пускових та перехідних режимах роботи, для яких з метою забезпечення надійного самозаймання використовувалось паливо з меншою температурою самозаймання. При цьому безпосередньо пускові режими здійснювались саме на таких сортах палива. Зі зростанням частоти обертання колінчатого вала до об'єму палива з низькою температурою самозаймання поступово додавалось паливо з більш високою температурою самозаймання – таке, на якому дизель експлуатувався тривалий час на сталих режимах роботи. Утворення цих сумішей здійснювалось в сумішній цистерні безпосередньо перед направленням цієї суміші до паливної апаратури високого тиску дизеля. Виготовлення подібних сумішей та час, протягом якого здійснювалось їх використання, носили випадковий характер та залежали від досвіду суднових механіків та характеристик дизеля [138, 168].

Також до категорії паливних сумішей необхідно віднести водопаливні емульсії, виготовлення яких здійснювалось безперервним або циклічним способом в окремому паливному блоці та після утворення також спрямовувалось до дизелю [98].

Суміші, на яких суднові дизелі здатні експлуатуватися тривалий час, можуть бути приготовані як на бункеровочних базах за допомогою спеціальних пристроїв-змішувачів, так і безпосередньо на морському судні. Для отримання сумішей можливо використання простих засобів – у вигляді завихрювального конуса або струменевого змішувача з подальшим багатократним прокачуванням суміші по замкнутому контуру насос – цистерна – насос.

Приготована суміш повинна мати дрібнодисперсну гомогенну структуру та бути стабільною, тобто зберігати свою структуру протягом достатнього тривалого часу її зберігання до моменту використання в дизелі. Втрата стабільності виражається в утворенні та випаданні на дно цистерн важких складових палива. Перш за все до них відносяться асфальтенові конгломерати, які у випадку потрапляння до паливної апаратури високого тиску погіршують розпилювання та згоряння суміші в циліндрах, а також інтенсивно забруднюють фільтри тонкого очищення, що в решті решт може призвести до зупинки дизеля.

Основна причина втрати стабільності – несумісність змішуваних компонентів двох палив, тому вкрай важливо перед змішуванням виконувати перевірку палива на сумісність. Друга причина – структура та тривалість зберігання суміші. Значно поліпшити структуру паливної суміші можливо через використання спеціальних змішувачів статичного або динамічного типу.

Ще одним з обов'язкових завдань під час виготовлення паливних сумішей є забезпечення їх необхідної в'язкості. Єдиним способом підтримання необхідної в'язкості палива або паливної суміші є підігрів. Одночасно з цим, необхідна температура підігріву палива залежить від його в'язкості. Недостатній підігрів палива (тобто занадто висока в'язкість) впливає на процес горіння, може викликати підвищений знос циліндрових втулок та поршневих кілець, може призвести до пошкодження сідел клапанів, може викликати занадто високий тиск впорскування, що у свою чергу призведе до підвищення напруженості в паливній системі.

Температурний контроль у паливній системі також вкрай важливий під час переведення дизеля з важкого палива на дистилятне. Висока остаточна температура паливних магістралей може стати причиною додаткового нагріву дистилятного палива та критичного зменшення його в'язкості.

Для визначення в'язкості суміші двох видів палива використовують спеціальні діаграми, приклад однієї з яких наведено на рис. 3.2 [169].

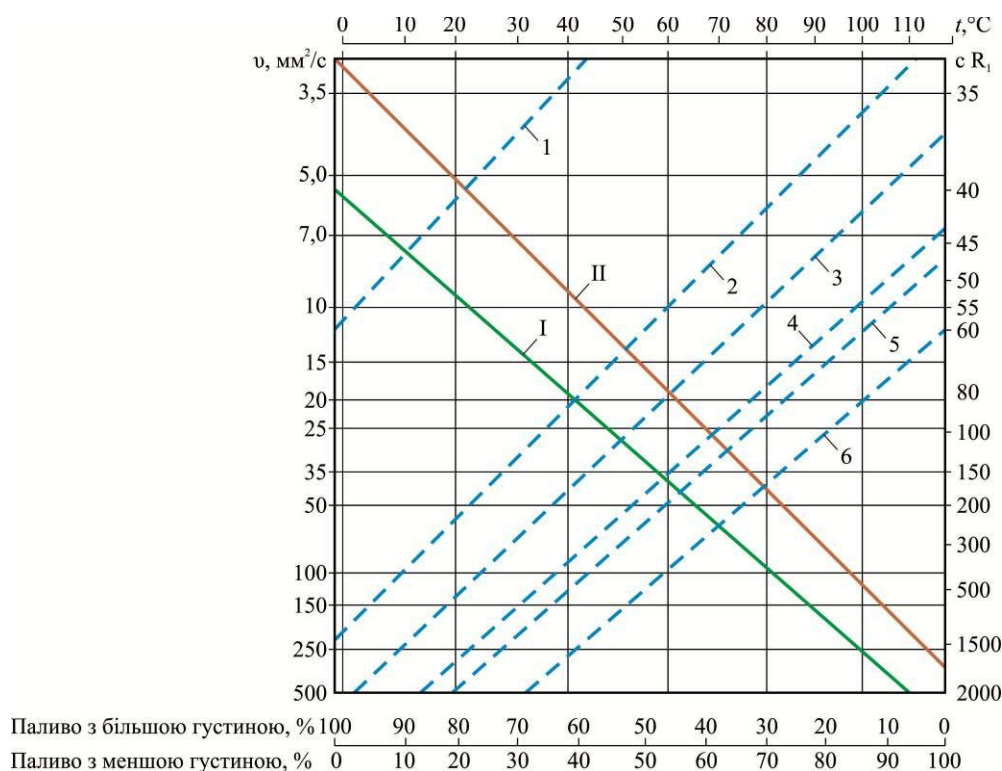


Рис. 3.2. Діаграма залежності в'язкості суміші двох видів палив від їх співвідношення та температури:

1 – $3,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ ($35 \text{ с } R_1$); 2 – $24 \text{ мм}^2/\text{с}$ ($100 \text{ с } R_1$); 3 – $50 \text{ мм}^2/\text{с}$ ($200 \text{ с } R_1$);
4 – $100 \text{ мм}^2/\text{с}$ ($400 \text{ с } R_1$); 5 – $145 \text{ мм}^2/\text{с}$ ($600 \text{ с } R_1$); 6 – $370 \text{ мм}^2/\text{с}$ ($1500 \text{ с } R_1$)

Паливні суміші треба обов'язково перевіряти на стабільність (наприклад, методами мікроскопії або плями). За умови зберігання більше ніж 30 діб паливну суміш необхідно піддавати перемішуванню (наприклад за допомогою рециркуляції за схемою цистерна – насос – цистерна) протягом не менше ніж 6 год. Під час виготовлення паливної суміші на судні, необхідно мати крім паспортів на її компоненти довідку про стабільність їх сумішей у співвідношенні, що забезпечує задану в'язкість. Довідка видається під час бункерування судна. Це ж потрібно також під час бункерування судна безпосередньо паливною сумішшю.

Під час виготовлення паливних сумішей безпосередньо на борту судна її зазвичай готують у відстійній або витратній цистерні. З метою отримання більш однорідних та стійких паливних сумішей можуть використовуватися спеціальні змішувальні установки, приклад комплектації однієї з них наведений на рис. 3.3 [109].

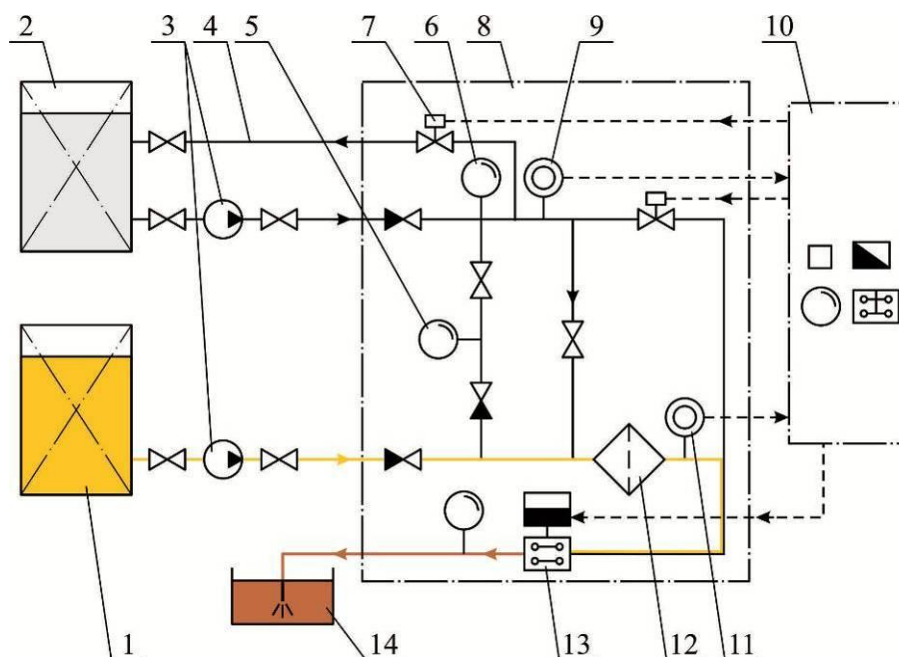


Рис. 3.3. Принципова схема змішувальної установки

1, 2 – цистерни палива з різними характеристиками; 3 – насоси для палива з різними характеристиками; 4 – магістраль повернення палива; 5 – манометр перепаду тиску палив з різними характеристиками; 6 – манометр; 7 – пневматичний клапан; 8 – змішувальна установка; 9, 11 – витратоміри палив з різними характеристиками; 10 – контрольно-управляюча панель; 12 – фільтр; 13 – магістральний змішувач; 14 – цистерна змішаного палива

Установка складається із змішувача з насосами та необхідної контрольно-вимірювальної апаратури, що скомпоновані на одній панелі. Процес змішування включає наступні операції: встановлення необхідної пропорції змішування палив за допомогою діаграм змішування та контроль необхідного співвідношення в спеціальному пристрої.

Функціонування системи забезпечується в такий спосіб. Змішувальна установка 8 складається з пневматичних клапанів 7, за допомогою яких забезпечується необхідна кількість палива з меншою густиною в паливній суміші; витратомірів 9 та 11, за допомогою яких здійснюється контроль складу паливної суміші; манометрів 5 та 6, що контролюють тиск та перепад тиску палив з різними характеристиками; фільтра 12, що забезпечує очищення палива з більшою густиною, та магістрального змішувача 13.

Палива з різними характеристиками знаходяться в цистернах 1 та 2. Обидва паливних трубопроводи, якими здійснюється перекачування палива, забезпечені насосами 3, які нагнітають паливо в бік магістрального змішувача 13. Кількість палива, що прямує до магістрального змішувача 13, визначається витратомірами 9 та 11. Кількість палива з меншою густиною (яке знаходиться в цистерні 2) регулюється шляхом керування потоку за допомогою пневматичних клапанів 7. Регулювання положення клапанів забезпечується з контрольно-управляючої панелі 10, до якої надходить інформація з витратомірів 9 та 11. Тиск у паливному трубопроводі палива з меншою густиною контролюється манометром 6. Перепад тиску палив з різними характеристиками контролюється манометром 5. Після додаткового очищення у фільтрі 12 паливо з цистерни 1 змішується з паливом з цистерни 2 та подається до магістрального змішувача 13, в якому здійснюється остаточне утворення паливної суміші. Паливна суміш, що утворилась в такий спосіб зберігається в цистерні 14 та надалі використовується в дизелі.

Ще один приклад установки для підготовки паливних сумішей наведено на рис. 3.4 [112]. У цьому випадку утворення суміші здійснюється в бустерній установці 8, подачу палива до якої забезпечують насоси 7, що нагнітають палива з різними характеристиками з витратних цистерн 4 та 6. Зберігання палива з більшою густиною здійснюється у відстійній цистерні 3, палива з меншою густиною – у відстійній цистерні 5. Додаткове очищення палива виконується в сепараційних установках 2, якими обладнані обидві паливні магістралі. Утворена в бустерній установці 8 паливна суміш потрапляє до змішувального баку 9 та далі спрямовується до блоку остаточної підготовки палива 10. До складу блоку 10 входять насоси 11, підігрівач 12, фільтри 13 та віскозиметр 14, які виконують відповідні функції. Утворена в бустерній установці 8 паливна суміш, якій в блоці 10 надані відповідні характеристики (тиск, ступень очищення та в'язкість) потрапляє до дизеля 1.

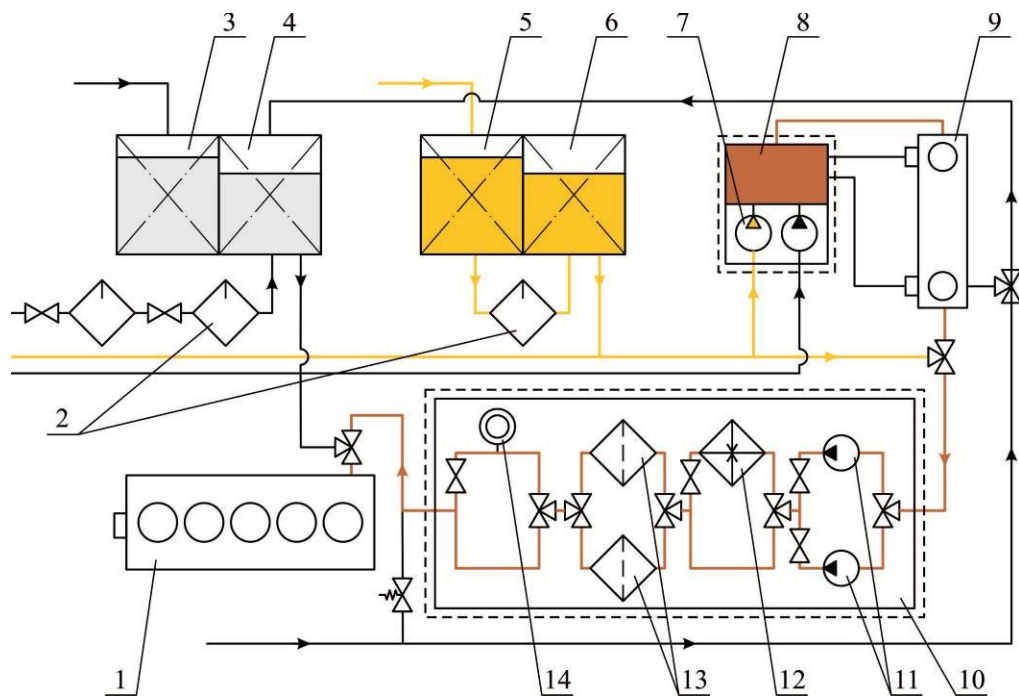


Рис. 3.4. Принципова схема увімкнення змішувальної установки:

1 – дизель; 2 – сепаратори; 3, 5 – відстійні цистерни палива з різними характеристиками; 4, 6 – витратні цистерни палива з різними характеристиками; 7, 11 – насоси; 8 – бустерна установка; 9 – змішувальний бак; 10 – блок остаточної підготовки палива; 12 – підігрівач; 13 – фільтр; 14 – віскозиметр

Для створення паливних сумішей з різних палив, в'язкість або густина яких збігаються, доцільно використовувати більш прості методи, наприклад, дозерні установки, які дозволяють утворювати паливні суміші з необхідною концентрацією складових компонентів.

Будь-яка змішувальна установка являє собою складну систему, до якої обов'язково входять насоси, що надають енергію потоку рідини, яка їм подається, та трубопроводу, за допомогою якого забезпечується підведення потоку рідини до місця призначення. Стосовно розглянутих питань як потік рідини виступає суміш нафтового палива та палива біологічного походження, як місця, до якого цей потік спрямовується – паливна апаратура суднового дизеля. Вочевидь, що параметри дизеля, місце його розміщення відносно цистерн, у яких зберігається паливо нафтового та біологічного походження,

всі види опорів в паливному трубопроводі, кількість необхідної паливної суміші визначають значення напору, який повинен бути забезпечений насосом.

Можливі варіанти комплектації паливної системи, яка забезпечує виготовлення паливної суміші дизельного палива та біопалива за допомогою дозерної установки наведені на рис. 3.5. Основними компонентами цієї ділянки паливної системи низького тиску є цистерна дизельного або дистильованого палива 1, цистерна палива біологічного походження 2, дозерна установка 3, паливний насос 4 та безпосередньо судновий дизель 5.

Розміщення цистерни з біопаливом 2 та дозерної установки 3 (якими додатково комплектується паливна система) відносно паливного насоса 4 та загального паливного трубопроводу, за яким здійснюється подача паливної суміші до дизеля 5 можливо або на верхній платформі машинного відділення (вище рівня насоса 4), або на нижчій платформі (нижче рівня насоса 4). При цьому (залежно від розміщення цистерни з біопаливом 2 та дозерної установки 3) можливі варіанти з різною висотою підйому біопалива z_2 під час його всмоктування паливним насосом 4, що подані на рис. 3.5. Для всіх випадків комплектації, нагнітання палива біологічного походження здійснюється насосом 4 з нижньої частини цистерни біопалива 2.

У випадку варіанту комплектації, що відповідає рис. 3.5, *а*, висота підйому біопалива $z_2 < 0$; для варіантів, що відповідають рис. 3.5, *б* та рис. 3.5, *в*, висота підйому біопалива $z_2 > 0$. Також визначимо, що для всіх варіантів висота підйому дизельного палива (що знаходиться в цистерні 1) $z_1 < 0$, висота підйому суміші дизельного палива та біопалива $z_3 > 0$.

Різні варіанти розміщення цистерни з біопаливом 2 та дозерної установки 3 впливають на гідравлічні втрати, що виникають у паливному трубопроводі на ділянці, яка відповідає утворенню паливної суміші та її руху до паливної апаратури високого тиску дизеля 5.

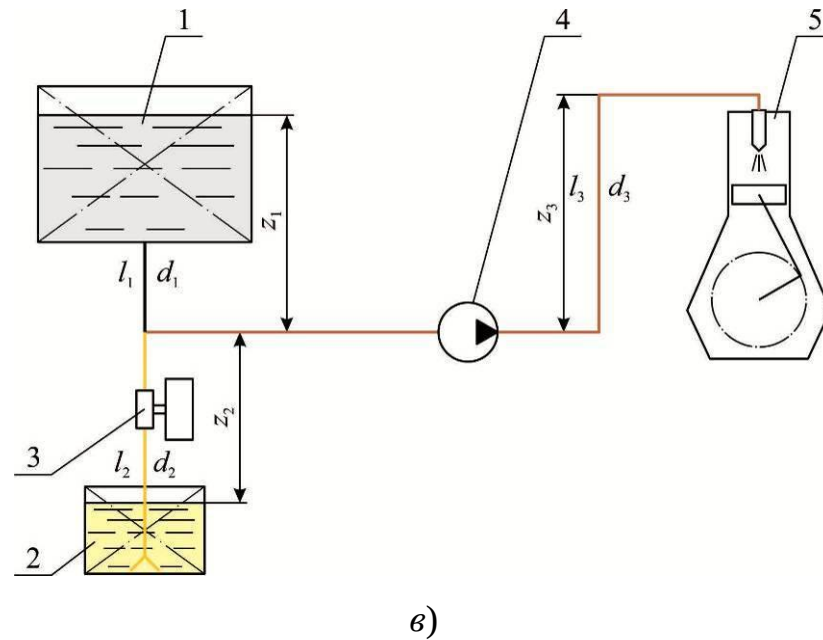
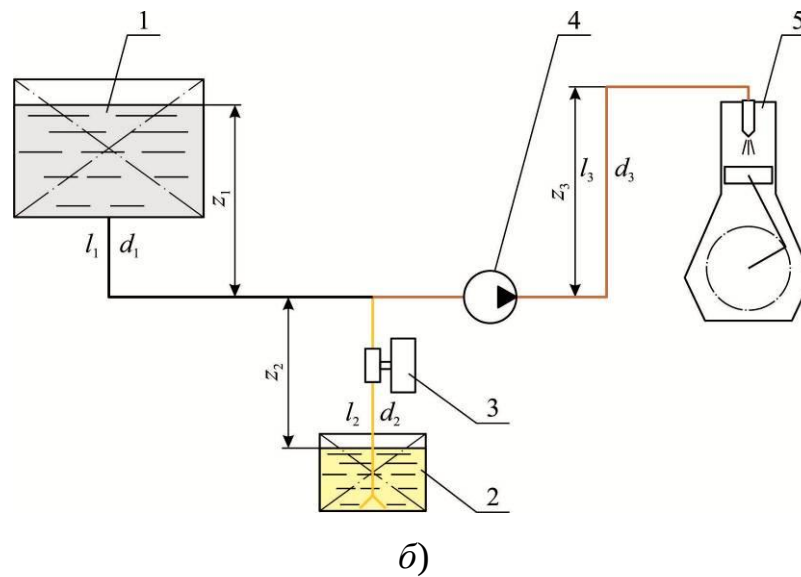
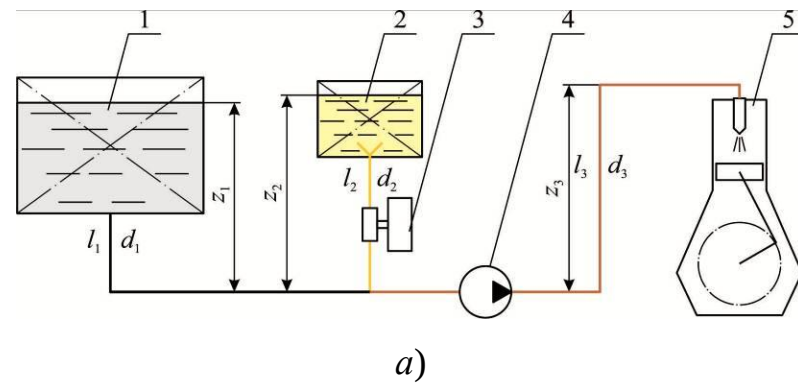


Рис. 3.5. Варіанти комплектації паливної системи з метою утворення паливної суміші дизельного палива та біопалива:

1 – цистерна дизельного палива; 2 – цистерна біопалива; 3 – дозерна установка; 4 – паливний насос; 5 – дизель

Напевно, що напір для подачі паливної суміші по паливних трубопроводах $H_{\text{тр}}$ складатиметься зі статичної $H_{\text{ст}}$ та динамічної $H_{\text{дин}}$ складових:

$$H_{\text{тр}} = H_{\text{ст}} + H_{\text{дин}}.$$

Статична складова $H_{\text{ст}}$ визначається тиском P , що забезпечує паливний насос, та густиною паливної суміші ρ :

$$H_{\text{ст}} = \frac{P}{\rho} + g(z_1 + z_2 + z_3). \quad (3.10)$$

Негативне значення висоти підйому дизельного палива $z_1 < 0$ та висоти підйому біопалива $z_2 < 0$ (що забезпечується в схемі комплектації, що відповідає рис. 3.5, а) призводить до зменшення складової $g(z_1 + z_2 + z_3)$ в рівнянні (3.10) та відповідного зменшення статичної складової $H_{\text{ст}}$, що характерна для цього випадку. Це в подальшому сприятиме зменшенню потужності насосу, що забезпечує нагнітання паливної суміші до дизеля [170].

Динамічна складова $H_{\text{дин}}$ враховує гідравлічні опори, що виникають на всіх ділянках трубопроводу залежно від їх довжини l_1, l_2, l_3 та діаметра d_1, d_2, d_3 , під час всмоктування дизельного палива та біопалива та нагнітання паливної суміші. Значення $H_{\text{дин}}$ може бути визначене за виразом:

$$H_{\text{дин}} = \sum_{\text{вт}} \xi \frac{v_1^2}{2} + \lambda \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2} + \sum_{\text{вт}} \xi \frac{v_2^2}{2} + \lambda \frac{l_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2} + \sum_{\text{нт}} \xi \frac{v_3^2}{2} + \lambda \frac{l_3}{d_3} \frac{v_3^2}{2}. \quad (3.11)$$

У виразах (3.10), (3.11):

P – тиск, що забезпечується паливним насосом, Па;

ρ – густина паливної суміші, кг/м³;

z_1 – висота підйому дизельного палива під час його всмоктування паливним насосом, м;

z_2 – висота підйому біопалива під час його всмоктування паливним насосом, м;

z_3 – висота підйому суміші дизельного палива та біопалива під час його нагнітання паливним насосом, м;

v_1, v_2 – швидкість руху дизельного палива та біопалива у всмоктувальному трубопроводі, м/с;

v_3 – швидкість руху паливної суміші в нагнітальному трубопроводі, м/с;

λ – усереднений коефіцієнт тертя дизельного палива, біопалива та паливної суміші у всмоктувальному та нагнітальному трубопроводах;

l_1, l_2, d_1, d_2 – довжини та внутрішні діаметри трубопроводів, за якими здійснюється всмоктування дизельного палива та біопалива, м;

l_3, d_3 – довжина та внутрішній діаметр трубопроводу, за яким здійснюється нагнітання паливної суміші, м;

$\sum_{\text{вг}} \xi, \sum_{\text{нт}} \xi$ – суми коефіцієнтів місцевих опорів, що виникають під час руху дизельного палива та біопалива у всмоктувальному трубопроводі та паливної суміші в нагнітальному трубопроводі [171].

Аналіз виразів (3.10), (3.11) свідчить, що найбільш доцільним варіантом розміщення дозерної установки (за допомогою якої забезпечується утворення паливної суміші) є її встановлення безпосередньо перед насосом, що нагнітає створену паливну суміш до паливної апаратури високого тиску дизеля. При цьому необхідно забезпечити негативну висоту підйому біопалива на ділянці цистерни, в якій знаходиться біопаливо, – паливний насос, що створює напір для нагнітання паливної суміші.

Також визначимо, що за умови такої комплектації забезпечується мінімальне підвищення гідравлічних опорів в магістралі нагнітання біодизельного палива та відповідно мінімальне зменшення напору паливного насосу, викликане цими додатковими гідравлічними опорами [172].

3.6. Експериментальне визначення характеристик паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження

Приготування паливних сумішей для суднових дизелів можливе циклічним або безперервним способом. У першому випадку обладнання, яке забезпечує приготування суміші, працює періодично. Підготовлена таким чином паливна суміш прямує або до дизеля (видаткові танки), або в запасні танки. Під час безперервного способу підготовки паливна суміш відразу подається до циліндра дизеля.

Одним із завдань під час створення та подальшого використання паливних сумішей є забезпечення їх стійкості.

Як показники, що характеризують експлуатаційні характеристики паливної суміші, до складу якої входять паливо нафтового та біологічного походження, слід віднести густину та теплотворну здатність. Критичне відхилення в той, чи іншій бік густини паливної суміші може призвести до підвищення гідродинамічного опору в паливних магістралях (у разі підвищення її густини), або підвищення її витоків в елементах паливної апаратури високого тиску (в разі зниження її густини). Критичне зменшення теплотворної здатності паливної суміші може призвести до неприпустимого зменшення кількості енергії, що утворюється під час згоряння палива, та відповідного зменшення крутного моменту на валу дизеля. Також до контрольованого параметру під час створення паливних емульсій відноситься температура спалаху палива, або температура самозаймання палива. Критичне зменшення цих температур негативно впливає на стійкість процесу згоряння палива та може стати причиною пропуску спалаху в одному чи декількох циліндрах [173, 174].

Визначення густини ρ_{Σ} , в'язкості ν_{Σ} та теплотворної здатності Q_{Σ}^{Σ} паливної суміші можливо за аналітичними виразами:

$$\rho_{\Sigma} = \frac{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}{100}; \quad v_{\Sigma} = \frac{v_1 C_1 + v_2 C_2}{100}; \quad Q_{\Sigma} = \frac{Q_1^1 C_1 + Q_1^2 C_2}{100};$$

де $\rho_1, \rho_2, v_1, v_2, v_1, Q_1^1, Q_1^2$ – густина, в'язкість, теплотворна здатність палив з різними характеристиками відповідно;

C_1, C_2 – концентрації палив з різними характеристиками в складі паливної суміші.

У таблиці 3.1 наведені характеристики деяких палив та паливних сумішей, які з них утворені.

Таблиця 3.1

Характеристики палив та паливних сумішей

	Тип палива		Тип паливної суміші		
	RMA10	FAME99	RMA+5 % FAME99	RMA+10 %FAME99	RMA+15 %FAME99
В'язкість, мм ² /с	6,5	5	6,425	6,35	6,275
Густина, кг/м ³	920	900	919	918	917
Нижча теплота згоряння, кДж/кг	41910	37650	41697	41484	41271
	RME180	FAMEB30	RME+5 % FAMEB30	RME+10 % FAMEB30	RME+15 % FAMEB30
В'язкість, мм ² /с	184	36,3	177	169	162
Густина, кг/м ³	928	914	927	927	926
Нижча теплота згоряння, кДж/кг	40480	36890	40301	40121	39941
	DMA	FAMEB30	DMA+5 % FAMEB30	DMA+10 % FAMEB30	DMA+15 % FAMEB30
В'язкість, мм ² /с	12,8	36,3	14,0	15,2	16,3
Густина, кг/м ³	896	914	897	898	899
Нижча теплота згоряння, кДж/кг	43420	36890	43094	42767	42441

Під час проведення досліджень визначення густини, в'язкості та нижчої теплотворної здатності нафтового палива, а також різних сумішей біопалива та нафтового палива виконувалось у різний спосіб: з урахуванням даних, що наведені в паспорті на паливо; за допомогою аналітичного визначення за виразами, що надані в пп. 3.1-3.2 [175, 176], за допомогою моделювання з використанням програмного пакету ANSYS [177, 178], а також за результатами визначення цих характеристик у науковій лабораторії, що здійснює контроль якості нафтопродуктів, які постачаються під час бункерування на судна [179, 180].

Результати цих досліджень наведені в таблицях 3.2-3.4.

Таблиця 3.2

Визначення в'язкості палива / паливної суміші в різний спосіб, ν , мм²/с

Спосіб визначення	Паливо / паливна суміш			
	RMA10	RMA+5 % FAME99	RMA+10 % FAME99	RMA+15 % FAME99
З паспорта на паливо або аналітичним визначенням	6,5	6,425	6,35	6,275
Випробування в науковій лабораторії	6,44...6,55	6,36...6,46	6,29...6,43	6,25...6,33
Математичне моделювання	6,44...6,53	6,35...6,47	6,29...6,42	6,23...6,32

Аналогічні результати були отримані під час визначення характеристик інших палив та паливних сумішей (RME180, RME180+5 % FAMEB30, RME180+10 % FAMEB30, RME180+15 % FAMEB30, DMA, DMA+5 % FAME99, DMA+10 % FAME99, DMA+15 % FAME99).

Таблиця 3.3

Визначення густини палива / паливної суміші в різний спосіб, ρ , кг/м³

Спосіб визначення	Паливо / паливна суміш			
	RMA10	RMA+5 % FAME99	RMA+10 % FAME99	RMA+15 % FAME99
З паспорта на паливо або аналітичним визначенням	920	919	918	917
Випробування в науковій лабораторії	916...927	915...926	911...925	913...921
Математичне моделювання	913...934	909...925	907...925	908...928

Таблиця 3.4

Визначення нижчої теплоти згоряння палива / паливної суміші в різний спосіб, Q_H , кДж/кг

Спосіб визначення	Паливо / паливна суміш			
	RMA	RMA+5 % FAME99	RMA+10 % FAME99	RMA+15 % FAME99
З паспорта на паливо або аналітичним визначенням	41910	41697	41484	41271
Випробування в науковій лабораторії	41826...42036	41572...42031	40986...41733	40982...41374
Математичне моделювання	41617...41993	41614...41780	41152...41940	41105...41725

За результатами, що наведені в таблицях 3.23-3.23 побудовані діаграми, що відображають діапазон зміни контрольованих параметрів та відхилення цих значень цих параметрів від паспортного або аналітично визначеного значення (рис. 3.6).

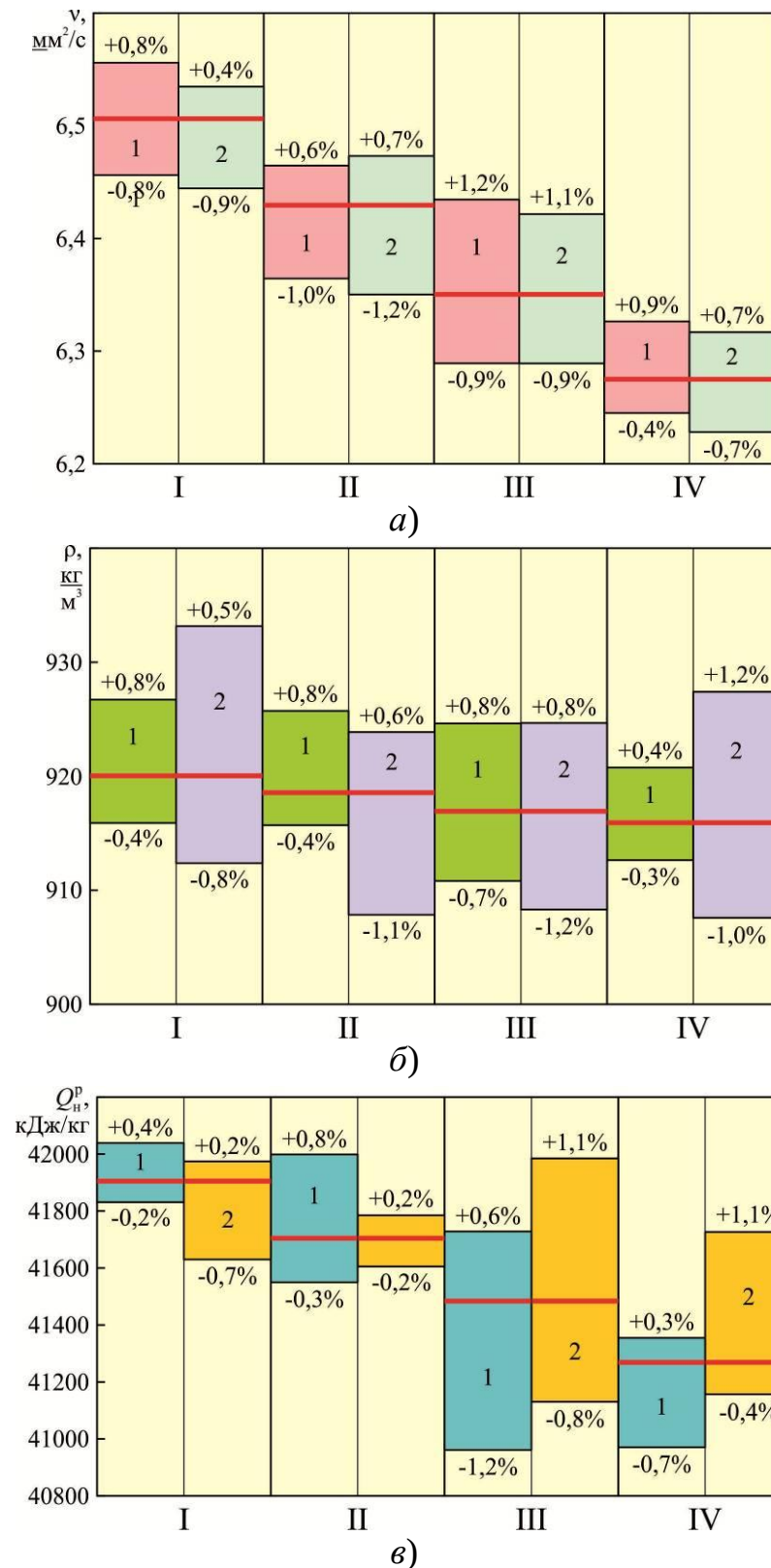


Рис. 3.6. Зміни контрольованих параметрів та відхилення цих значень цих параметрів від паспортного або аналітично визначеного значення:

а – в'язкість; *б* – густина; *в* – нижча теплотворна здатність

1 – випробування в науковій лабораторії; 2 – математичне моделювання;

I – паливо RMA10; II – паливна суміш RMA+5 % FAME99; III – паливна суміш RMA+10 % FAME99; IV – паливна суміш RMA+15 % FAME99

Результати, що наведені в таблицях 3.2-3.4 та подані на рис. 3.6, свідчать про збіг отриманих значень за умови їх визначення в різний спосіб. У зв'язку з цим для подальших досліджень визначення основних характеристик паливних сумішей, які складаються з палива нафтового (дизельного або дистильного) та біологічного походження, що виконувалось аналітичним способом відповідно до виразів (3.10).

З метою визначення впливу зміни відсоткового складу паливної суміші на значення її в'язкості та нижчої теплотворної здатності було виконано аналіз зміни цих показників для паливних сумішей, що складаються з різних палив нафтового та біологічного походження та які надалі використовувались під час проведення експериментів.

В'язкість палива визначає багато характеристик палива, у тому числі характеризує його прихильність до витоків скрізь трибосполучення (в місцях встановлення вимірювальних приладів, арматури, а також в елементах паливної системи високого тиску). Зменшення в'язкості сприяє підвищенню цієї схильності та призводить до збільшення витоків палива або паливної суміші як в магістралі нагнітання палива, також в лінії повернення палива. Саме це є одним із труднощів, що виникає під час переведення дизелів з важких сортів палива на дистильні у випадку наближення морських суден до зон екологічного контролю SECAs [56, 57].

Нижча теплотворна здатність палива характеризує кількість енергії, що утворюється в циліндрі дизеля під час згоряння палива / паливної суміші. Зменшення теплотворної здатності палива зменшує корисну роботу робочого циклу дизеля та відповідно зменшення крутного моменту. У деяких ситуаціях, наприклад під час пуску або реверсування дизеля, критичне зменшення теплотворної здатності палива може стати причиною відсутності необхідних зусиль, що передаються на поршень та кривошипно-шатунний механізм дизеля, та призвести до аварійної зупинки дизеля.

Саме тому значення в'язкості та теплотворної здатності палива були обрані як показники, за якими оцінювались якісні характеристики паливних сумішей. Результати виконаного аналізу наведені в таблицях 3.5-3.7 та подані на рис. 3.7-3.9.

Таблиця 3.5

Визначення характеристик паливних сумішей

Показник	Паливо / паливна суміш							
	RMA10	FAME99	RMA10+5% FAME99	RMA10+10% FAME99	RMA10+15% FAME99	RMA10+20% FAME99	RMA10+25% FAME99	RMA10+30% FAME99
В'язкість палива / паливної суміші, ν , мм ² /с	6,5	5,0	6,425	6,35	6,275	6,2	6,125	6,05
Відносне відхилення величини в'язкості паливної суміші, $\Delta \nu$, %	—	—	1,15	2,31	3,46	4,62	5,77	6,92
Теплота згоряння палива / паливної суміші, Q_H , кДж/кг	41910	37650	41697	41484	41271	41058	40845	40632
Відносне відхилення величини теплоти згоряння паливної суміші, ΔQ_H , %	—	—	0,51	1,02	1,52	2,03	2,54	3,04

Таблиця 3.6

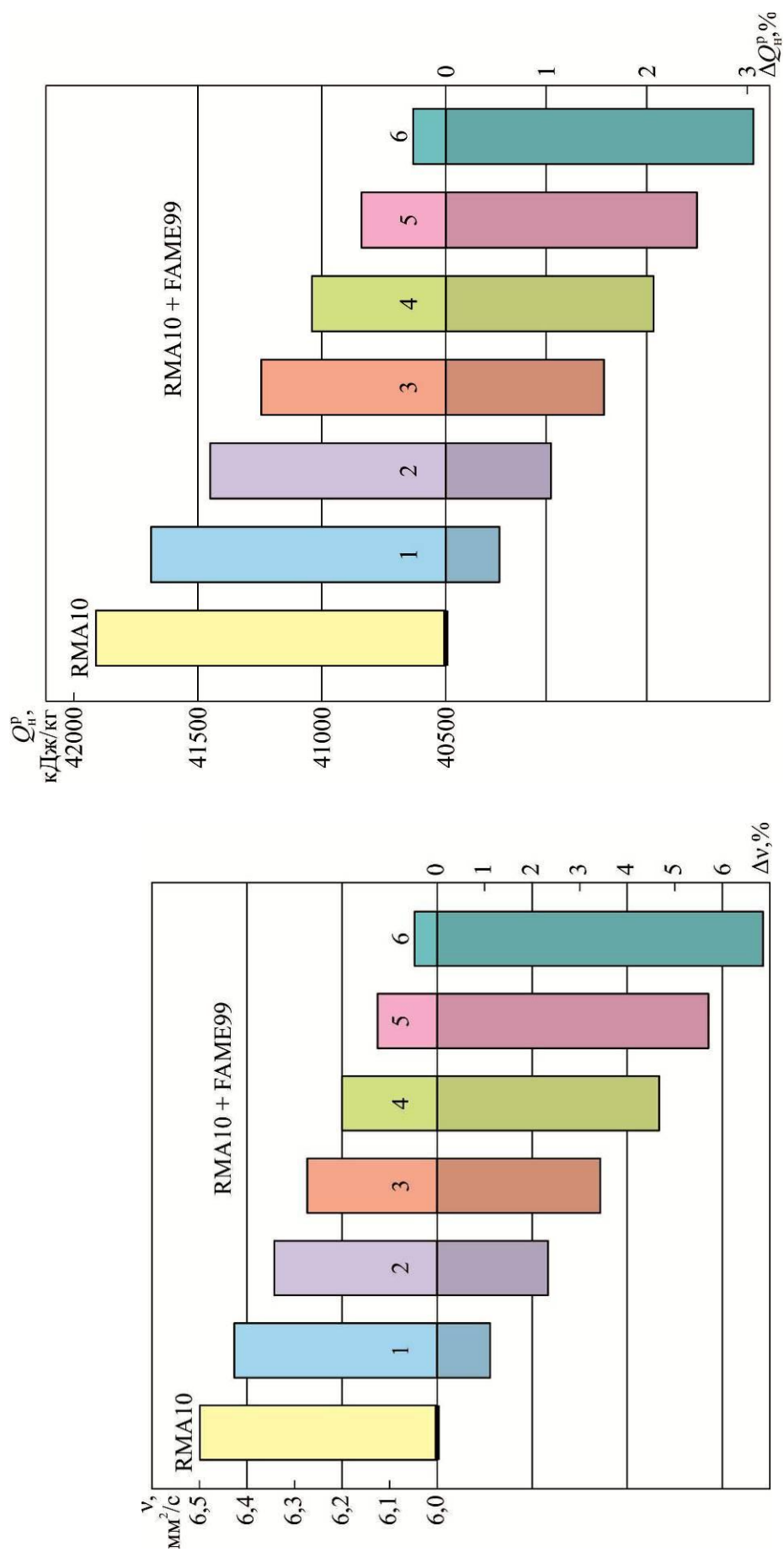
Визначення характеристик паливних сумішей

Показник	Паливо / паливна суміш							
	RME180	FAME B30	RME180+5% FAME B30	RME180+10% FAME B30	RME180+15% FAME B30	RME180+20% FAME B30	RME180+25% FAME B30	RME180+30% FAME B30
В'язкість палива / паливної суміші, ν , $\text{мм}^2/\text{с}$	184	36,3	176,6	169,2	161,8	154,5	147,1	139,7
Відносне відхилення величини в'язкості паливної суміші, $\Delta \nu$, %	—	—	4,01	8,03	12,0	16,1	20,1	24,1
Теплота згоряння палива / паливної суміші, $Q_{\text{н}}$, кДж/кг	40480	36890	40300,5	40121	39941,5	39762	39582,5	39403
Відносне відхилення величини теплоти згоряння паливної суміші, $\Delta Q_{\text{н}}$, %	—	—	0,44	0,89	1,33	1,775	2,22	2,66

Таблиця 3.7

Визначення характеристик паливних сумішей

Показник	Паливо / паливна суміш							
	RMG380	FAMEB30	RMG380+5% FAME B30	RMG380+10% FAME B30	RMG380+15% FAME B30	RMG380+20% FAME B30	RMG380+25% FAME B30	RMG380+30% FAME B30
В'язкість палива / паливної суміші, ν , мм ² /с	329	36,3	314,4	299,7	285,1	270,5	255,8	241,2
Відносне відхилення величини в'язкості паливної суміші, $\Delta\nu$, %	—	—	4,45	8,90	13,3	17,8	22,2	26,7
Теплота згоряння палива / паливної суміші, Q_{H} , кДж/кг	39070	36890	38961	38852	38743	38634	38525	38416
Відносне відхилення величини теплоти згоряння паливної суміші, ΔQ_{H} , %	—	—	0,28	0,56	0,84	1,12	1,39	1,67



a)

б)

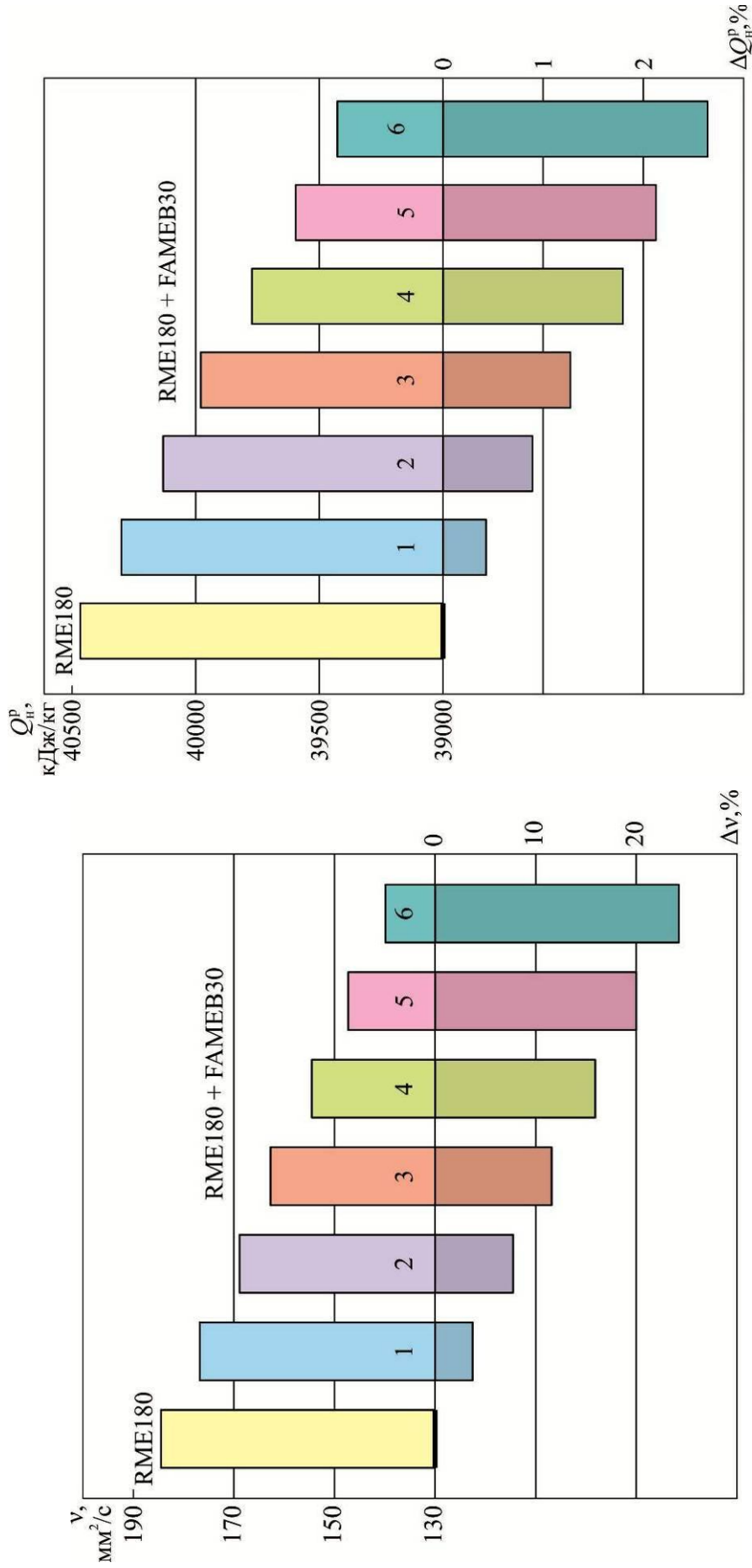
Рис. 3.7. Зміна характеристик паливної суміші нафтового палива RMA10 та палива біологічного походження FAME99:

1 – RMA10+5 % FAME99; 2 – RMA10+10 % FAME99; 3 – RMA10+15 % FAME99; 4 – RMA10+20 % FAME99;

5 – RMA10+25 % FAME99; 6 – RMA10+30 % FAME99;

a – в'язкість відхилення в'язкості; б – нижча теплотворна здатність та відхилення нижчої теплотворної здатності

a – в'язкість відхилення в'язкості; б – нижча теплотворна здатність та відхилення нижчої теплотворної здатності

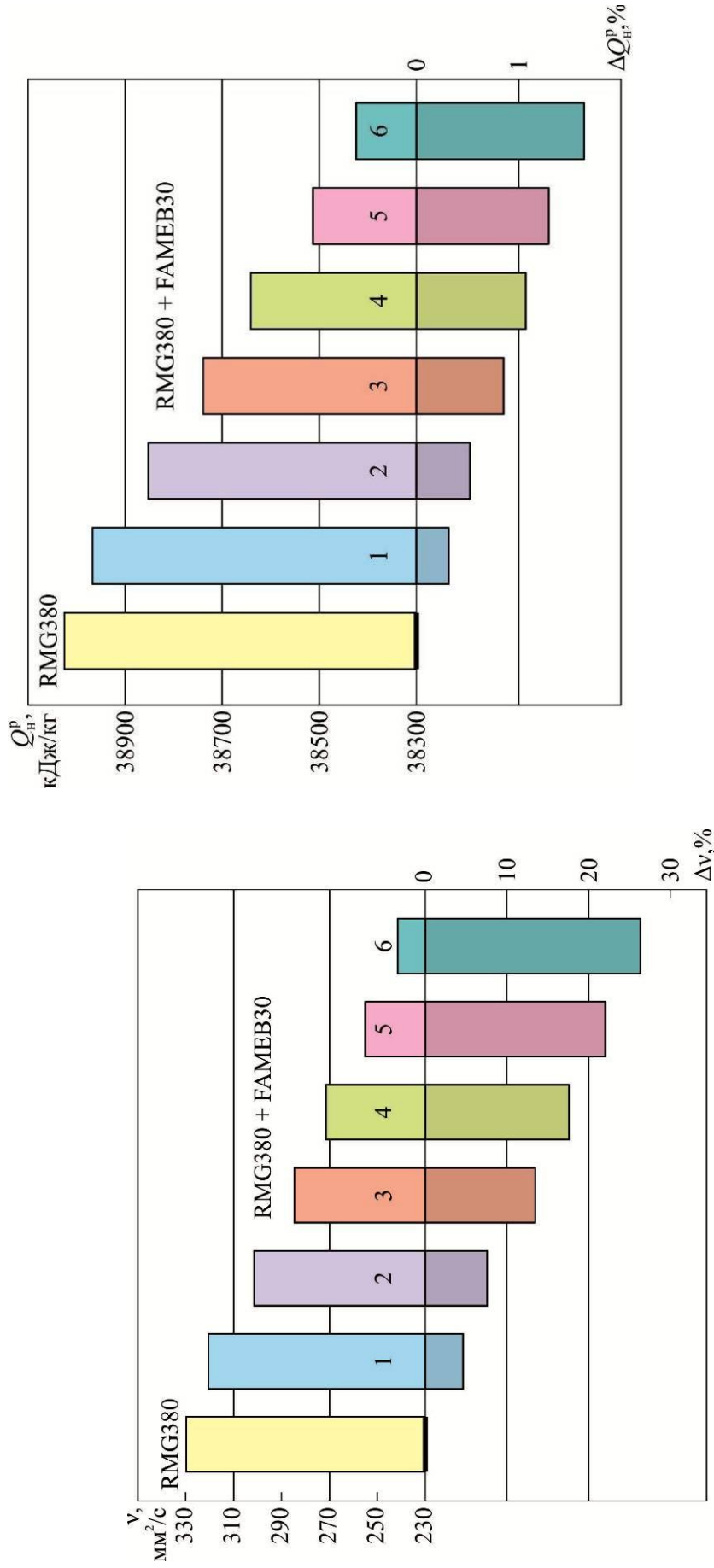


a)

б)

Рис. 3.8. Зміна характеристик паливної суміші нафтового палива RME180 та палива біологічного походження FAME B30:
1 – RME180+5 % FAME B30; 2 – RME180+10 % FAME B30; 3 – RME180+15 % FAME B30; 4 – RME180+20 % FAME B30;
5 – RME180+25 % FAME B30; 6 – RME180+30 % FAME B30;

a – в'язкість відхилення в'язкості; *б* – нижча теплотворна здатність та відхилення нижчої теплотворної здатності



а)

б)

Рис. 3.9. Зміна характеристик паливної суміші нафтового палива RMG380 та палива біологічного походження FAME B30:
1 – RMG380+5 % FAME B30; 2 – RMG380+10 % FAME B30; 3 – RMG380+15 % FAME B30; 4 – RMG380+20 % FAME B30;
5 – RMG380+25 % FAME B30; 6 – RMG380+30 % FAME B30;

а – в'язкість відхилення в'язкості; б – нижча теплотворна здатність та відхилення нижчої теплотворної здатності

3.7. Висновки за розділом 3

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

1. Гідродинамічні процеси, що перебігають в паливних системах дизелів морських суден під час створення паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, підлягають законам конвективної дифузії в рідинах. Основною характеристикою палива нафтового (дизельного або дистилатного) та біологічного походження, яка сприяє максимальній швидкості конвективної дифузії цих складових під час утворення паливної суміші, є густина. Збіг, або незначне відхилення (в межах 2...10 %) густини палива нафтового та біологічного походження забезпечує рівномірний процес конвективної дифузії за трьома напрямками руху потоку суміші, а також її максимальну однорідність та дисперсність.

2. Відповідність один одному фракційного та структурного складу палива нафтового та біологічного походження, а також збіг в значеннях їх густини та в'язкості дозволяє використовувати для утворення їх стійкої суміші дозерні присторої, що забезпечують подачу біодизельного палива (як додаткового компонента паливної суміші) в потік дизельного або дистилатного палива (як основного компонента паливної суміші).

3. Приготування паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, найбільш доцільно здійснювати безперервним способом – безпосередньо перед подачею паливної суміші до паливної апаратури високого тиску та її впорскування в циліндр дизеля. Забезпечення негативної висоти підйому біопалива під час її засмоктування паливним насосом за допомогою якого утворюється паливна суміш (тобто утворення умов для додаткового гідростатичного тиску з боку палива біологічного походження), а також скорочення довжини паливних трубопроводів, за якими здійснюється потрапляння палива біологічного походження в загальну магістраль нагнітання палива, забезпечує мінімальний гідродинамічний опір

та мінімальне додаткове навантаження на паливну апаратуру, за допомогою яких утворюється паливна суміш.

4. Діапазон доцільної концентрації біопалива в паливній суміші визначається відхиленням від значення палива нафтового походження в той, чи іншій бік наступних експлуатаційних характеристик паливної суміші: густини, в'язкості та теплотворної здатності. Критичне відхилення в той, чи іншій бік цих показників може призвести до підвищення гідродинамічного опору в паливних магістралях або підвищення її витоків в елементах паливної апаратури високого тиску; а також до неприпустимого зменшення кількості енергії, що утворюється під час згоряння палива, та відповідного зменшення крутного моменту на валу дизеля.

5. Для паливних сумішей, яки складають дизельні / дистилятні палива RMA10, RME180, DMA доцільна концентрації палива біологічного походження FAME B30 або FAME99 знаходиться в діапазоні 5...20 %. Перебільшення цього значення знижує теплотворні здатність паливної суміші та поширює відхилення густини та в'язкості суміші від палива нафтового походження.

6. За умови утворення паливних сумішей, вміст палива біологічного походження в якій не перевищує 20 %, відхилення в значеннях її в'язкості та теплотворної здатності від подібних показників дизельного / дистилятного палива не перевищує 17,8 % та 2,1 % відповідно. Це забезпечує утворення стійких паливних сумішей, суцільність її руху в паливній системі та максимальну термічну ефективність робочого циклу під час її згоряння в циліндрі дизеля.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКИХ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Четвертий розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню третього та четвертого допоміжних завдань, якими є:

визначення критеріїв оцінки ефективності використання суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження;

визначення оптимального складу паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, для забезпечення експлуатаційних показників роботи дизелів морських суден.

Основні результати розділу викладені в роботах [56], [57], [104], [138], [182], [183], [192], [196].

4.1. Екологічні та економічні критерії використання біопалива під час експлуатації морських засобів транспорту

Двигуни внутрішнього згоряння морських засобів транспорту не лише забезпечують енергією судно та суднові допоміжні механізми, але також викидають до атмосфери токсичні компоненти [181]. Крім того, використання в суднових дизелях палива нафтового походження скорочує його світові запаси. Варіантом, який, з одного боку, сприяє зниженню емісії токсичних компонентів, а з іншого – знижує витрату природних нафтових ресурсів, є використання альтернативного палива. Для суднових дизелів як альтернативне паливо можливе застосування біодизельного палива FAME. Дані сорти палива виробляються у багатьох країнах ЄС, а також у США,

Бразилії та Китаї. Це забезпечує можливість бункерування біопаливом у багатьох морських портах.

Використання в енергетичних установках морських засобів транспорту альтернативних видів палива сприяє зниженню споживання палива нафтового походження. Виробництво біопалива можливе у країні, обмеженій природними запасами нафтового палива. При цьому використання власного палива ненафтового походження знижує енергетичну залежність держави від зовнішніх країн та виробників. Експлуатаційні характеристики біопалива (в'язкість, густина, температура спалаху, теплотворна здатність) повинні бути порівняні з подібними показниками дизельного палива, з якими вони утворюють суміші. Розбіжність в густині біопалива та дизельного палива може призвести до розшарування їх суміші, порушення однорідності впорскування палива, виникнення нерівномірності частоти обертання вала дизеля, підвищення температурної напруженості циліндрів та газовипускної системи дизеля. Це обмежує можливість застосування деяких видів біопалива. Нижча (порівняно з дизельним паливом) теплотворна здатність біопалива є причиною збільшення питомої витрати палива. Це обумовлюється тим, що в разі зниження тепловиділення в циліндрі зменшується крутний момент на валу дизеля, при цьому автоматична система регулювання пропорційно збільшує подачу палива [182].

Найбільш доцільним є використання альтернативних палив у суднових СОД потужністю 400...700 кВт, які використовуються як допоміжні двигуни. У такому разі за умови загального середнього навантаження на суднову електростанцію 250...550 кВт добова витрата палива становить 1200...2500 кг/добу. За умови 20...30 % концентрації альтернативного палива в паливній суміші його добова витрата не перевищує 500...750 кг/добу. З урахуванням автономності плавання морських суден до 30 діб такі обсяги можуть бути поставлені в багатьох морських портах і зберігатися на борту судна [138, 183].

4.2. Експериментальне визначення оптимального вмісту біопалива в його суміші з нафтовим паливом

З метою визначення оптимального вмісту біопалива в його суміші з нафтовим паливом, за яким забезпечуються найкращі експлуатаційні показники роботи дизелів, виконувався комплекс досліджень на морських судах.

4.2.1. Випробування під час експлуатації морського судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн

Дослідження виконувались на морському судні типу General Cargo дедвейтом 14800 тонн під час океанського переходу між портами Південної Америки. У кожному порту була передбачена можливість отримання біопалива Під час досліджень використовувалося біопаливо B99.9 FAME, основні характеристики якого наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Основні характеристики біопалива B99.9 FAME

Показник	Значення
Вміст біодизельного палива	99,9 %;
Вміст дизельного палива	0,1 %;
Клас дизельного палива	Ultra-Low Sulfur Diesel fuel
Вміст сірки в дизельному паливі	0,03 %
В'язкість за 40° С	15 мм ² /с
Густина за 15° С	870 кг/м ³

Як дизельне паливо використовувалося паливо RMA10, яке відповідає міжнародному стандарту на паливо ISO 8217 та має такі основні характеристики:

- в'язкість за 40° C – 12 мм²/с;
- густина за 15° C – 865 кг/м³;
- вміст сірки – 0,09 %.

Порівняні значення в'язкості та густини палива RMA10 та біопалива B99.9 FAME гарантували створення їх стійкої паливної суміші [184, 185]. Основним компонентом паливної суміші було дизельне паливо RMA10. Вміст біопалива у паливній суміші змінювався в межах 5...25 % від загального об'єму. Дослідження виконувались на суднових СОД 6N165LW фірми Yanmar з наступними характеристиками:

- діаметр циліндра – 165 мм;
- хід поршня – 232 мм;
- частота обертання – 1200 об/хв;
- номінальна потужність – 530 кВт;
- питома ефективна витрата палива – 194 г/(кВт·год).

Метою дослідження було визначення оптимальної концентрації біодизельного палива B99.9 FAME у суміші з дизельним паливом RMA10. При цьому має бути забезпечене одночасне максимальне збільшення екологічних та мінімальне зниження економічних параметрів роботи суднового дизеля. Дослідження проводилися на трьох однотипних суднових дизелях СОД 6N165LW Yanmar, які виконували функції допоміжних двигунів (дизель-генераторів) [56].

Принципова схема паливної системи дизелів наведена на рис. 4.1.

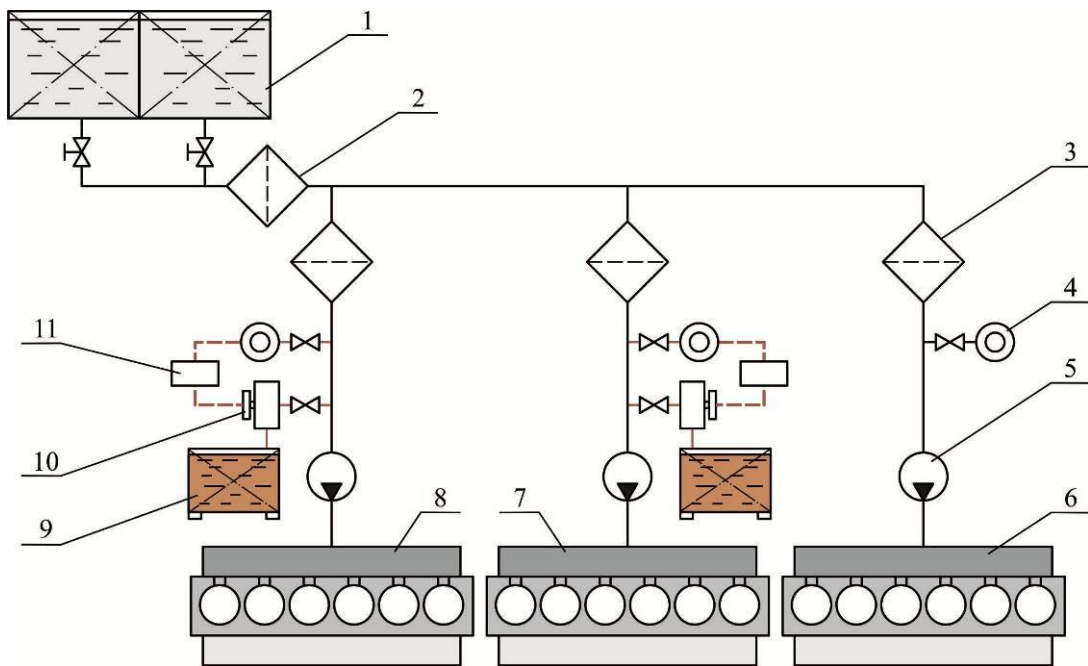


Рис. 4.1. Принципова схема паливної системи суднових дизелів

6N165LW Yanmar:

1 – витратна цистерна дизельного палива RMA10; 2 – паливний фільтр грубого очищення; 3 – паливний фільтр тонкого очищення; 4 – витратомір; 5 – паливний насос; 6, 7, 8 – дизель 6N165LW; 9 – витратна цистерна біодизельного палива B99.9 FAME; 10 – дозатор; 11 – мікроконтролер

До складу паливної системи входило наступне обладнання: витратна цистерна дизельного палива 1, загальний паливний фільтр грубого очищення 2, окремий для кожного дизеля паливний фільтр тонкого очищення 3, окремий для кожного дизеля електронний витратомір 4, окремий для кожного дизеля насос подачі палива 5, безпосередньо дизелі 6, 7, 8.

Функціонування паливної системи відбувалося в такий спосіб. З витратної цистерни 1 дизельне паливо RMA10 через фільтр грубого очищення 2 та паливний фільтр тонкого очищення 3 (розташований у контурі кожного дизеля 6, 7, 8) надходило до паливних насосів 4 та далі прямувало до дизелів. Кількість палива, що надходить до дизелів 6, 7, 8, визначалася за витратомірами 4 (розташованими у контурі кожного дизеля). Контур подачі палива до дизеля 6 не змінювався, дизель експлуатувався з використанням палива RMA10. У контур дизелів 7 та 8 додатково встановлювалися витратна

цистерна біодизельного палива 9, дозатор 10 та мікроконтролер 11. Ці дизелі експлуатувалися на суміші дизельного палива та біопалива. Необхідна кількість біопалива в паливній суміші забезпечувалася за допомогою мікроконтролера 11. При цьому, залежно від витрати дизельного палива, змінювалася кількість біопалива, яке подавалося до паливної системи з цистерни 9 через дозатор 10. Поповнення цистерни 1 відбувалося в автоматичному режимі. Поповнення цистерни 9 – у ручному режимі. Установка та правила експлуатації додаткового обладнання (витратних цистерн біодизельного палива, дозаторів, мікроконтролерів) були узгоджені з відділом технічного менеджменту компанії, якій належало судно.

Для оцінки ефективності використання біопалива, а також визначення оптимальної концентрації біопалива в суміші з дизельним паливом було прийнято екологічний та економічний критерії. Як екологічний критерій приймалися концентрація оксидів азоту NO_x та об'ємний вміст оксиду вуглецю CO у випускних газах. Як економічний – питома ефективна витрата палива b_e . Концентрація оксидів азоту NO_x та об'ємний вміст оксиду вуглецю CO у випускних газах контролювалися за допомогою газового аналізатора Testo350XL. Газоаналізатор дозволяє виконувати вимірювання в діапазоні температур до 1200°C . Газоаналізатори Testo350XL відповідають вимогам Continuous Emission Monitoring System (CEMS) Environmental Protection Agency (EPA) [7, 45].

Аналіз випускних газів проводився у газовипускній магістралі на відстані 10 м від місця виходу газів із газотурбонагнітачів, що відповідає вимогам Технічного кодексу з NO_x . Похибка у вимірі емісії NO_x та CO у випускних газах, що виконується газоаналізатором Testo350XL, не перевищувала $\pm 1,0 \%$. Питома ефективна витрата палива b_e визначалася за допомогою суднових вимірювальних засобів – витратоміра, встановленого на магістралі підведення палива до дизеля (позиція 4 на рис. 4.1), а також таймера, і розраховувалася за залежністю:

$$b_e = G_r / N_{\text{епр}},$$

де G_r – годинна витрата палива, кг/год, яка визначалась за виразом:

$$G_r = \frac{V_{\pi} \rho}{t},$$

в якому V_{π} – об'єм палива, що пройшло через витратомір, м³;

ρ – густина палива за відповідною температурою, кг/м³;

t – час, протягом якого проводився експеримент у відповідному режимі роботи дизеля, год;

$N_{\text{ерр}}$ – потужність дизеля на різних режимах роботи, кВт.

Значення $N_{\text{ерр}}$ визначалося в центральному посту управління машинного відділення за допомогою електронного обладнання, в якому використовувався ватметр компанії Datum Electronics Worldwide Shipping, діапазон вимірювання якого становив 0...700 кВт із гарантованою точністю ± 1 кВт. Витрата палива визначалась за допомогою електромагнітних витратомірів NMG, встановлених на лінії подачі та повернення палива. Витратомір NMG забезпечує вимірювання показників в діапазоні температур -20...+70°C з візуалізацією значень за допомогою сенсорного екрана. Похибка під час вимірювання витрати палива не перевищувала 0,5 %. Час проведення експерименту фіксувався електронним таймером. З огляду на тривалість експерименту (більше години кожному з режимів) похибка в вимірі часу не враховувалася. Загальна похибка у визначенні питомої ефективної витрати палива не перевищувала $\pm 1,5$ %.

Під час проведення дослідження для забезпечення споживачів енергією експлуатувався дизель, паливна система якого не змінювалася (дизель 5 на рис. 4.1). Його експлуатація виконувалася на дизельному паливі RMA10. Також в експериментах були використані один або два дизелі (6 і 7 на рис. 4.1), до паливної системи яких встановлювалося додаткове обладнання (витратна цистерна біодизельного палива 9, дозатор 10, мікроконтролер 11 – рис. 4.1). Це забезпечувало роботу дизелів із використанням паливної суміші з різною концентрацією біопалива B99.9 FAME.

Дизелі, на яких виконувались експериментальні дослідження, постачали потужністю постійні групи споживачів. При цьому (залежно від досліджуваних режимів) їхня потужність становила 265 кВт, 320 кВт, 370 кВт, 425 кВт. Це відповідало навантаженню 50 %, 60 %, 70 % та 80 % від номінальної потужності дизеля $N_{\text{ном}}$. Похибка в значенні навантаження під час переведення дизеля з одного режиму на інший не перевищувала $\pm 1,5$ %.

Перед початком експерименту всі дизелі мали однаковий моторесурс паливної апаратури, деталей циліндрової групи, підшипників руху та однаковий технічний стан [186]. Шляхом перемикання груп споживачів експлуатація дизелів виконувалася на постійному навантаженні, необхідному для проведення експерименту. У разі зміни кількості споживачів енергії та їх потужності необхідне навантаження перерозподілялося на дизелі, які не були задіяні в експерименті. При цьому дизель, на якому проводилися дослідження, продовжував експлуатуватися на постійному навантаженні. Крім того, під час експерименту на дизелі підтримувалися постійні температурні режими в системах мащення та охолодження [187].

Під час проведення експерименту дизель протягом 1,0...1,5 години працював на постійному навантаженні, протягом яких виконувався вимір основних параметрів та усереднення отриманих значень. Це забезпечувало коректність проведення досліджень та можливість зіставлення вимірювань, виконаних на різних дизелях. При цьому (у зв'язку з відсутністю вантажних та швартових операцій) робота судових дизелів 6N165LW Yanmar проходила без стрибкоподібних змін навантажень. Крен, диферент та інші зовнішні збурення суттєво не впливали на вимірювані параметри та процес приготування суміші біопалива B99.9 FAME та дизельного палива RMA10. Тривалість циклу експериментальних досліджень становила 7...8 годин. Результати експерименту щодо визначення концентрації оксидів азоту NO_x та об'ємного вмісту оксидів вуглецю CO у випускних газах, а також результати розрахунку питомої ефективної витрати палива b_e наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати експерименту

Навантаження на дизель, %	Вид палива				
	RMA10	RMA10+5 % біопалива	RMA10+10 % біопалива	RMA10+15 % біопалива	RMA10+20 % біопалива
Концентрація оксиду азоту NO _x у випускних газах, г/(кВт·год)					
50	7,32	6,62	6,02	5,93	6,15
60	7,56	6,88	6,22	6,12	6,33
70	7,88	7,17	6,32	6,18	6,58
80	8,16	7,45	6,45	6,25	6,84
Об'ємний вміст оксиду вуглецю CO у випускних газах, %					
50	6,22	6,03	5,68	5,25	5,06
60	6,31	6,07	5,71	5,32	5,1
70	6,73	6,22	6,03	5,52	5,21
80	7,33	6,43	6,12	5,92	5,57
Питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год)					
50	204	209	215	219	223
60	201	204	207	211	218
70	196	198	200	203	209
80	193	194	195	196	199

Концентрація оксидів азоту у випускних газах суднових дизелів регламентується вимогами Annex VI MARPOL. Відповідно до цих вимог судновий дизель 6N165LW Yanmar відноситься до рівня Tier II. Для таких дизелів концентрація NO_x у випускних газах не повинна перевищувати значення, що визначається за виразом:

$$\text{NO}_x \leq 44n^{-0,23}, \quad (4.1)$$

де n – частота обертання вала дизеля, об/хв.

Для суднового дизеля 6N165LW Yanmar отримаємо:

$$\text{NO}_x \leq 44 \cdot 1200^{-0,23} = 8,61 \text{ г/(кВт} \cdot \text{год)}.$$

Зазначимо, що за всіх режимів та за будь-яких умов проведення експерименту концентрація оксидів азоту у випускних газах не перевищувала значення, визначеного за виразом (4.1). Таким чином, експлуатація дизелів 6N165LW Yanmar під час експерименту проводилася із забезпеченням вимог Annex VI MARPOL [54, 57].

Для кращої візуалізації отриманих результатів за значеннями таблиці 4.2 побудовано діаграми, що показані на рис. 4.2.

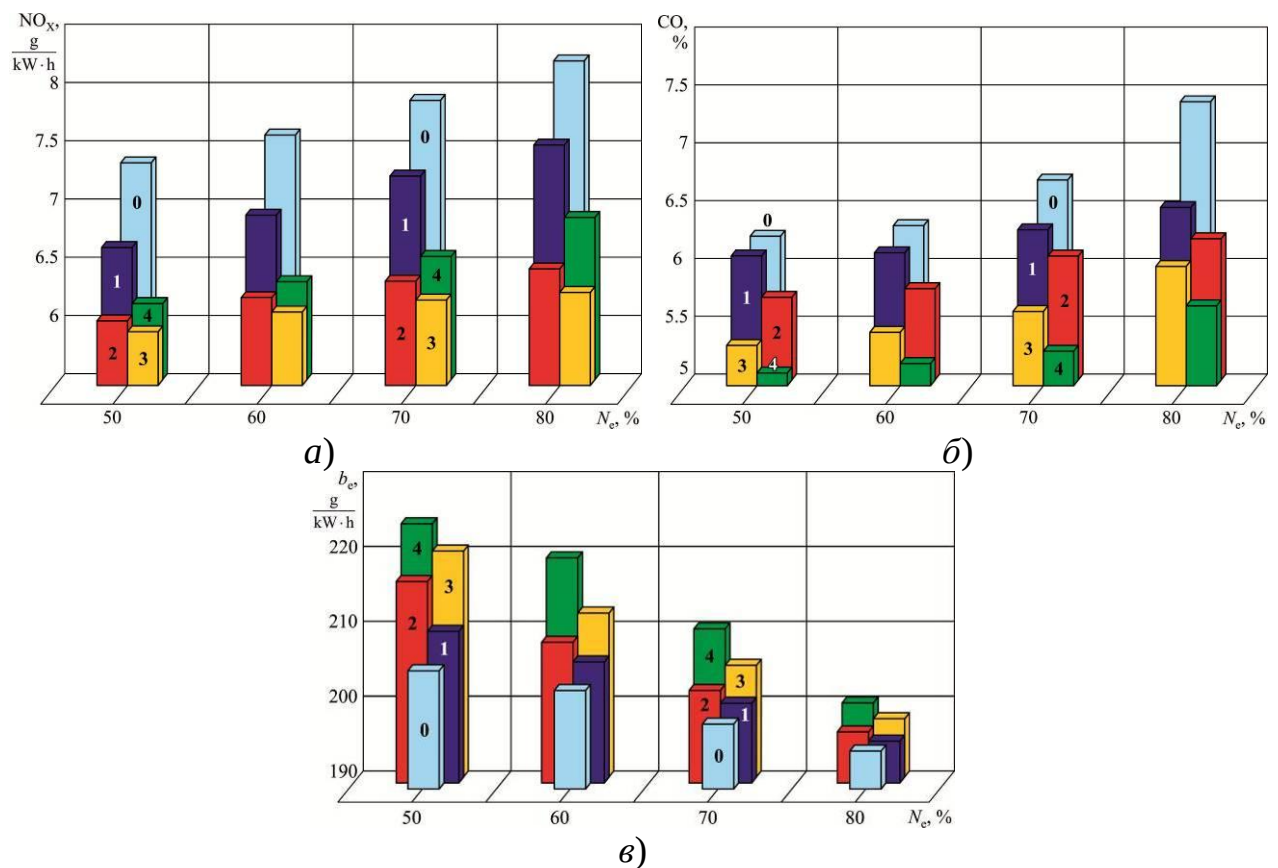


Рис. 4.2. Залежність показників роботи дизеля 6N165LW Yanmar від навантаження за умови використання паливної суміші різного складу: а – емісія оксидів азоту; б – об'ємний вміст оксиду вуглецю у випускних газах; в – питома ефективна витрата палива;
0 – RMA10; 1 – RMA10+5 % біопалива; 2 – RMA10+10 % біопалива;
3 – RMA10+15 % біопалива; 4 – RMA10+20 % біопалива

Зазначимо, що для всього діапазону концентрації біопалива B99.9 FAME у суміші з паливом RMA10A спостерігається зниження емісії NO_x та CO у випускних газах та збільшення питомої ефективної витрати палива.

З метою оцінювання ефективності використання біопалива на різних режимах роботи та їх порівняння між собою виконувалось визначення відносних змін екологічних та економічних показників роботи дизеля. Для цього відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO у випускних газах, а також відносна зміна питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувалися за виразами:

$$\Delta\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^{\text{RMA}} - \text{NO}_x^{\text{bio}}}{\text{NO}_x^{\text{RMA}}} \cdot 100\%, \quad \Delta\text{CO} = \frac{\text{CO}^{\text{RMA}} - \text{CO}^{\text{bio}}}{\text{CO}^{\text{RMA}}} \cdot 100\%, \quad \Delta b_e = \frac{b_e^{\text{bio}} - b_e^{\text{RMA}}}{b_e^{\text{bio}}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{RMA} , NO_x^{bio} – концентрація оксиду азоту у випускних газах дизеля під час його роботи на паливі RMA10 та суміші з біопаливом, г/(кВт·год);

CO^{RMA} , CO^{bio} – об'ємний вміст оксиду вуглецю у випускних газах дизеля під час його роботи на паливі RMA10 та суміші з біопаливом, %;

b_e^{RMA} , b_e^{bio} – питома ефективна витрата палива дизеля під час його роботи на паливі RMA10 та суміші з біопаливом, г/(кВт·год).

При цьому значення NO_x^{RMA} , NO_x^{bio} , CO^{RMA} , CO^{bio} , b_e^{RMA} , b_e^{bio} обирались з таблиці 4.2 для кожного з навантажень дизеля.

Отримані значення узагальнено у таблиці 4.3, а також показано на діаграмах рис. 4.3.

Таблиця 4.3

Зміна відносних показників роботи дизеля 6N165LW Yanmar

Наванта- ження на дизель, %	Вид палива			
	RMA10+5 % біопалива	RMA10+10 % біопалива	RMA10+15 % біопалива	RMA10+20 % біопалива
Відносне зменшення концентрації оксидів азоту ΔNO_x у випускних газах, %				
50	9,56	17,76	18,99	15,98
60	8,99	17,72	19,05	16,27
70	9,01	19,80	21,57	16,5
80	8,70	20,96	23,41	16,18
Відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO у випускних газах, %				
50	3,05	8,68	15,59	18,65
60	3,80	9,51	15,69	19,18
70	7,58	10,4	17,98	22,59
80	12,30	16,51	19,24	24,01
Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива Δb_e , %				
50	2,45	5,39	7,35	9,31
60	1,49	2,99	4,98	8,46
70	1,02	2,04	3,57	6,63
80	0,52	1,04	1,55	3,11

Ефективність використання суміші біопалива та дизельного палива доцільно виконувати комплексним методом. При цьому основну увагу слід приділяти зниженню емісії оксидів азоту та збільшенню питомої витрати палива [188]. Емісія оксидів вуглецю (у зв'язку з її токсичністю) також є важливими показниками [189]. Проте нині її значення не обмежуються нормативними документами та конвенціями. Тому цей параметр слід віднести до непрямого показника. У зв'язку з цим, як оптимальний склад паливної суміші за результатами проведених досліджень була прийнята суміш, до складу якої входить 10 % або 15 % біопалива.

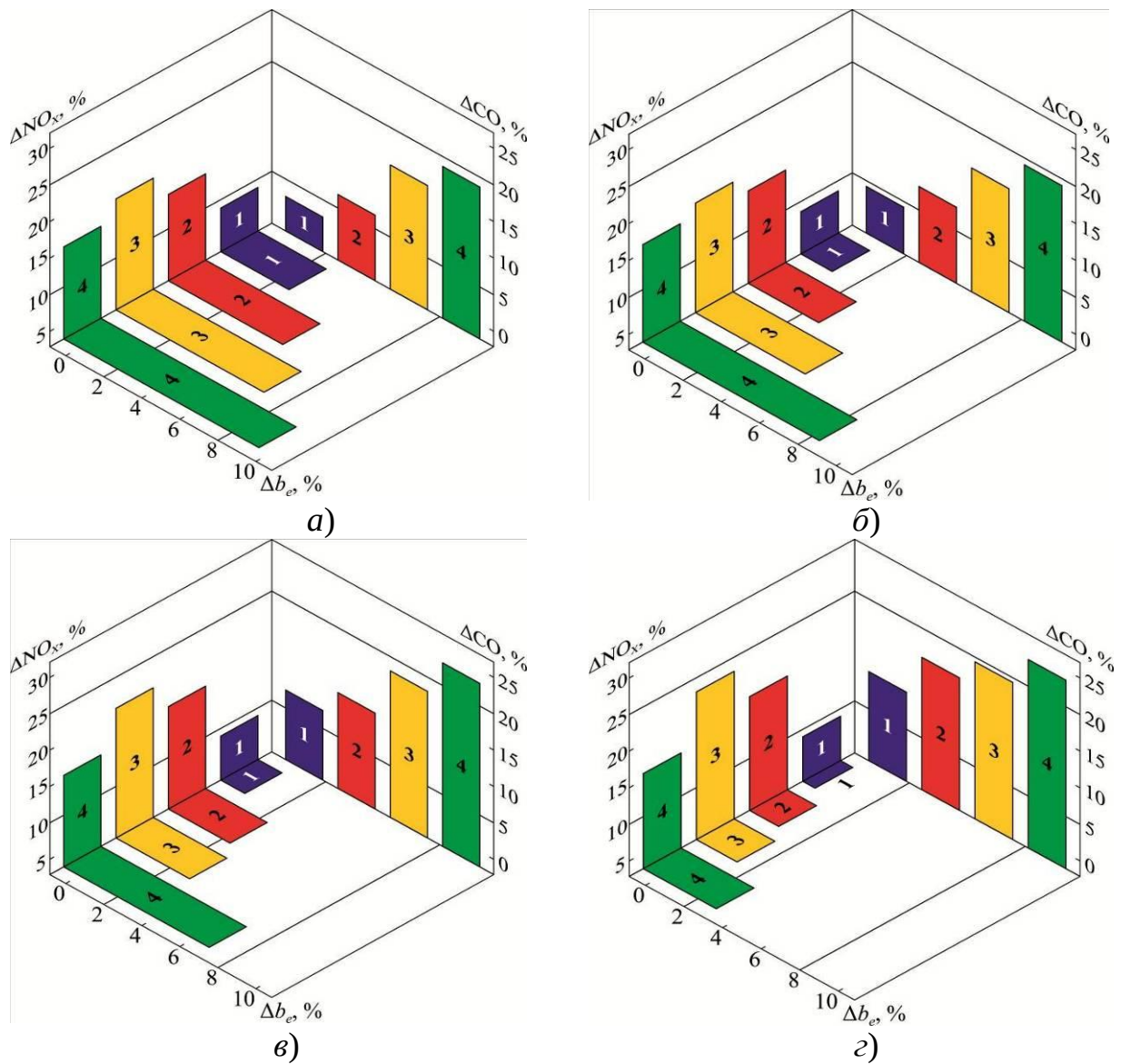


Рис. 4.3. Відносна зміна показників роботи дизеля 6N165LW Yanmar під час використання паливних сумішей різного складу:

а – навантаження 50 %; б – 60 %; в – 70 %; г – 80 %;

1 – RMA10+5 % біопалива; 2 – RMA10+10 % біопалива; 3 – RMA10+15 % біопалива; 4 – RMA10+20 % біопалива

Номограми, що відображають зміну екологічних та економічних показників роботи суднового дизеля 6N165LW Yanmar за таких умов, наведені на рис. 4.4. При цьому (аналогічно таблиці 4.2 та рис. 4.4), величини ΔNO_x та ΔCO відповідають зменшенню емісії оксидів азоту та оксидів вуглецю з випускними газами, величина Δb_e – відображає збільшення питомої ефективної витрати палива.

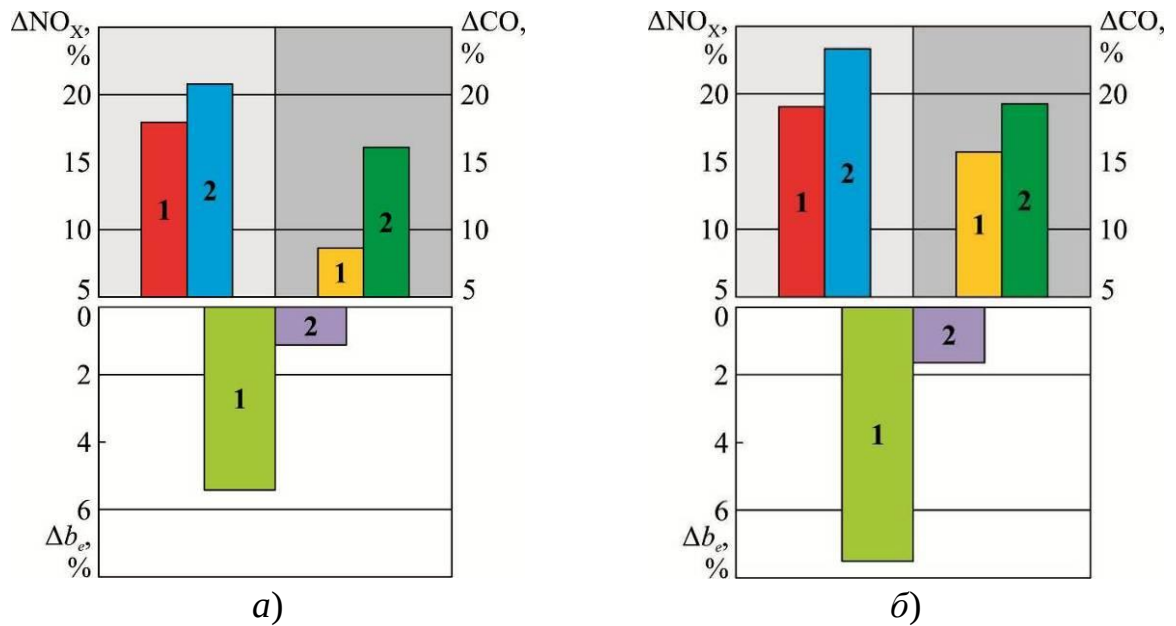


Рис. 4.4. Оптимальні режими використання біопалива B99.9 FAME під час експлуатації суднового дизеля 6N165LW Yanmar:
 а – RMA10+10 % біопалива; б – RMA10 +15 % біопалива;
 1 – навантаження 50 %; 2 – навантаження 80 %

Паливні суміші, які містять 10...15 % біопалива, забезпечують більш ніж 20 % зниження емісії оксидів азоту та 15...20 % зниження емісії оксидів вуглецю. Найменше зниження економічності роботи суднового дизеля під час використання біопалива (до 1...1,5 %) досягається під час навантаження на дизель 80 %. Під час зниження навантаження значення питомої ефективної витрати палива збільшується. На навантаженні 50 % це збільшення може перевищувати 7 %. Тому використання паливних сумішей під час роботи дизеля на таких навантаженнях знижує його економічну ефективність.

4.2.2. Випробування під час експлуатації спеціалізованого морського судна дедвейтом 9600 тонн

Для розширення масиву експериментальних даних та підтвердження отриманих результатів, аналогічний комплекс досліджень був виконаний на спеціалізованому морському судні дедвейтом 9600 тонн [57]. Судно здійснювало навігаційні переходи між портами, в яких було передбачена можливість поповнення запасів альтернативного палива. Допоміжна енергетична установка судна складалася з трьох однотипних дизелів 5Н17/28 Hyundai Heavy Industries з наступними характеристиками:

- діаметр циліндра – 170 мм;
- хід поршня – 280 мм;
- частота обертання вала – 900 об/хв;
- номінальна потужність – 575 кВт;
- питома ефективна витрата палива – 193 г/(кВт·год).

Під час експлуатації дизеля використовувалося паливо RMB30, яке відповідає міжнародному стандарту на паливо ISO 8217 та має такі основні характеристики:

- в'язкість за 40° С – 30 мм²/с;
- густина за 15° С – 960 кг/м³;
- вміст сірки – 0,47 %.

Паливо RMB30 рекомендується для використання в судових дизелях, що працюють за чотиритактним циклом. Використання цього палива можливе на всіх режимах роботи дизеля (в тому числі на режимах пуску). Як альтернативне паливо використовувалося біопаливо B99.9 FAME характеристики якого наведені в таблиці 4.1.

Аналогічно попередній серії експериментів, порівняні значення в'язкості та густини палива RMB30 і біопалива B99.9 FAME гарантували створення їх стійкої паливної суміші [190]. Основним компонентом паливної суміші було

дизельне паливо RMB30. Вміст біопалива у паливній суміші змінювався в межах 5...20 % від загального обсягу.

Під час проведення експерименту паливна суміш дизельного палива RMB30 та біодизельного палива B99.9 FAME готувалась безперервним способом відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.1.

Ефективність використання біопалива оцінювалася за екологічним (через концентрацію оксидів азоту NO_x та об'ємний вміст оксиду вуглецю CO у випускних газах) та економічним (через питому ефективну витрату палива b_e) критеріями.

Під час проведення дослідження для забезпечення споживачів енергією експлуатувався «контрольний» дизель (що використовував паливо RMB30) та один або два інші (у яких використовувалася суміш палива RMB30 та біопалива B99.9 FAME). Дизелі, у яких виконувались експериментальні дослідження, забезпечували потужністю постійні групи споживачів. За цих умов (залежно від досліджуваних режимів) їхня потужність становила 315 кВт, 375 кВт, 430 кВт, 490 кВт. Це відповідало навантаженню 55 %, 65 %, 75 % та 85 % від номінальної потужності дизеля. Похибка в значенні навантаження під час переведення дизеля з одного режиму на інший не перевищувала $\pm 1,5$ %. Перед початком експерименту всі дизелі мали однаковий моторесурс паливної апаратури, деталей циліндрової групи, підшипників руху, а також однаковий технічний стан. Технологія проведення досліджень відповідала послідовності дій, викладених у п. 4.2.1.

Результати експерименту щодо визначення концентрації оксидів азоту NO_x та об'ємного вмісту оксидів вуглецю CO у випускних газах, а також розрахунку питомої ефективної витрати палива b_e наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4.

Результати експерименту

Навантаження на дизель, %	Вид палива				
	RMB30	RMB30+5 % біопалива	RMB30+10 % біопалива	RMB30+15 % біопалива	RMB30+20 % біопалива
Концентрація оксиду азоту NO_x у випускних газах, г/(кВт·год)					
55	7,72	6,92	6,22	6,12	6,51
65	7,94	7,18	6,32	6,22	6,74
75	8,32	7,42	6,43	6,24	7,01
85	8,68	8,02	6,56	6,37	7,28
Об'ємний вміст оксиду вуглецю CO у випускних газах, %					
55	6,32	6,08	5,75	5,38	4,88
65	6,48	6,22	5,88	5,44	5,12
75	6,85	6,28	6,16	5,68	5,36
85	7,37	6,58	6,28	5,98	5,63
Питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год)					
55	208	212	217	219	226
65	205	208	209	215	221
75	197	199	200	202	212
85	193	194	195	197	204

Для суднового дизеля 5Н17/28 Hyundai Heavy Industries максимальна концентрація оксидів азоту у випускних газах не повинна перевищувати значення

$$\text{NO}_x \leq 44 \cdot 900^{-0,23} = 9,20 \text{ г/(кВт} \cdot \text{год)}.$$

Зазначимо, що за всіх режимах та за будь-яких умов проведення експерименту концентрація оксидів азоту NO_x в випускних газах не перевищувала розрахованого значення. Таким чином, експлуатація дизелів 5Н17/28 Hyundai Heavy Industries під час експерименту проводилася із забезпеченням вимог Annex VI MARPOL [191].

Для кращої візуалізації отриманих результатів за значеннями таблиці 4.4 побудовані діаграми, що показані на рис. 4.5.

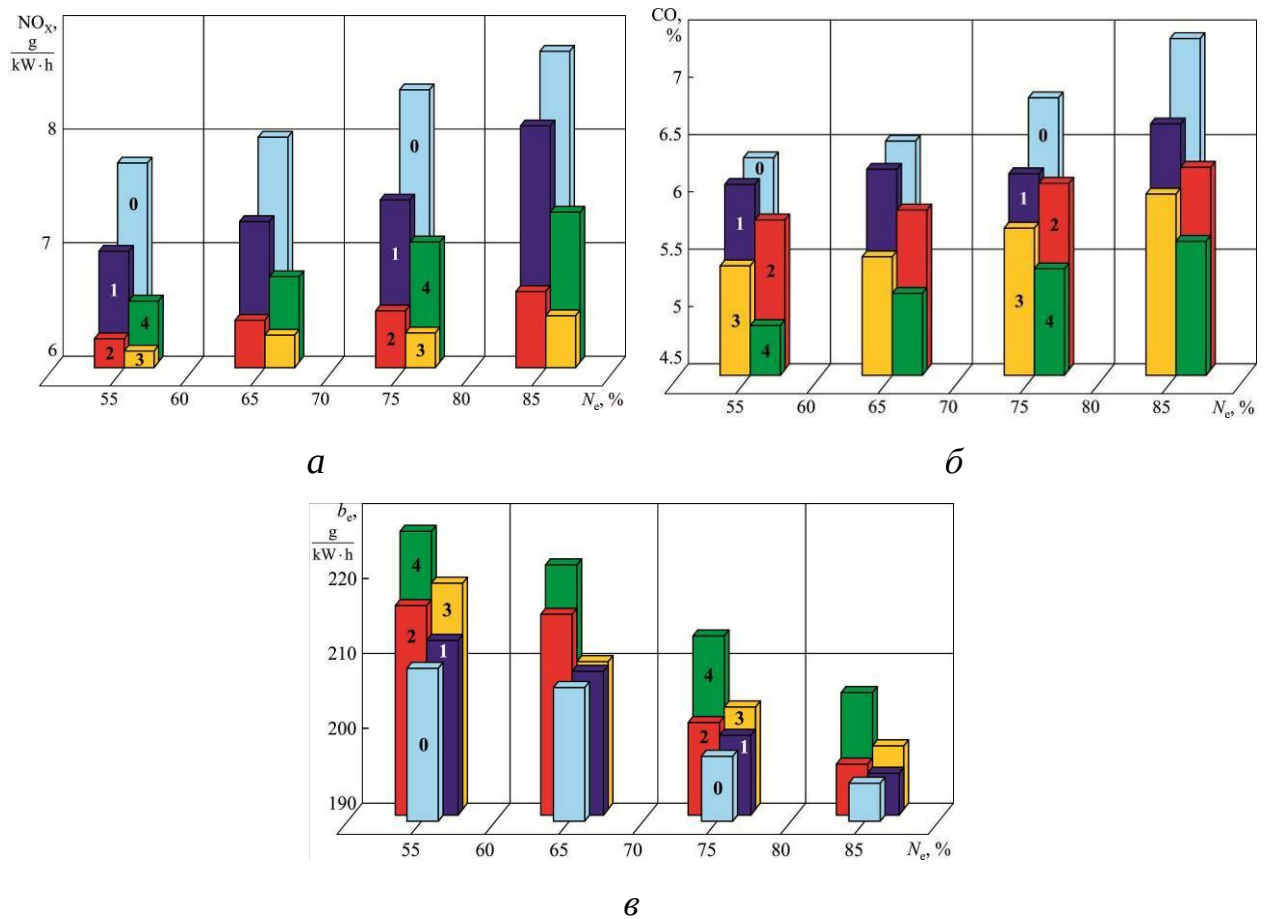


Рис. 4.5. Залежність показників роботи дизеля 5Н17/28 Hyundai Heavy Industries від навантаження під час використання палива різного складу: *а* – емісія оксидів азоту; *б* – об'ємний вміст оксиду вуглецю у випускних

газах; *в* – питома ефективна витрата палива;

0 – RMB30; 1 – RMB30+5 % біопалива; 2 – RMB30+10 % біопалива;

3 – RMB30+15 % біопалива; 4 – RMB30+20 % біопалива

Зазначимо, що аналогічно раніше отриманим результатам для всього діапазону концентрації біопалива B99.9 FAME у суміші з паливом RMB30 спостерігається зниження емісії NO_x та CO у випускних газах та збільшення питомої ефективної витрати палива b_e .

Відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO у випускних газах, а також питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувалися за виразами:

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^{RMB} - NO_x^{bio}}{NO_x^{RMB}} \cdot 100\%, \quad \Delta CO = \frac{CO^{RMB} - CO^{bio}}{CO^{RMB}} \cdot 100\%, \quad \Delta b_e = \frac{b_e^{bio} - b_e^{RMB}}{b_e^{bio}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{RMB} , NO_x^{bio} – концентрація оксиду азоту у випускних газах дизеля під час його експлуатації на паливі RMB та суміші з біопаливом, г/(кВт·год);

CO^{RMB} , CO^{bio} – об'ємний вміст оксиду вуглецю у випускних газах дизеля під час його експлуатації на паливі RMB та суміші з біопаливом, %;

b_e^{RMB} , b_e^{bio} – питома ефективна витрата палива дизеля під час його експлуатації на паливі RMB та суміші з біопаливом, г/(кВт·год).

Отримані значення узагальнено в таблиці 4.5, а також показано на діаграмах рис. 4.6.

Таблиця 4.5

Зміна відносних показників роботи дизеля 5Н17/28 Hyundai Heavy Industries

Наванта- ження на дизель, %	Вид палива			
	RMB30+5 % біопалива	RMB30+10 % біопалива	RMB30+15 % біопалива	RMB30+20 % біопалива
Відносне зменшення концентрації оксидів азоту ΔNO_x у випускних газах, %				
55	10,36	19,43	20,73	15,67
65	9,57	20,40	21,66	15,11
75	10,82	22,72	25,00	15,75
85	7,60	24,42	26,61	16,13
Відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO у випускних газах, %				
55	3,80	9,02	14,87	22,78
65	4,01	9,26	16,05	20,99
75	8,32	10,07	17,08	21,75
85	10,72	14,79	18,86	23,61
Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива Δb_e , %				
55	1,92	4,33	5,29	8,65
65	1,46	1,95	4,88	7,80
75	1,02	1,52	2,54	7,61
85	0,52	1,04	2,07	5,70

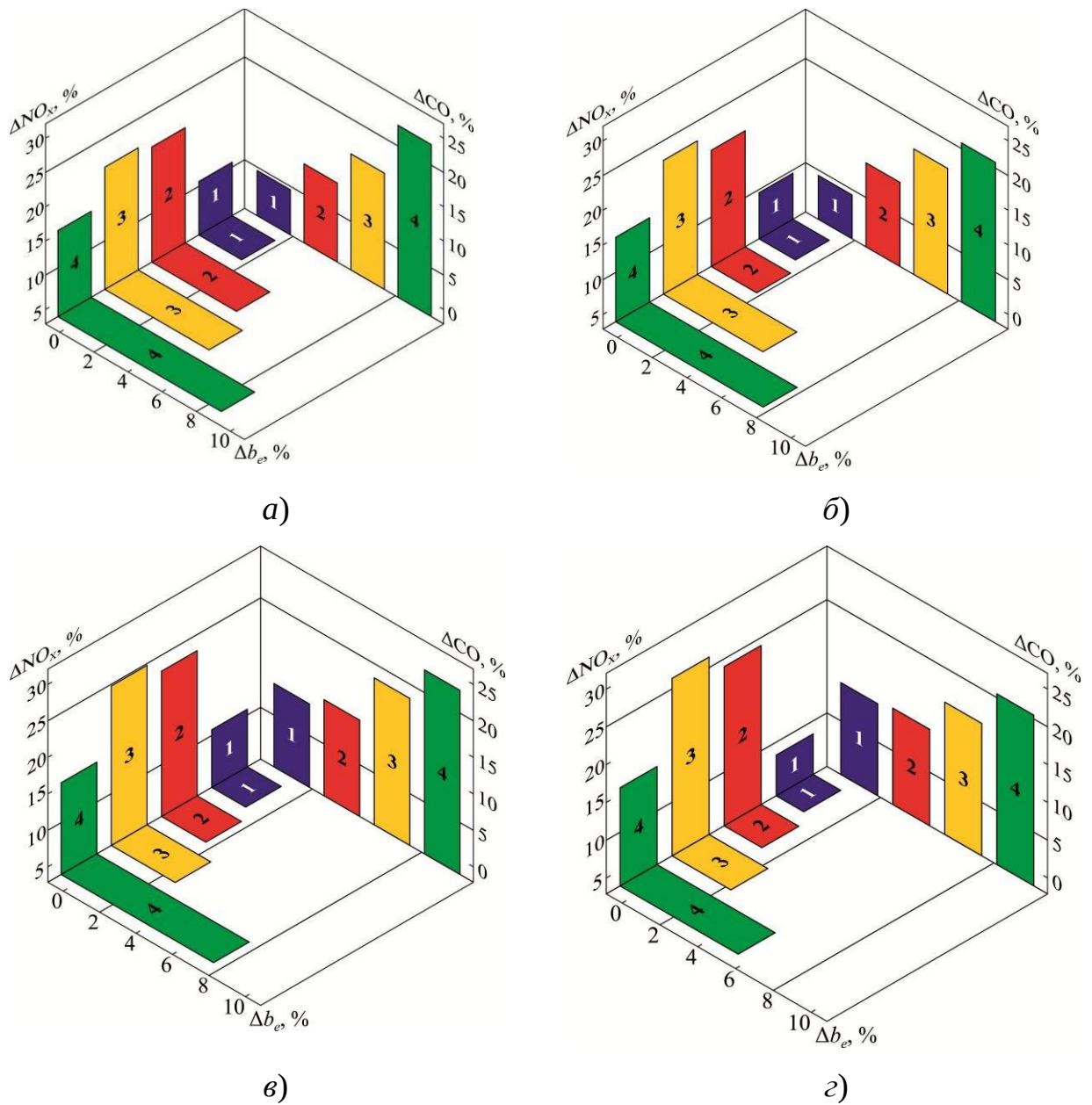


Рис. 4.6. Відносна зміна показників роботи дизеля 5N17/28 Hyundai Heavy

Industries під час використання палива різного складу:

а – навантаження 55 %; *б* – навантаження 65 %; *в* – навантаження 75 %;

г – навантаження 85 %;

1 – RMB30+5 % біопалива; 2 – RMB30+10 % біопалива; 3 – RMB30+15 % біопалива; 4 – RMB30+20 % біопалива

4.2.3. Випробування під час експлуатації спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн

За розробленою технологією дослідження були продовжені та виконувалися на суднових СОД дизелях 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries з наступними основними характеристиками:

- діаметр циліндра – 0,17 м;
- хід поршня – 0,28 м;
- частота обертання – 900 хв^{-1} ;
- номінальна потужність – 690 кВт;
- кількість циліндрів – 6.

Три подібні дизелі входили до складу енергетичної установки морського судна дедвейтом 14745 тонн [182]. Принципова схема паливної системи дизелів показана на рис. 4.7.

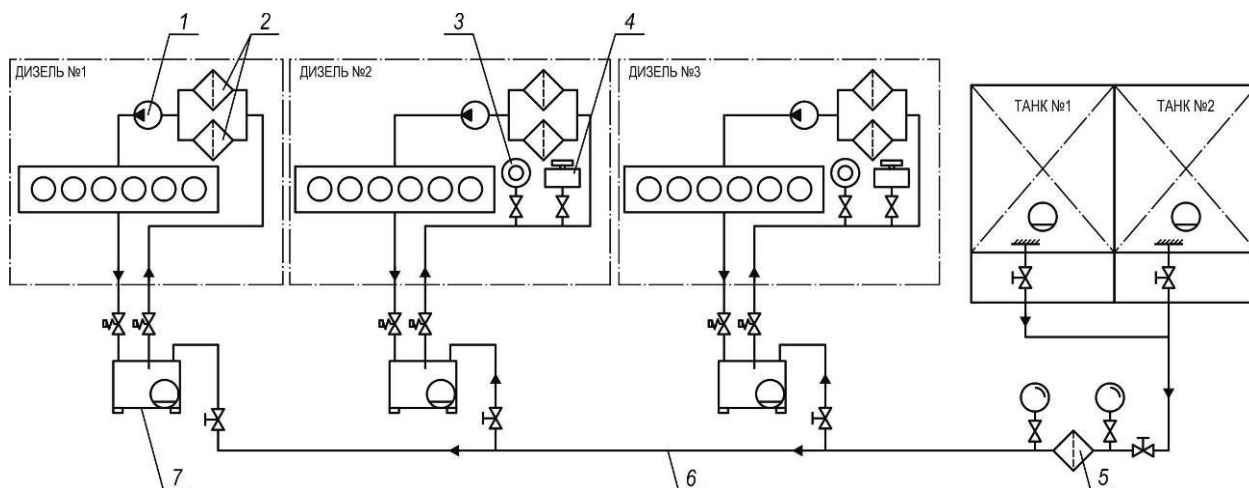


Рис. 4.7. Принципова схема паливної системи суднових дизелів 6Н17/28

Hyundai Heavy Industries:

- 1 – паливний насос; 2, 5 – паливний фільтр; 3 – витратомір; 4 – дозатор;
6 – паливна магістраль; 7 – витратна паливна цистерна

Подача палива до форсунок дизеля здійснюється за допомогою паливного насоса 1, який забирає паливо з витратної цистерни 7 через фільтр 2. Поповнення цистерни 7 проводиться з паливних танків по магістралі 6. Попереднє очищення палива виконується у фільтрі 5.

Перед початком проведення експерименту всі дизелі мали порівняний моторесурс паливної апаратури, деталей циліндрової групи, підшипників руху, а також однаковий технічний стан. Шляхом перемикання груп споживачів експлуатація дизелів виконувалася на однаковому навантаженні, підтримка якого вимагалась під час проведення експерименту. Під час проведення експерименту на всіх дизелях забезпечувалася підтримка постійних параметрів у системах мащення та охолодження. Робота дизелів на кожному з досліджуваних режимів проводилася не менше 1,5...2 годин, протягом яких виконувалось вимірювання основних параметрів і усереднення отриманих значень. Це забезпечувало коректність проведення досліджень і можливість зіставлення вимірів, виконаних на різних дизелях.

Експерименти виконувались з використанням палив, основні характеристики яких надані в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Основні характеристики суднових палив під час проведення досліджень
на дизелі 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries

Характеристика	Паливо FAME 99.9	Паливо DMA	Паливо RMA10
В'язкість за 40 °C, мм ² /с	4,5...5	5,8...6,1	6,5...6,7
Температура спалаху, °C	120	122	135
Вміст сірки, г/кг	0,01	0,08	0,35
Густина при 15 °C, м ³ /кг	900	896	920
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	37650	42160	41910

Експлуатація дизелів на паливі DMA (зі вмістом сірки 0,08 % за масою) виконувалась під час знаходження судна в SECAs. За умовою знаходження судна поза SECAs використовувалось паливо RMA10 (зі вмістом сірки 0,35 % за масою).

Контур подачі палива до першого дизеля не змінювався та дизель експлуатувався на паливі DMA (з в'язкістю 6 сСт і вмістом сірки 0,08 %). В'язкість палива дозволяє додавати в нього біодизельне паливо. Як таке використовувалось FAME 99.9 (з в'язкістю 8 сСт і вмістом сірки 0,005 %). Вміст біодизельного палива в паливній суміші змінювався в інтервалі 5...15 %. Паливна суміш подавалася до дизелів 2 і 3. Для забезпечення дозування біодизельного палива в паливній суміші, у контур дизелів 2 і 3 додатково встановлювалися витратомір і дозатор (позиції 3 і 4 на рис. 4.7). Основними величинами, які вимірювалися під час проведення експерименту, були питома ефективна витрата палива і концентрація оксидів азоту у випускних газах. Навантаження на дизелі під час проведення експериментів змінювалося в інтервалі 25 ... 75 % від номінального значення.

Результати дослідження наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Результати експерименту

Вид палива	Навантаження на дизель, %		
	25	50	75
	Концентрація NO _x у випускних газах, г/(кВт·год)		
DMA	6,28	7,17	8,27
DMA+5 % біодизельного палива	5,96	6,16	7,47
DMA+10 % біодизельного палива	5,36	5,86	6,34
DMA+15 % біодизельного палива	5,21	6,32	7,63
	Питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год)		
DMA	196	189	185
DMA+5 % біодизельного палива	198	191	187
DMA+10 % біодизельного палива	200	193	191
DMA+15 % біодизельного палива	201	194	195

Зазначимо, що на всіх досліджуваних режимах і за будь-яких умов проведення експерименту концентрація оксидів азоту у випускних газах не перевищувала значення, визначеного за виразом (4.1), таким чином експлуатація дизелів проводилася із забезпеченням вимог Annex VI MARPOL [192, 193].

За результатами таблиці 4.7 побудовані діаграми, що відображають зміни емісії NO_x (рис. 4.8, а) та питомої ефективної витрати палива (рис. 4.8, б) для різних навантажень суднового дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries.

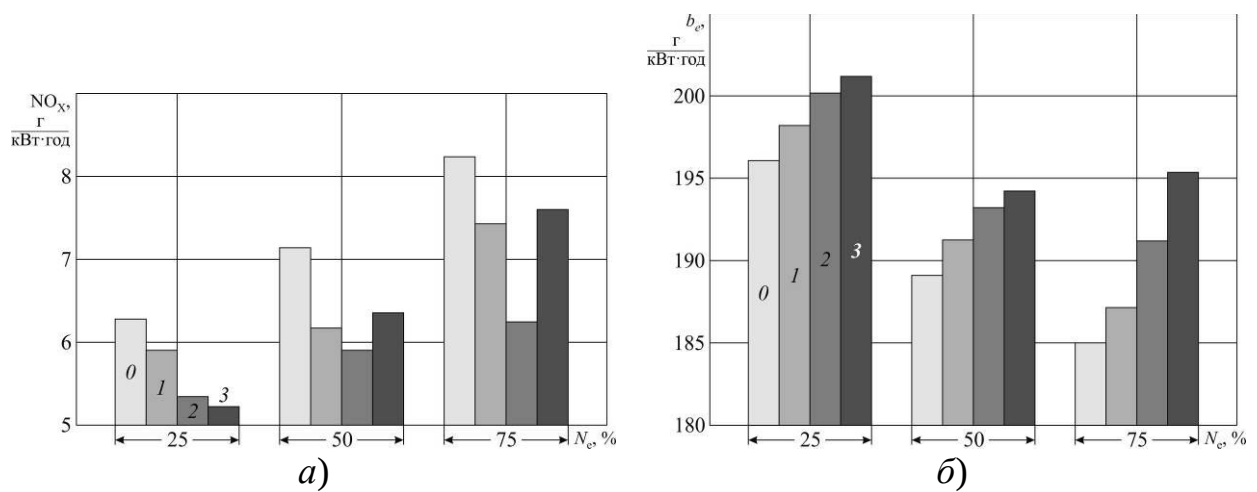


Рис. 4.8. Концентрації NO_x у випускних газах, г/(кВт·год), питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год), для різних навантажень суднового дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries і різних видів палива:
0 – паливо DMA; 1 – DMA+5 % біодизельного палива; 2 – DMA+10 % біодизельного палива; 3 – DMA+15% біодизельного палива

Відносні зміни концентрації оксидів азоту у випускних газах ΔNO_x і питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувались за виразами

$$\Delta\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^{\text{DMA}} - \text{NO}_x^{\text{Bio}}}{\text{NO}_x^{\text{DMA}}} \cdot 100\%, \quad \Delta b_e = \frac{b_e^{\text{Bio}} - b_e^{\text{DMA}}}{b_e^{\text{Bio}}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{DMA} , b_e^{DMA} – концентрація і питома ефективна витрата палива під час експлуатації дизеля на паливі DMA, г/ (кВт·год);

NO_x^{Bio} , b_e^{Bio} – концентрація і питома ефективна витрата палива під час експлуатації дизеля на суміші палива DMA та біодизельного палива, г/(кВт·год).

Отримані значення узагальнені у вигляді таблиці 4.8, а також відображені на діаграмах, наведених на рис. 4.9.

Таблиця 4.8

Результати експерименту

Вид топлива	Навантаження на дизель, %		
	25	50	75
	Відносна зміна концентрації NO_x в випускних газах, %		
DMA+5 % біодизельного палива	5,10	14,09	9,67
DMA+10 % біодизельного палива	14,65	18,27	23,34
DMA+15 % біодизельного палива	17,04	11,85	7,74
	Відносна зміна питомої ефективної витрати палива, %		
	25	50	75
DMA+5 % біодизельного палива	1,01	1,05	1,07
DMA+10 % біодизельного палива	2,00	2,07	3,14
DMA+15 % біодизельного палива	2,49	2,58	5,13

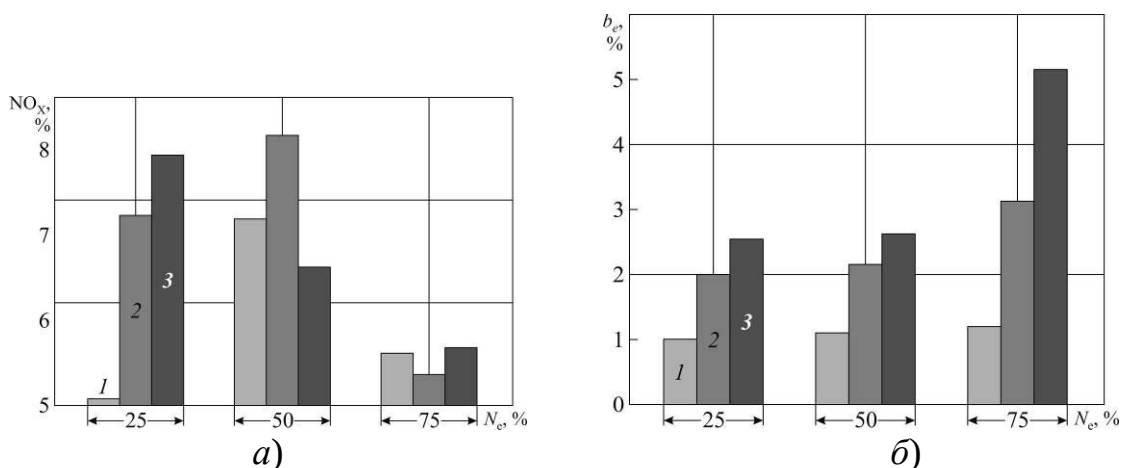


Рис. 4.9. Відносна зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах (а) і питомої ефективної витрати палива (б) для різних навантажень суднового дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries і різних видів палива:
1 – DMA+5 % біодизельного палива; 2 – DMA+10 % біодизельного палива;
3 – DMA+15% біодизельного палива

Випробування, під час яких досліджувався вплив паливної суміші, до складу якої входить біопаливо FAME99.9 та паливо нафтового походження DMA, проводились під час експлуатації судна в зоні SECA (в якій необхідно використовувати паливо зі вмістом сірки не більш ніж 0,1 %). Під час знаходження судна поза районом SECA випробування виконувались для паливної суміші, що складалась із палив FAME99.9 та RMA10.

Під час проведення експерименту (за допомогою суднової системи діагностування Doctor) також визначались максимальний тиск згоряння p_z та температура випускних газів $t_{вг}$. Похибка у вимірюванні цих показників не перевищувала $\pm 0,5$ % [194, 195].

Результати дослідження наведені в таблицях 4.8-4.12.

Таблиця 4.8

Питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год), під час використання паливної суміші різного складу

Режим роботи	RMA	RMA+5% біопалива	RMA+10 % біопалива	RMA+15 % біопалива	RMA+20 % біопалива
$0,3N_{еном}$	208	212	217	222	225
$0,4N_{еном}$	203	208	212	216	218
$0,5N_{еном}$	197	203	209	211	213
$0,6N_{еном}$	193	197	203	204	205
$0,7N_{еном}$	192	193	195	197	199
$0,8N_{еном}$	193	194	197	199	201

Таблиця 4.9

Концентрація оксидів азоту у випускних газах, г/(кВт·год), під час використання паливної суміші різного складу

Режим роботи	RMA	RMA+5% біопалива	RMA+10 % біопалива	RMA+15 % біопалива	RMA+20 % біопалива
$0,3N_{\text{еном}}$	7,42	7,32	6,62	6,19	6,77
$0,4N_{\text{еном}}$	7,56	7,41	6,68	6,29	6,85
$0,5N_{\text{еном}}$	7,72	7,49	6,78	6,41	6,94
$0,6N_{\text{еном}}$	7,88	7,63	6,82	6,52	6,97
$0,7N_{\text{еном}}$	8,02	7,74	6,88	6,54	7,01
$0,8N_{\text{еном}}$	8,12	7,86	7,12	6,65	7,14

Таблиця 4.10

Об'ємний вміст оксиду вуглецю у випускних газах, %, під час використання паливної суміші різного складу

Режим роботи	RMA	RMA+5% біопалива	RMA+10 % біопалива	RMA+15 % біопалива	RMA+20 % біопалива
$0,3N_{\text{еном}}$	6,67	6,52	6,35	5,98	5,41
$0,4N_{\text{еном}}$	6,81	6,62	6,48	6,14	5,47
$0,5N_{\text{еном}}$	7,14	6,93	6,57	6,31	5,63
$0,6N_{\text{еном}}$	7,31	7,08	6,75	6,36	5,78
$0,7N_{\text{еном}}$	7,56	7,17	7,07	6,57	5,88
$0,8N_{\text{еном}}$	7,96	7,37	7,14	6,77	5,99

Таблиця 4.11

Максимальний тиск згоряння, МПа, в циліндрі дизеля під час використання паливної суміші різного складу

Режим роботи	RMA	RMA+5% біопалива	RMA+10 % біопалива	RMA+15 % біопалива	RMA+20 % біопалива
$0,3N_{\text{еном}}$	9,5	9,4	9,3	9,1	8,8
$0,4N_{\text{еном}}$	10,3	10,2	10,0	9,9	9,6
$0,5N_{\text{еном}}$	11,3	11,2	11	10,8	10,6
$0,6N_{\text{еном}}$	12,8	12,6	12,5	12,3	12,1
$0,7N_{\text{еном}}$	14,3	14,1	14,0	13,8	13,6
$0,8N_{\text{еном}}$	16,1	16,0	15,8	15,6	15,4

Таблиця 4.12

Температура випускних газів, °С, під час використання паливної суміші різного складу

Режим роботи	RMA	RMA+5% біопалива	RMA+10 % біопалива	RMA+15 % біопалива	RMA+20 % біопалива
$0,3N_{\text{еном}}$	265	265	269	273	275
$0,4N_{\text{еном}}$	275	275	278	283	285
$0,5N_{\text{еном}}$	285	285	287	291	295
$0,6N_{\text{еном}}$	300	300	302	306	309
$0,7N_{\text{еном}}$	295	295	298	299	302
$0,8N_{\text{еном}}$	290	290	293	296	298

Дані, що наведені в таблицях 4.8-4.12, свідчать про зміну експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries під час використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження. При цьому до позитивних змін відноситься зменшення емісії оксидів азоту NO_x та вуглецю CO_2 (відповідно в діапазоні 1,35...18,45 % та 2,25...24,75 % залежно від навантаження на дизель), до

негативних: збільшення питомої витрати палива b_e – на 0,52...8,17 %, зменшення максимального тиску згоряння p_z – на 0,62...7,37 %, збільшення температури випускних газів $t_{вг}$ – на 11...15 °С. Негативні зміни (збільшення b_e та $t_{вг}$, а також зменшення p_z) пов'язані з збільшенням кута самозаймання палива під час використання паливної суміші до складу якої входить біодизельне паливо. При цьому процес згоряння зсувається на лінію розширення, про це свідчить саме підвищення температури випускних газів.

4.2.4. Випробування під час експлуатації спеціалізованого морського судна дедвейтом 10820 тонн

З метою збільшення масиву експериментальних та поширення позитивного досвіду результатів досліджень з використання палива біологічного походження на більшу кількість засобів морського транспорту, дослідження виконувались на спеціалізованому судні дедвейтом 10820 тонн, що здійснювало короткочасні (протягом 4...6 днів) переходи між портами, в яких була передбачена можливість поповнення запасів альтернативного палива [196]. Як таке використовувалось біопаливо B99.9 FAME, що складається з 99,9 % біодизельного палива та 0,1 % дизельного палива класу Ultra-Low Sulfur Diesel fuel (з наднизьким вмістом сірки $S=0,03$ %). Як «базове» використовувалось паливо DMB, що рекомендовано для СОД, які виконують функції допоміжних двигунів. Вміст біопалива в паливній суміші змінювався в межах 5...15 % від загального об'єму [104].

Дослідження виконувались на судових СОД 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel з наступними основними характеристиками:

- діаметр циліндра – $d=0,17$ м;
- хід поршня – $s=0,27$ м;
- частота обертання – $n=1000$ хв⁻¹;

• номінальна потужність – $N_{\text{еном}}=490$ кВт;

• кількість циліндрів – $i_{\text{ц}}=5$,

що у кількості трьох штук входили до складу суднової допоміжної енергетичної установки. Принципова схема паливної системи дизелів показана на рис. 4.10.

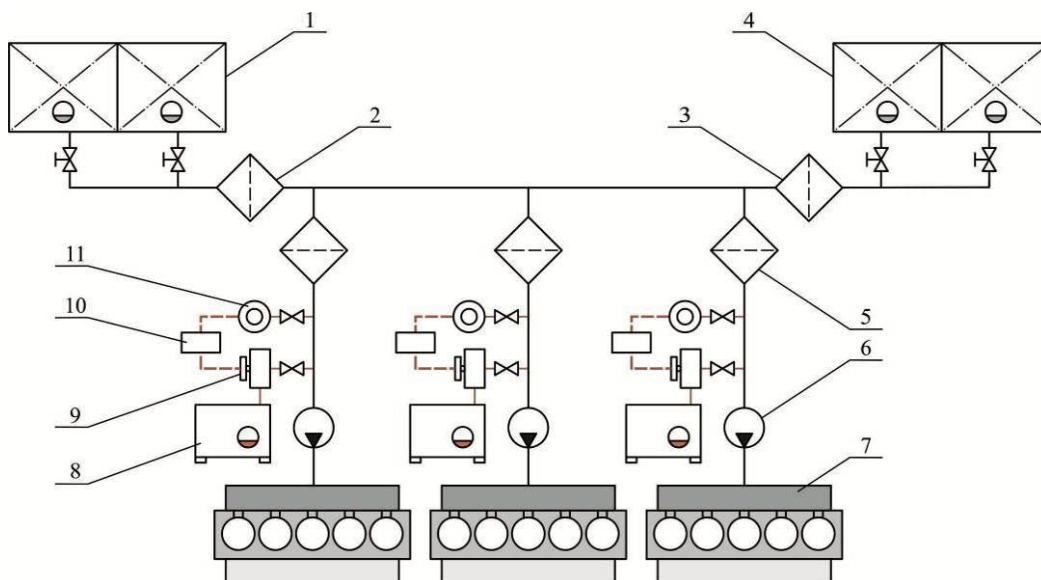


Рис. 4.10. Принципова схема паливної системи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel:

- 1 – витратна цистерна дизельного (легкого) палива;
 2, 3 – паливний фільтр грубого очищення; 4 – витратна цистерна середньоважкого палива; 5 – паливний фільтр тонкого очищення;
 6 – паливний насос; 7 – дизель; 8 – цистерна біопалива; 9 – дозатор;
 10 – мікроконтролер; 11 – витратомір

Робота паливної системи відбувалася в такий спосіб. Експлуатація дизелів може виконуватися на дизельному (легкому) паливі з вмістом сірки до 0,1 % або на середньоважкому паливі з вмістом сірки до 0,5 %, характеристики яких забезпечують якісне утворення їх сумішей з біопаливом. З витратних цистерн 1 або 3 (залежно від умов експлуатації дизеля) дизельне або середньоважке паливо через фільтр грубого очищення 2 або 4 надходить до паливних насосів 6 і далі прямує до дизелів 7. Додаткове

очищення палива забезпечується за допомогою фільтра тонкого очищення 5. У магістралі дизелів додатково встановлювалися витратна цистерна біопалива 8, дозатор 9 та витратомір 11. Під час досліджень як паливо нафтового походження використовувалось паливо DMB (з в'язкістю 10 сСт), як біопаливо – паливо B99.9 FAME (з в'язкістю 10 сСт). Вміст біопалива в паливній суміші змінювався в інтервалі 5...20 %. Необхідна кількість біопалива в паливній суміші забезпечувалася за допомогою мікроконтролера 10, використання яких день від дня поширюється в суднових енергетичних установках [16, 17].

Метою дослідження є визначення впливу біопалива на економічні та екологічні показники роботи суднового дизеля.

Критерієм економічності роботи дизеля була обрана питома ефективна витрата палива b_e . Як екологічні показники роботи суднових дизелів приймалися концентрація оксидів азоту C_{NO_x} та об'ємний вміст оксиду вуглецю C_{CO_2} у випускних газах.

Під час проведення дослідження для забезпечення споживачів енергією експлуатувався «контрольний» дизель (що використовував паливо DMB) та один, або два інших (в яких використовувалась суміш палива DMB та біопалива). Дизелі, на яких виконувалися експериментальні дослідження, забезпечували потужністю постійні групи споживачів. При цьому (залежно від досліджуваних режимів) їх потужність становила 270 кВт, 320 кВт, 365 кВт, 415 кВт, що відповідало навантаженню $0,55N_{еном}$, $0,65N_{еном}$, $0,75N_{еном}$, $0,85N_{еном}$. Похибка в навантаженні під час переходу дизеля з одного сталого режиму до іншого не перевищувала $\pm 1,5\%$.

Результати дослідження наведені в таблицях 4.13-4.15.

Таблиця 4.13

Питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год), для палива різного складу

Навантаження дизеля	DMB	DMB+ 5% біопалива	DMB+ 10% біопалива	DMB+ 15% біопалива	DMB+ 20% біопалива
$0,55N_{\text{еном}}$	208	212	215	218	225
$0,65N_{\text{еном}}$	203	206	209	211	218
$0,75N_{\text{еном}}$	198	201	203	206	212
$0,85N_{\text{еном}}$	192	194	196	199	205

Таблиця 4.14

Концентрація оксидів азоту у випускних газах, г/(кВт·год), для палива різного складу

Навантаження дизеля	DMB	DMB+ 5% біопалива	DMB+ 10% біопалива	DMB+ 15% біопалива	DMB+ 20% біопалива
$0,55N_{\text{еном}}$	7,42	7,09	6,52	6,03	6,67
$0,65N_{\text{еном}}$	7,83	7,35	6,78	6,18	6,84
$0,75N_{\text{еном}}$	8,17	7,67	6,54	6,28	6,93
$0,85N_{\text{еном}}$	8,35	7,82	6,36	6,32	7,08

Таблиця 4.15

Об'ємний вміст оксиду вуглецю у випускних газах, %, для палива різного складу

Навантаження дизеля	DMB	DMB+ 5% біопалива	DMB+ 10% біопалива	DMB+ 15% біопалива	DMB+ 20% біопалива
$0,55N_{\text{еном}}$	6,28	6,02	5,68	5,31	4,82
$0,65N_{\text{еном}}$	6,42	6,11	5,73	5,41	4,87
$0,75N_{\text{еном}}$	6,72	6,32	5,88	5,58	5,02
$0,85N_{\text{еном}}$	6,85	6,44	5,95	5,63	5,11

За результатами експериментів побудовані діаграми, що відображають зміни питомої ефективної витрати палива (рис. 4.11, *а*), емісії NO_x (рис. 4.11, *б*) та об'ємної концентрації CO_2 у випускних газах (рис. 4.11, *в*) для різних умов експлуатації суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel.

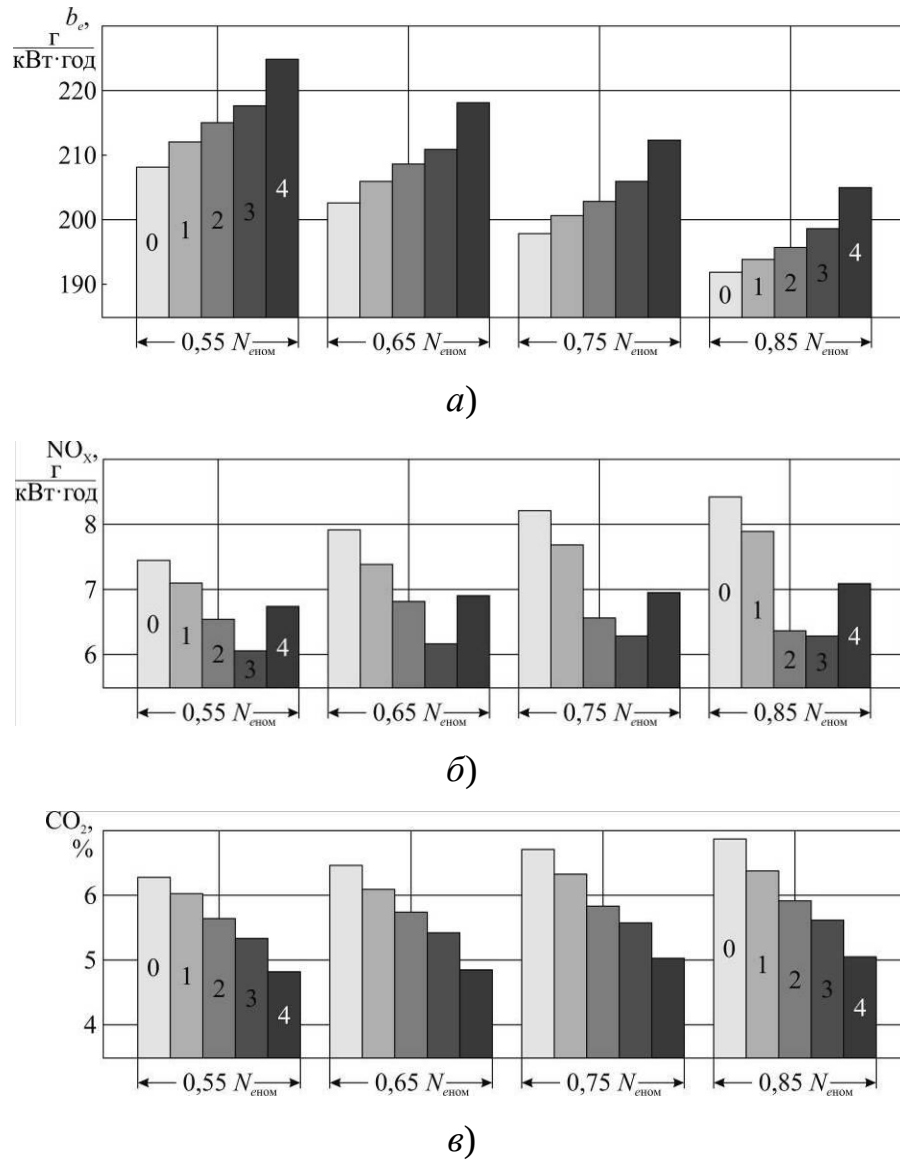


Рис. 4.11. Залежності показників роботи дизеля 5DC-17A від навантаження під час використання палива різного складу: 0 – DMB; 1 – DMB+5 % біопалива; 2 – DMB+10 % біопалива; 3 – DMB+15 % біопалива; 4 – DMB+20 % біопалива;
а – питома витрата палива; *б* – емісія оксидів азоту; *в* – об'ємний вміст оксиду вуглецю у випускних газах

Максимальна допустима концентрація оксидів азоту у випускних газах для суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel не повинна перевищувати:

$$C_{\text{NO}_x} \leq 44 \cdot 1000^{-0,23} = 8,98 \text{ г/ (кВт} \cdot \text{год)}.$$

Зазначимо, що на всіх досліджуваних режимах і за будь-яких умов проведення експерименту концентрація оксидів азоту у випускних газах не перевищувала цього значення, таким чином експлуатація дизелів проводилася із забезпеченням вимог Annex VI MARPOL.

Відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO_2 у випускних газах, а також питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувались за виразами

$$\Delta\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^{\text{DMB}} - \text{NO}_x^{\text{bio}}}{\text{NO}_x^{\text{DMB}}} \cdot 100\%, \quad \Delta\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2^{\text{DMB}} - \text{CO}_2^{\text{bio}}}{\text{CO}_2^{\text{DMB}}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{bio}} - b_e^{\text{DMB}}}{b_e^{\text{bio}}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{DMB} , NO_x^{bio} , b_e^{DMB} , b_e^{bio} – концентрація оксиду азоту у випускних газах та питома ефективна витрата палива під час експлуатації дизеля на паливі DMB та біопаливі, г/(кВт·год);

CO_2^{DMB} , CO_2^{bio} – об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах під час експлуатації дизеля на паливі DMB та біопаливі, %.

Отримані значення узагальнені в таблицях 4.16-4.18, а також відображені на діаграмах, наведених на рис. 4.12.

Таблиця 4.16

Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива, %, для палива
різного складу

Навантаження дизеля	DMB+5 % біопалива	DMB+10 % біопалива	DMB+15 % біопалива	DMB+20 % біопалива
$0,55N_{\text{еном}}$	1,92	3,37	4,81	8,17
$0,65N_{\text{еном}}$	1,48	2,96	3,94	7,39
$0,75N_{\text{еном}}$	1,52	2,53	4,04	7,07
$0,85N_{\text{еном}}$	1,04	2,08	3,65	6,77

Таблиця 4.17

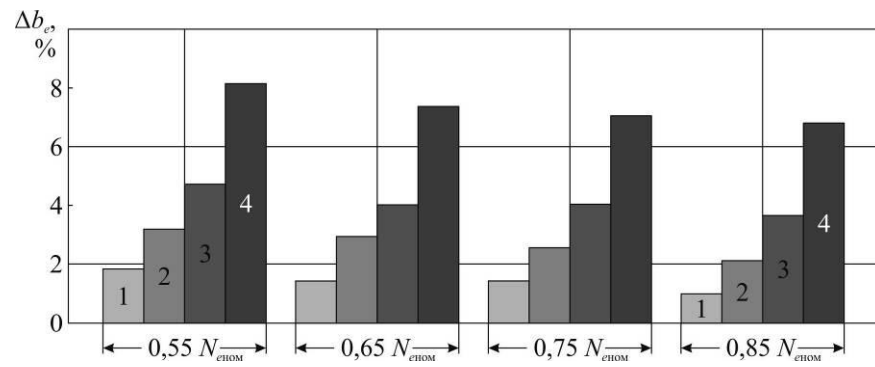
Відносне зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах, %, для палива різного складу

Навантаження дизеля	DMB+5 % біопалива	DMB+10 % біопалива	DMB+15 % біопалива	DMB+20 % біопалива
$0,55N_{\text{еном}}$	4,45	12,13	18,73	10,11
$0,65N_{\text{еном}}$	6,13	13,41	21,07	12,64
$0,75N_{\text{еном}}$	6,12	19,95	23,13	15,18
$0,85N_{\text{еном}}$	6,35	23,83	24,31	15,21

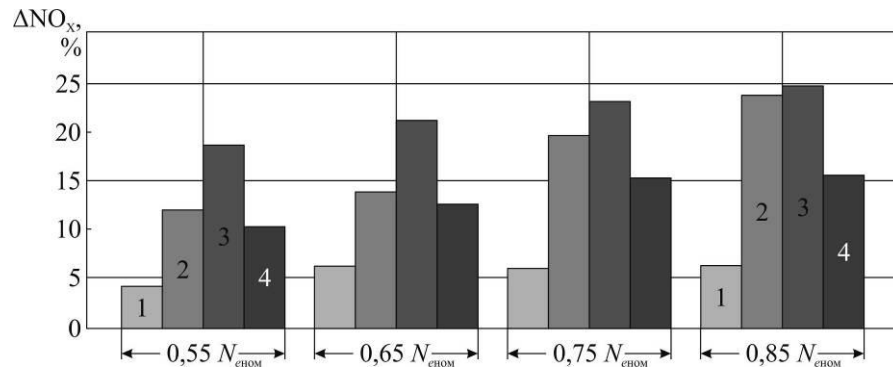
Таблиця 4.18

Відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах, %, для палива різного складу

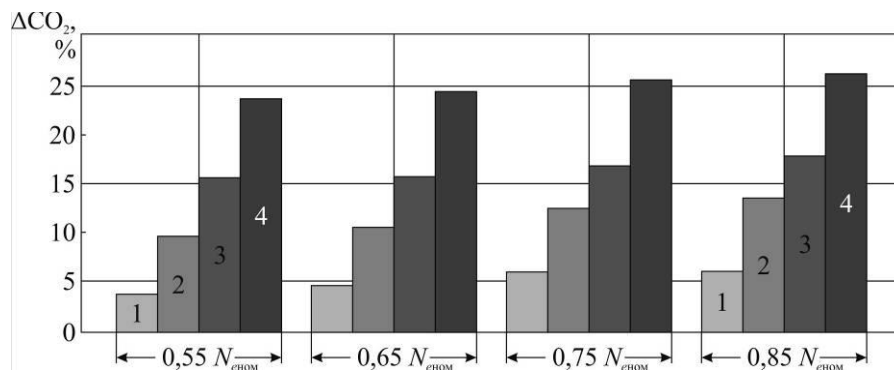
Навантаження дизеля	DMB+5 % біопалива	DMB+10 % біопалива	DMB+15 % біопалива	DMB+20 % біопалива
$0,55N_{\text{еном}}$	4,14	9,55	15,45	23,25
$0,65N_{\text{еном}}$	4,83	10,75	15,73	24,14
$0,75N_{\text{еном}}$	5,95	12,5	16,96	25,3
$0,85N_{\text{еном}}$	5,99	13,14	17,81	25,4



а)



б)



в)

Рис. 4.12. Відносна зміна показників роботи дизеля 5DC-17A від навантаження під час використання палива різного складу: 1 – ДМВ+5 % біопалива; 2 – ДМВ+10 % біопалива; 3 – ДМВ+15 % біопалива; 4 – ДМВ+20 % біопалива;
 а – збільшення питомої витрати палива; б – зменшення емісії оксидів азоту;
 в – зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах

4.3. Висновки за розділом 4

Як результат досліджень, що виконані в розділі 4 визначимо наступне.

1. Ефективність використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, доцільно визначати за екологічним та економічним критерієм. При цьому як основний екологічний критерій слід обирати емісію оксидів азоту в випускних газах (як показник, що регламентується та контролюється ІМО), як додатковий екологічний критерій (в зв'язку з тим, що його значення є важливим з точки зору попередження забруднення довкілля, але ще не регламентуються вимогами класифікаційних товариств та міжнародних конвенцій) може розглядатися емісія оксидів вуглецю з випускними газами. Основним економічним критерієм є питома витрата паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження.

2. Використання паливної суміш, до складу якої входить паливо біологічного походження (а саме її утворення, впорскування та згоряння), повинне забезпечувати підтримання в необхідному діапазоні основних експлуатаційних показників роботи дизелів морських суден.

3. Оптимальний склад паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, визначається такою його концентрацією, за якою гарантується максимальне збільшення екологічних та мінімальне зниження економічних параметрів роботи суднового дизеля з одночасним забезпеченням значення ефективної потужності дизеля.

4. Комплекс односпрямованих досліджень, що виконувався:

- на дизелі 6N165LW Yanmar судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн (під час якого випробувалась суміш, яку складали дизельне RMA10 та біодизельне паливо B99.9 FAME);

- на дизелі 5H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 9600 тонн (під час якого випробувалась суміш, яку складали дизельне RMB30 та біодизельне паливо B99.9 FAME);

- на дизелі 6H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн (під час якого випробувалась суміш, яку складали дистилатне DMA та біодизельне паливо B99.6 FAME);

- на дизелі 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel спеціалізованого морського судна дедвейтом 10820 тонн (під час якого випробувалась суміш, яку складали дистилатне DMB та біодизельне паливо B99.6 FAME),

визначив, що використання вказаних паливних сумішей в залежності від експлуатаційних режимів роботи дизеля забезпечує зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами до 26,6 % та зменшення концентрації емісії вуглецю у випускних газах до 23,6 %. На жаль при цьому здійснюється підвищення питомої витрати палива, значення якої на деяких експлуатаційних режимів може майже на 9 % перебільшувати величину аналогічного показника під час використання палива нафтового походження. При цьому існує широкий діапазон експлуатаційних режимів в яких підвищення питомої витрати палива під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, не перевищує 2,5...3,2 %.

5. Оптимальний вміст палива біологічного походження в паливній суміші (за яким забезпечується максимальне зниження емісії оксидів азоту та вуглецю та мінімальне підвищення питомої витрати палива) знаходиться в діапазоні 10...15 % та визначається експериментально відповідно до заздалегідь розробленої та погодженою з контролюючими структурами технологією.

РОЗДІЛ 5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

П'ятий розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню головного завдання, яким є забезпечення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів під час використання палива біологічного походження.

Основні результати, що отримані в розділі 5, наведені в роботах [57], [57], [138], [182], [196], [201], [202], [203], [209].

5.1. Забезпечення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів шляхом корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження

Використання паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо, змінює перебіг робочого циклу в циліндрі дизеля та процес згоряння. Це призводить до зміни експлуатаційних показників дизелів, при цьому виникає завдання визначення фаз паливоподачі (насамперед кута випередження подачі палива) за яких зміна цих показників підвищує ефективність роботи дизеля та покращує його екологічні показники.

Розв'язання цього завдання можливе шляхом проведення експериментів на основних експлуатаційних режимах роботи дизеля [197, 198].

5.1.1. Експериментальні дослідження під час експлуатації морського спеціалізованого судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн

Дослідження виконувались на морському спеціалізованому судні класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. В енергетичну установку судна входили дизелі 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar [56, 196]. Основні характеристики дизелів представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Основні характеристики дизелів судна класу Bulker Carrier
дедвейтом 63246 тонн

Параметр	5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo	6EY18ALW Yanmar
Діаметр циліндра, м	0,6	0,18
Хід поршня, м	2,4	—
Кількість циліндрів	5	6
Потужність на номінальному навантаженні, кВт	8050	800
Частота обертання вала, хв ⁻¹	89	900
Питома витрата палива у діапазоні експлуатаційних навантажень 45–100 %, г/(кВт·год)	0,187...0,174	0,198...0,183
Кількість у складі суднової енергетичної установки	1	3

Під час експлуатації дизелів у спеціальних екологічних районах з контролю емісії викидів сірки (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) використовувалося паливо DMA, під час експлуатації дизелів за межами SECAs використовувалося паливо RME180. Це забезпечувало вимоги Додатку VI Міжнародної конвенції МАРПОЛ та сприяло зменшенню

забруднення довкілля оксидами сірки в цих районах. Основні характеристики палив наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Характеристики палив

Параметр	RME180	DMA	FAME B30
В'язкість за 50 °C, cSt	184	12,8	36,3
Густина за 15 °C, кг/м ³	928	896	914
Вміст сірки, %	0,48	0,082	0,018
Температура спалаху, °C	73	67	71
Теплотворна здатність, кДж/кг	40480	43420	36890

Відповідно до попередніх досліджень та випробувань, на судні була реалізована технологія, яка дозволяє застосовувати біодизельне паливо. Як таке використовувалось паливо B30 класу FAME (таблиця 5.2). Це дозволяло як для головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo, також і для допоміжних дизелів 6EY18ALW Yanmar використовувати паливні суміші, основним компонентом яких було паливо нафтового походження (RME180 або DMA), як добавка – паливо біологічного походження FAME B30. Вміст біопалива FAME B30 в паливній суміші змінювався в діапазоні 5...20 % від загального об'єму.

Паливо FAME B30 відноситься до одного з найбільш поширених типів біопалива, бункерування яким можливо в багатьох морських портах Європи.

Принципова схема паливної системи, яка дозволяла використовувати судові моторні палива DMA та RME180, а також біодизельне паливо FAME B30, наведена на рис. 5.1.

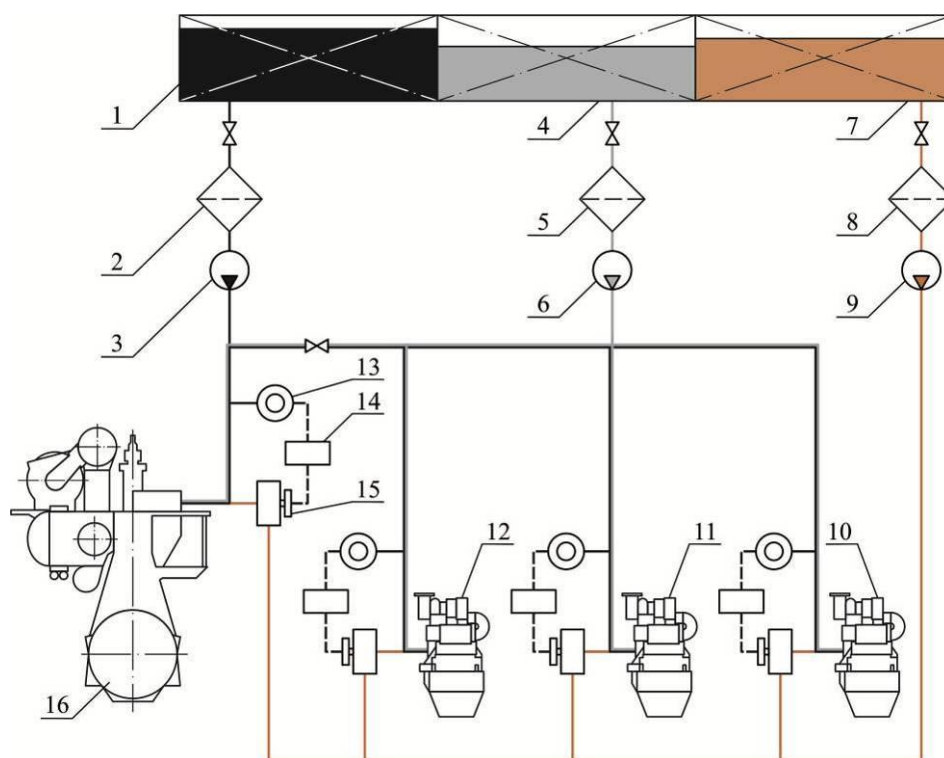


Рис. 5.1. Принципова схема паливної системи:

1 – RME180 паливний танк; 2, 5, 8 – паливний фільтр; 3, 6, 9 – паливний насос; 4 – DMA паливний танк; 7 – FAME B30 паливний танк; 10 – допоміжний двигун №3; 11 – допоміжний двигун №2; 12 – допоміжний двигун №1; 13 – витратомір; 14 – мікроконтролер; 15 – дозатор; 16 – головний двигун

Робота головного двигуна 16 та допоміжних двигунів 10, 11, 12 була можлива на паливі DMA (під час знаходження судна в SECA) та на паливі RME180 (під час знаходження судна поза SECA). Крім того, дизелі могли працювати на суміші нафтового палива DMA, RME180 та біодизельного палива FAME B30. Вміст біодизельного палива FAME B30 в його суміші з паливом DMA або RME180 становив 15 %. Це значення було визначено як найбільш раціональне під час серії попередніх досліджень, проведених на судах різного призначення, на різних дизелях та за умови використання різних сортів палива [57, 138, 182].

Подача палива до двигунів здійснювалася паливним насосом 3 (з RME180 паливного танка), паливним насосом 6 (з DMA паливного танка), паливним насосом 9 (з FAME B30 паливного танка). Очищення палива забезпечувалося у фільтрах 2, 5, 8. Необхідна концентрація біодизельного

палива FAME B30 в його суміші з паливом DMA або RME180 забезпечувалася дозатором 15 залежно від показів витратоміра 13 та контролювалася мікроконтролером 14.

Як контрольні показники, за якими оцінювались експлуатаційні показники суднових дизелів, обирались максимальний тиск згоряння p_z , питома ефективна витрата палива b_e та концентрація оксидів азоту у випускних газах NO_x . Їх визначення виконувалось за допомогою судової системи моніторингу та діагностування [199, 200]. Вибір саме цих показників ґрунтувався наступним чином. Максимальний тиск згоряння характеризує енергетичну ефективність робочого циклу дизеля, з його збільшенням підвищуються всі основні показники роботи дизеля, насамперед середній індикаторний тиск та індикаторна / ефективна потужність. Максимальний тиск згоряння є обов'язковим показником, який контролюється під час експлуатації дизеля, при цьому також обов'язково ця величина визначається для кожного окремого циліндра, середня для всіх циліндрів дизеля, а також відхилення цього значення для окремих циліндрів від середнього. Це відхилення не повинно перевищувати $\pm 3,5 \%$. Питома ефективна витрата палива характеризує паливну економічність роботи дизеля та характеризує економічну доцільність вибору тих чи інших параметрів паливоподачі. Також питома витрата палива прямо-пропорційно пов'язана з загальною витратою палива (годинною або добовою) та впливає на судові запаси палива, показник, що є актуальним саме для суден морського транспорту, які здійснюють довготривалі морські або океанські переходи без можливості бункерування. Концентрація оксидів азоту у випускних газах є основним показником, що характеризує екологічні показники роботи суднових дизелів. Її значення регламентується відповідно вимог Додатку VI МАРПОЛ та залежить від швидкісного режиму роботи дизеля та року побудови судна.

Дослідження виконувались під час експлуатації дизелів 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar на суміші, яку складали паливо RME180 та біопаливо FAME B30 (з концентрацією 15 %), а також паливо

DMA та біопаливо FAME B30. Під час досліджень кут випередження подачі палива для суднового дизеля 6EY18ALW Yanmar змінювався в діапазоні -18...-6 °повороту колінчатого валу (пкв), для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo – в діапазоні -7...-1 °пкв. Саме цей діапазон рекомендований фірмами виробниками під час експлуатації дизелів, при цьому як найбільш раціональний для дизеля 6EY18ALW Yanmar рекомендований кут -14 °пкв, для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo – кут -4 °пкв. Саме з такими кутами випередження впорскування експлуатувались дизелі під час використання палива без додавання до його об'єму палива біологічного походження, саме ці кути були обрані як «базові» під час випробувань з використанням паливних сумішей. Дослідження виконувались для наступних експлуатаційних режимів роботи дизеля 6EY18ALW Yanmar – $0,4N_{\text{еном}}$, $0,55N_{\text{еном}}$, $0,7N_{\text{еном}}$, $0,85N_{\text{еном}}$ та $0,6N_{\text{еном}}$, $0,7N_{\text{еном}}$, $0,8N_{\text{еном}}$, $0,9N_{\text{еном}}$ для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo (де $N_{\text{еном}}$ – номінальне навантаження відповідного дизеля) [196].

Результати досліджень наведені в таблицях 5.3, 5.4.

Величини максимального тиску згоряння та питомої ефективної витрати палива під час використання суміші, що складалась з палива RME180 та біопалива FAME B30 та суміші, що складалась з DMA та біопалива FAME B30 за однакових навантажень на дизелі характеризувались збігом значень та їх відхилення одно від одного знаходились у межах похибки експерименту. Саме тому для цих показників (а саме максимального тиску згоряння p_z , МПа, та питомої ефективної витрати палива b_e , г/(кВт·год)). У таблицях 5.3, 5.4 наведені загальні значення цих показників. Значення концентрації оксидів азоту у випускних газах під час використання різних сумішей відрізнялись одні від інших, тому в таблицях 5.3, 5.4 ці значення наведені окремо для кожного випадку (а саме під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30, а також під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30) [201, 202].

Таблиця 5.3

Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 6EY18ALW

Уаптаг за різних кутів випередження подачі паливної суміші,

до складу якої входить паливо біологічного походження

		Кут випередження подачі палива, ϕ , °пкв						
Експлуатаційний показник	Навантаження на дизель	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	$0,4N_{\text{еном}}$	10,12	10,27	10,23	10,22	10,03	9,82	9,63
	$0,55N_{\text{еном}}$	13,72	13,98	13,97	13,83	13,77	13,55	13,38
	$0,7N_{\text{еном}}$	15,75	15,82	15,73	15,72	15,51	15,44	15,32
	$0,85N_{\text{еном}}$	16,03	16,24	16,21	16,15	16,12	15,95	15,78
Питома ефективна витрата палива, b_e , г/(кВт·год)	$0,4N_{\text{еном}}$	201,3	197,3	192,2	188,6	187,3	183,2	196,5
	$0,55N_{\text{еном}}$	197,6	195,3	190,2	186,2	184,8	184,5	193,7
	$0,7N_{\text{еном}}$	193,4	190,7	187,3	184,1	183,3	182,9	188,3
	$0,85N_{\text{еном}}$	186,7	186,3	184,6	183,6	182,7	182,4	185,2
Концентрація NO_x^1 , г/(кВт·год)	$0,4N_{\text{еном}}$	7,17	6,98	6,92	6,86	6,66	6,62	6,58
	$0,55N_{\text{еном}}$	7,38	7,28	7,17	7,12	7,05	6,95	6,81
	$0,7N_{\text{еном}}$	7,55	7,45	7,37	7,32	7,25	7,12	7,03
	$0,85N_{\text{еном}}$	7,93	7,72	7,52	7,44	7,31	7,18	7,11
Концентрація NO_x^2 , г/(кВт·год)	$0,4N_{\text{еном}}$	7,27	7,11	7,02	6,96	6,88	6,71	6,62
	$0,55N_{\text{еном}}$	7,48	7,35	7,32	7,28	7,18	7,07	6,93
	$0,7N_{\text{еном}}$	7,83	7,61	7,51	7,48	7,32	7,22	7,15
	$0,85N_{\text{еном}}$	8,04	7,76	7,71	7,54	7,35	7,28	7,16

¹ – під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30;

² – під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30

Таблиця 5.4

Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo за різних кутів випередження подачі паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження

Експлуатаційний показник	Навантаження на дизель	Кут випередження подачі палива, φ , °пкв						
		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	$0,6N_{\text{еном}}$	11,3	11,42	11,45	11,42	11,35	11,18	11,11
	$0,7N_{\text{еном}}$	12,73	12,88	12,92	12,85	12,82	12,72	12,48
	$0,8N_{\text{еном}}$	14,03	14,14	14,18	14,12	13,95	13,85	13,72
	$0,9N_{\text{еном}}$	14,62	14,74	14,75	14,7	14,55	14,38	14,28
Питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год)	$0,6N_{\text{еном}}$	185,6	183,7	182,1	178,6	177,3	177,3	182,3
	$0,7N_{\text{еном}}$	183,4	182,7	180,7	178,1	176,8	175,8	178,8
	$0,8N_{\text{еном}}$	180,7	179,6	178	177,2	175,7	174,6	177,3
	$0,9N_{\text{еном}}$	178,3	178,3	177,4	175,4	175,4	174	176,6
Концентрація NO_x^1 , г/(кВт·год)	$0,6N_{\text{еном}}$	11,82	11,64	11,48	11,38	11,22	11,05	10,86
	$0,7N_{\text{еном}}$	12,32	12,08	11,92	11,78	11,52	11,24	11,08
	$0,8N_{\text{еном}}$	12,84	12,68	12,62	12,52	12,45	12,28	11,62
	$0,9N_{\text{еном}}$	13,28	13,08	12,85	12,66	12,52	12,35	12,08
Концентрація NO_x^2 , г/(кВт·год)	$0,6N_{\text{еном}}$	12,45	12,37	12,21	11,97	11,88	11,79	11,65
	$0,7N_{\text{еном}}$	12,77	12,68	12,58	12,36	12,08	11,98	11,71
	$0,8N_{\text{еном}}$	13,28	13,05	12,88	12,72	12,54	12,34	12,21
	$0,9N_{\text{еном}}$	13,65	13,54	13,11	12,81	12,73	12,54	12,28

¹ – під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30;

² – під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30

Під час проведення досліджень контролювались та підтримувались у необхідному діапазоні також усі основні параметри роботи головного та допоміжних дизелів, а також параметри в системах, що забезпечують їх функціонування. До них були віднесені тиск у циліндрі наприкінці стиснення, температура випускних газів, середній індикаторний тиск, а також відхилення цих показників від середнього значення по всіх циліндрах; частота обертання вала дизеля; фази газорозподілу (кути відкриття та

закриття продувних та випускних клапанів); тиск та температура охолоджуючої води та циркуляційного мастила на вході та виході з дизелів,

Візуалізація значень, що наведені в таблицях 5.3, 5.4 виконана у вигляді рис. 5.2, 5.3. В зв'язку з односпрямованим перебігом процесів та сумірними значеннями результатів, на рис. 5.2, 5.3 наведені лише дані, що відповідають максимальному навантаженню на дизелі, а саме $0,85N_{\text{еном}}$ для дизеля 6EY18ALW Yanmar та $0,9N_{\text{еном}}$ для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo.

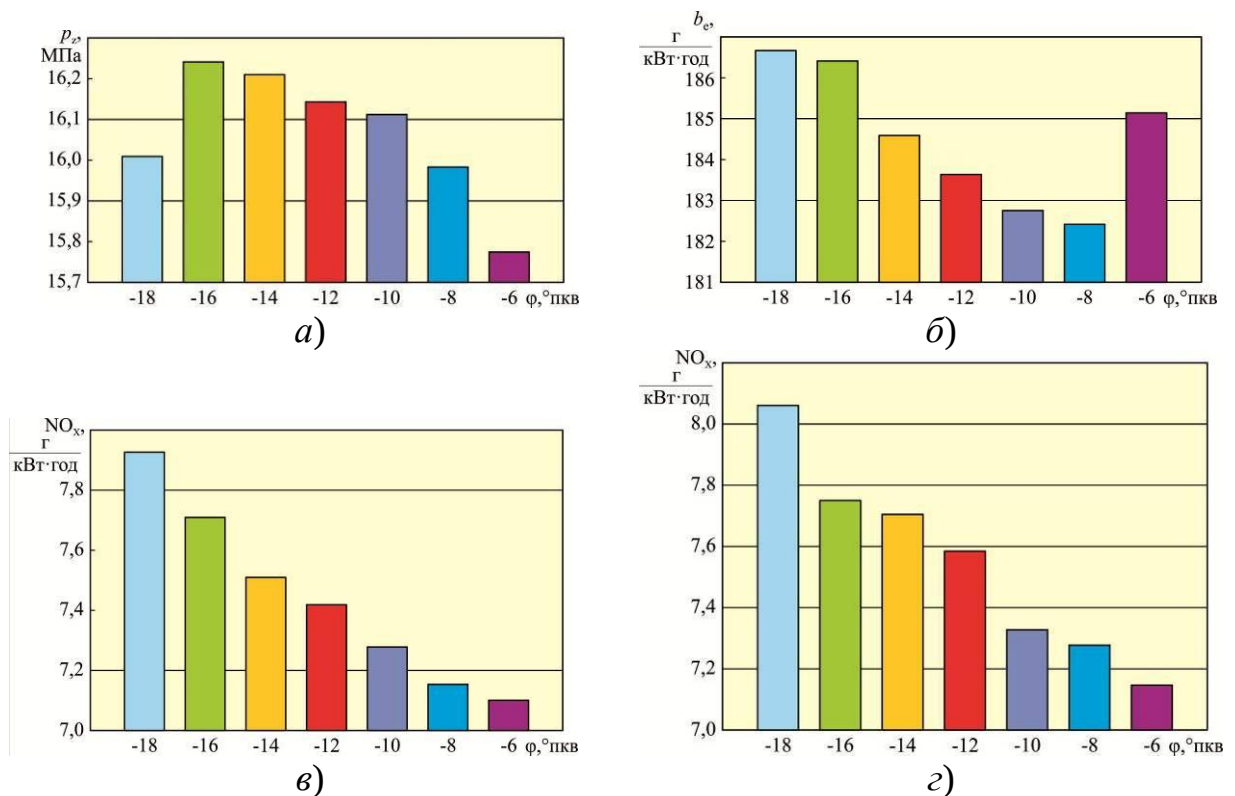


Рис. 5.2. Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 6EY18ALW

Yanmar за різних кутів випередження подачі паливної, суміші до складу якої входить паливо біологічного походження (під час навантаження $0,85N_{\text{еном}}$):

a – максимальний тиск згоряння p_z , МПа; b – питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год); v – концентрація оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год) (під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30); z – концентрація оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год) (під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30)

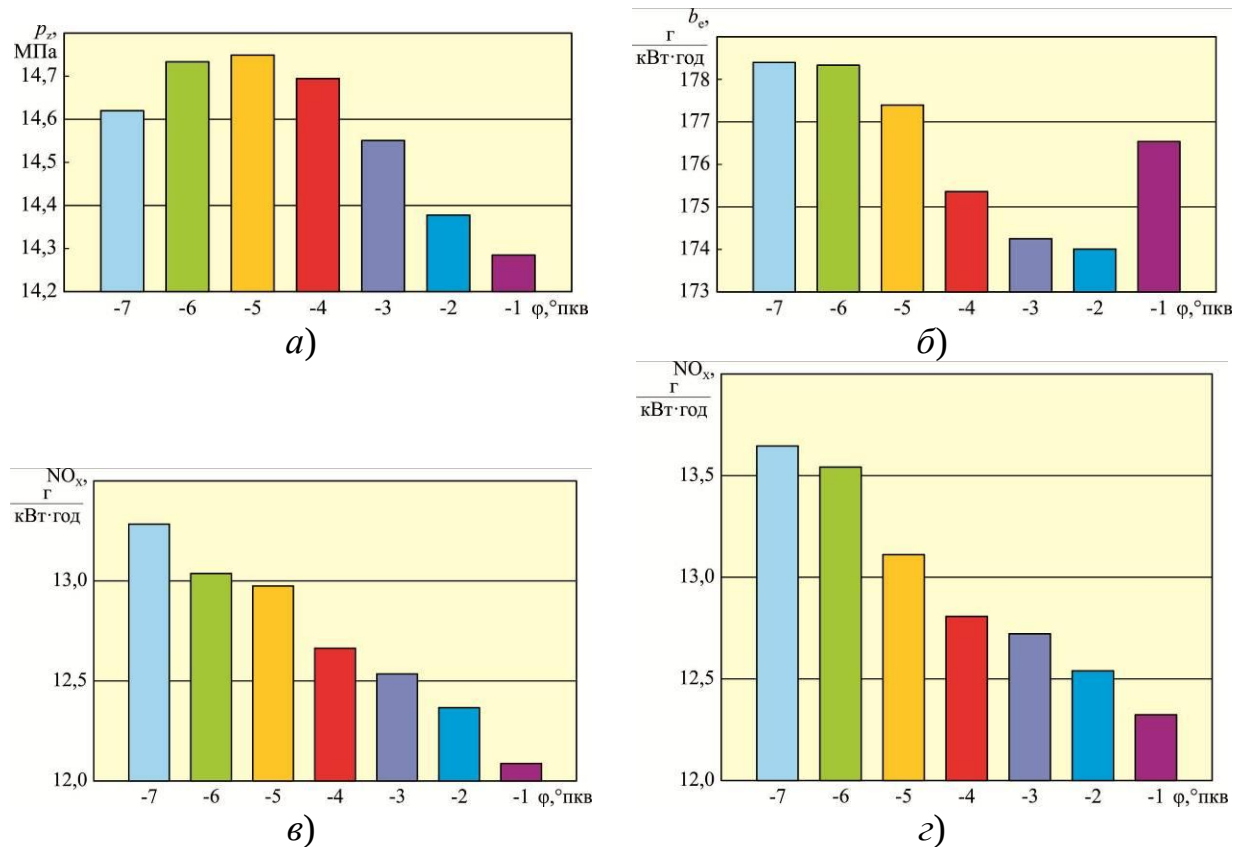


Рис. 5.3. Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo за різних кутів випередження подачі паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження (під час навантаження $0,9N_{\text{еном}}$):

a – максимальний тиск згоряння p_z , МПа; $б$ – питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год); $в$ – концентрація оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год) (під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30); $г$ – концентрація оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год) (під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30)

Виконані на суднових дизелях 6EY18ALW Yanmar та 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo дослідження дозволили зробити наступні висновки та визначити напрямок подальших досліджень.

Під час спалювання в циліндрі дизеля паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо, змінюються (порівняно з експлуатацією дизеля лише на нафтовому паливі) процеси окислення та згоряння, що призводить до зміни

термодинаміки процесу згоряння. Це стає підставою зміни основних експлуатаційних показників дизеля.

Підвищення ефективності використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, полягає не лише у визначенні оптимального вмісту біопалива в суміші, але також у визначенні оптимальних кутів процесу подачі паливної суміші (кутів випередження впорскування палива), зміна яких необхідна у зв'язку зі зміною складу паливної суміші, що потрапляє для спалювання в циліндр дизеля. Обидва значення (вміст біопалива в паливній суміші та кут випередження впорскування) визначаються експериментальним шляхом та залежать від характеристик дизеля.

З метою підвищення ефективності використання паливних сумішей необхідно змішувати процес впорскування в бік верхньої мертвої точки, тобто знижувати кут випередження подачі палива, при цьому діапазон цієї зміни повинен відповідати рекомендаціям заводів виробників щодо можливих кутів впорскування палива.

Під час зменшення кута випередження подачі палива зменшується емісія оксидів азоту на всьому діапазоні кута впорскування, що є позитивним фактором цього процесу. Одночасно з цим за цих умов відбуваються синусоїдальні зміни максимального тиску згоряння, при цьому зі зменшенням кута випередження зменшується тиск згоряння, що відноситься до негативного фактора. Під час зменшення кута випередження подачі палива здійснюється зменшення питомої витрати палива, але за умови досягнення критичних значень кута випередження спостерігається зростання витрати палива.

Визначення оптимальних кутів випередження палива досягається експериментальним шляхом та сприяє забезпеченню експлуатаційних показників роботи судових дизелів.

5.1.2. Експериментальні дослідження під час експлуатації морського спеціалізованого судна дедвейтом 14745 тонн

З метою підтвердження можливості керування експлуатаційними показниками дизелів морських засобів транспорту під час використання палива біологічного походження, експериментальні дослідження були поширені на суднові дизелі 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries, які входили до складу допоміжної енергетичної установки спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн [203]. Принципова схема паливної системи, що дозволяла використовувати паливо біологічного походження наведена на рис. 4.7. Дані щодо зміни експлуатаційних показників дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, наведені в таблицях 4.8-4.12. При цьому до позитивних змін відноситься зменшення емісії оксидів азоту NO_x та вуглецю CO_2 (відповідно в діапазоні 1,35...18,45 % та 2,25...24,75 % залежно від навантаження на дизель), до негативних: збільшення питомої витрати палива b_e – на 0,52...8,17 %, зменшення максимального тиску згоряння p_z – на 0,62...7,37 %, збільшення температури випускних газів $t_{\text{вг}}$ – на 11...15 °С. Негативні зміни (збільшення b_e та $t_{\text{вг}}$, а також зменшення p_z) пов'язані з збільшенням кута самозаймання палива під час використання паливної суміші, до складу якої входить біодизельне паливо. При цьому процес згоряння зсувається на лінію розширення, про це свідчить саме підвищення температури випускних газів [204].

Попередження цього явища можливе за рахунок експериментального визначення оптимальних фаз паливоподачі, а саме – зміни кута випередження впорскування $\phi_{\text{вв}}$ паливної суміші, що містить моторне паливо та біопаливо. Тому продовження досліджень, результати яких надані в п. 4.2.3., виконувались для паливних сумішей, до складу яких входять: паливо RMA+10 % біопалива та паливо RMA+15 % біопалива, використання яких

(відповідно до попередніх досліджень, результати яких наведені в таблицях 4.8-4.12) забезпечує максимальне зниження емісії NO_x та CO_2 та мінімальне підвищення питомої витрати палива b_e . Протягом цієї частини експерименту дизель № 2 (рис. 4.7) експлуатувався на суміші RMA+10 % біопалива, дизель № 3 – на суміші RMA+15 % біопалива. Дизелі забезпечували потужністю постійні групи споживачів та експлуатувались на однакових навантаженнях та однаковий час.

Зміна кута випередження впорскування $\varphi_{\text{вв}}$ забезпечувалась електронною системою управління (якою обладнаний дизель 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries) у діапазоні $\varphi_{\text{вв}} = -20 \dots -10^\circ$ повороту колінчатого валу. Цей діапазон рекомендований фірмою Hyundai Heavy Industries та визначений в інструкції з експлуатації дизеля 6Н17/28. Попередній цикл досліджування (результати якого наведені в таблицях 4.8-4.12) виконувався для кута випередження впорскування палива $\varphi_{\text{вв}} = -14^\circ$ пкв.

Під час проведення досліджень контролювалось значення максимального тиску згоряння p_z , температури випускних газів $t_{\text{вг}}$ та емісії оксидів азоту NO_x . Їх визначення забезпечувалось судновою системою контролю робочого циклу дизеля фірми Nordic-Control для кожного з циліндрів дизеля та далі усереднювалось з контролем відхилення значень за кожним з циліндрів від середнього. Аналогічно з попередниці дослідженнями точка виміру емісію оксидів азоту з випускними газами знаходилась в газовипускній трубі на відстані, що перевищує 10 м від вихідній частини турбонагнітача. Випробування здійснювались в діапазоні навантажень дизеля, що відповідали $(0,3 \dots 0,8) N_{\text{еном}}$.

Зміна показників p_z , $t_{\text{вг}}$ та NO_x залежно від кута випередження впорскування $\varphi_{\text{вв}}$ паливної суміші різного складу для різних режимів роботи дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries надана в таблицях 5.5-5.7 [203].

Таблиця 5.5

Максимальний тиск згоряння, МПа, в циліндрі дизеля під час використання паливної суміші різного складу та різних кутів випередження впорскування

Режим роботи	Кут випередження впорскування				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
$0,3N_{\text{еном}}$	9,4	9,5	9,3	9,2	9,2
$0,4N_{\text{еном}}$	10,1	10,2	10,0	9,9	9,8
$0,5N_{\text{еном}}$	11,1	11,2	11,0	10,8	10,7
$0,6N_{\text{еном}}$	12,4	12,7	12,5	12,4	12,2
$0,7N_{\text{еном}}$	14,0	14,2	14,0	13,8	13,6
$0,8N_{\text{еном}}$	15,9	16,1	15,8	15,6	15,5
	RMA+15 % біопалива FAME				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{\text{еном}}$	9,2	9,2	9,1	8,9	8,7
$0,4N_{\text{еном}}$	10,2	10,0	9,9	9,7	9,6
$0,5N_{\text{еном}}$	11,3	11,0	10,8	10,6	10,4
$0,6N_{\text{еном}}$	12,4	12,3	12,3	12,1	13,8
$0,7N_{\text{еном}}$	14,3	14,0	13,8	13,6	13,4
$0,8N_{\text{еном}}$	15,9	16,0	15,7	15,5	15,3

Таблиця 5.6

Температура випускних газів, °С, під час використання паливної суміші різного складу та різних кутів випередження впорскування

Режим роботи	Кут випередження впорскування				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
$0,3N_{\text{еном}}$	265	267	269	269	272
$0,4N_{\text{еном}}$	273	275	278	281	284
$0,5N_{\text{еном}}$	285	285	287	291	295
$0,6N_{\text{еном}}$	297	300	302	303	307
$0,7N_{\text{еном}}$	292	295	298	302	307
$0,8N_{\text{еном}}$	288	290	293	296	301
	RMA+15 % біопалива FAME				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{\text{еном}}$	270	272	273	275	279
$0,4N_{\text{еном}}$	277	281	283	286	291
$0,5N_{\text{еном}}$	284	288	291	295	299
$0,6N_{\text{еном}}$	299	303	306	308	309
$0,7N_{\text{еном}}$	293	296	299	302	304
$0,8N_{\text{еном}}$	288	292	296	296	299

Таблиця 5.7

Емісія оксидів азоту, г/(кВт·год), під час використання паливної суміші
різного складу та різних кутів випередження впорскування

Режим роботи	Кут випередження впорскування				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
$0,3N_{\text{еном}}$	7,12	6,80	6,62	6,48	6,18
$0,4N_{\text{еном}}$	7,28	6,96	6,68	6,58	6,27
$0,5N_{\text{еном}}$	7,41	7,12	6,78	6,63	6,34
$0,6N_{\text{еном}}$	7,52	7,28	6,82	6,72	6,46
$0,7N_{\text{еном}}$	7,61	7,33	6,88	6,77	6,56
$0,8N_{\text{еном}}$	7,67	7,40	7,14	6,80	6,61
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{\text{еном}}$	6,63	6,60	6,19	6,15	5,93
$0,4N_{\text{еном}}$	6,81	6,71	6,29	6,26	6,08
$0,5N_{\text{еном}}$	6,94	6,79	6,41	6,32	6,16
$0,6N_{\text{еном}}$	7,09	6,88	6,52	6,39	6,25
$0,7N_{\text{еном}}$	7,19	6,93	6,54	6,48	6,33
$0,8N_{\text{еном}}$	7,27	7,00	6,65	6,52	6,41

Для кращої візуалізації, результати, що надані в таблицях 5.5-5.7, відображені у вигляді діаграм (рис. 5.4-5.6).

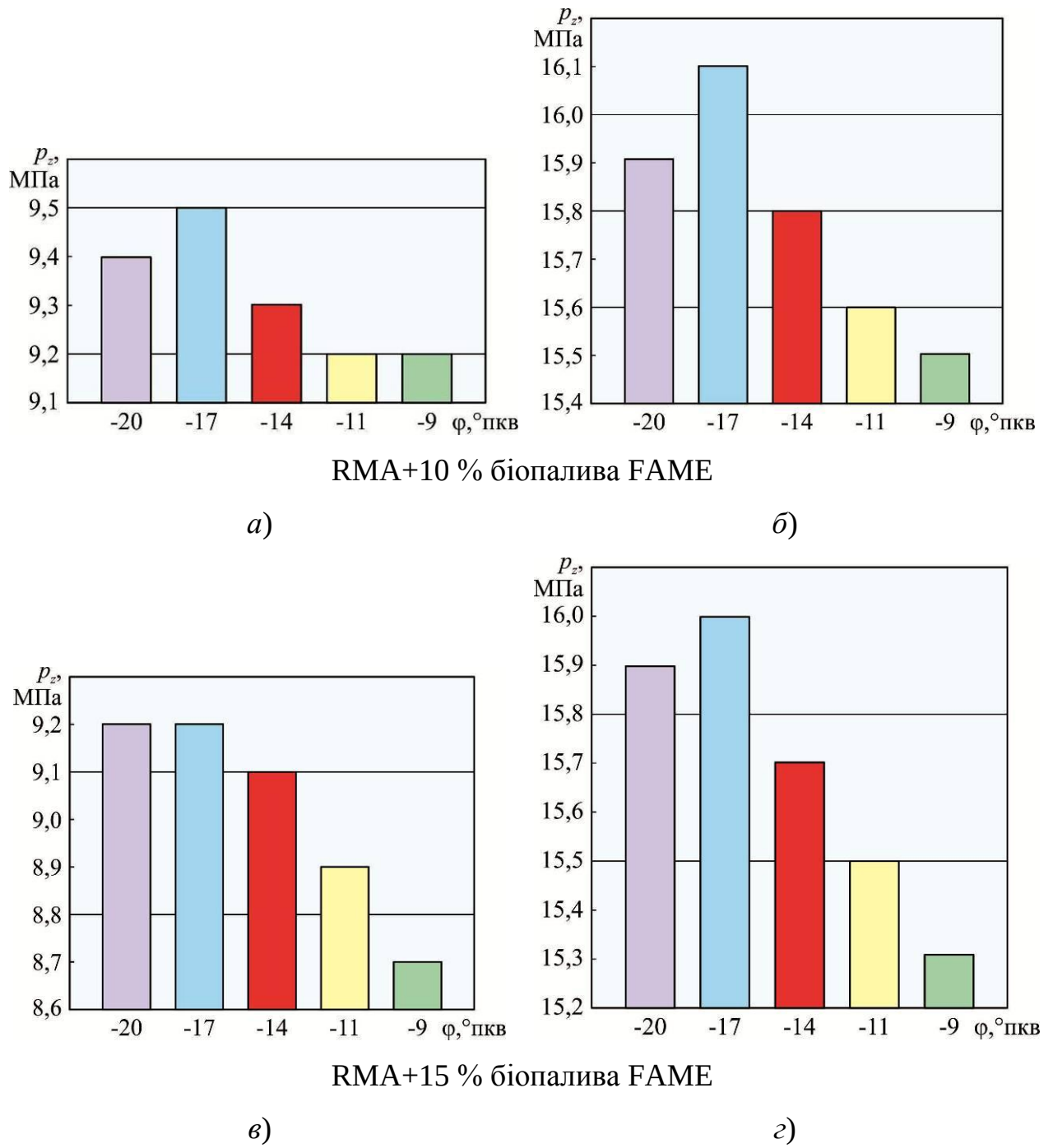


Рис. 5.4. Зміна максимального тиску згоряння для різних кутів випередження впорскування, різного складу паливної суміші та різних умов експлуатації дизеля 6Н17/28:

$a, в - 0,3N_{\text{ном}}$; $б, г - 0,8N_{\text{ном}}$

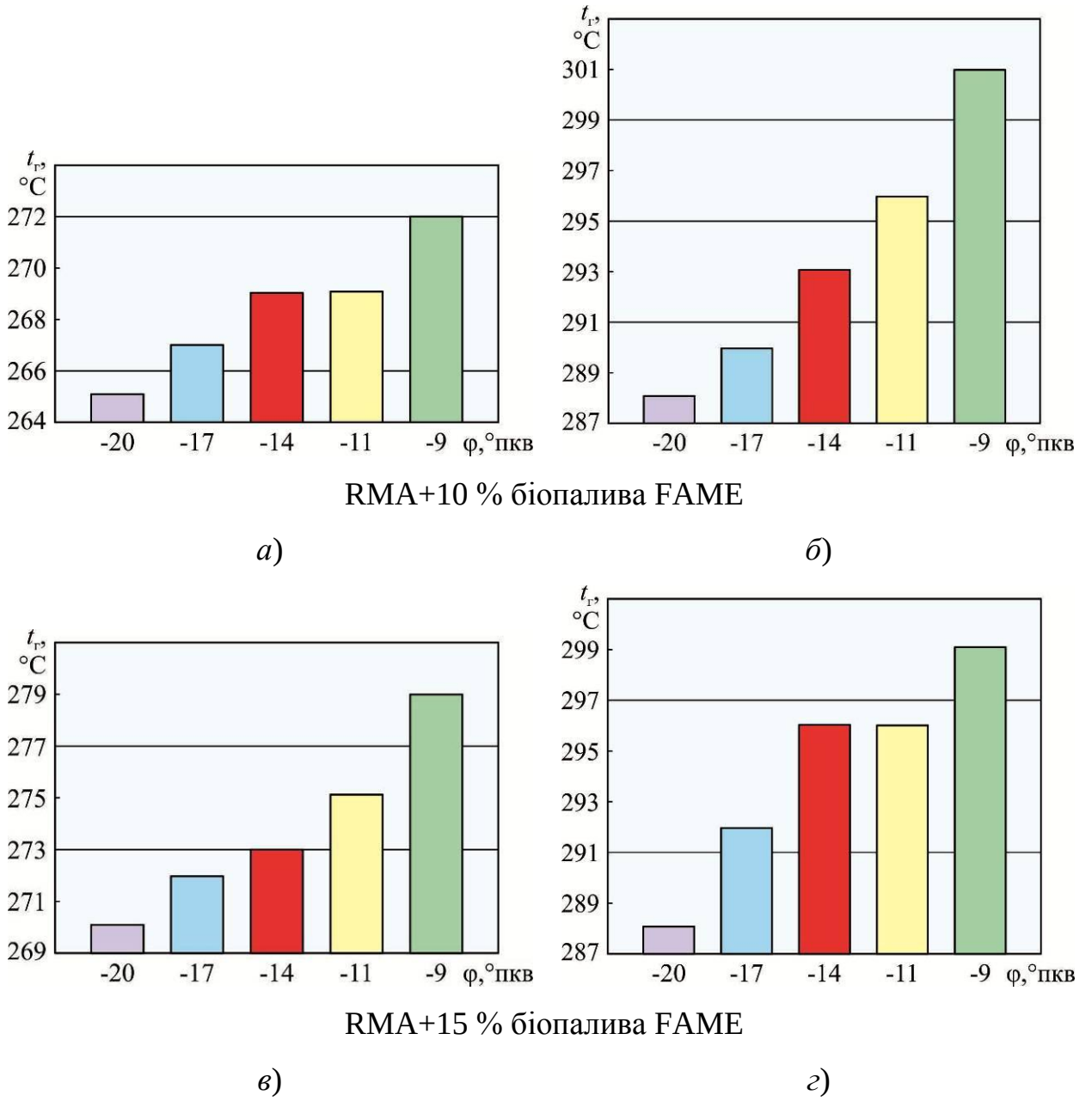


Рис. 5.5. Зміна температури випускних газів для різних кутів випередження впорскування, різного складу паливної суміші та різних умов експлуатації дизеля 6Н17/28:

$a, в - 0,3N_{\text{енорм}}; б, г - 0,8N_{\text{енорм}}$

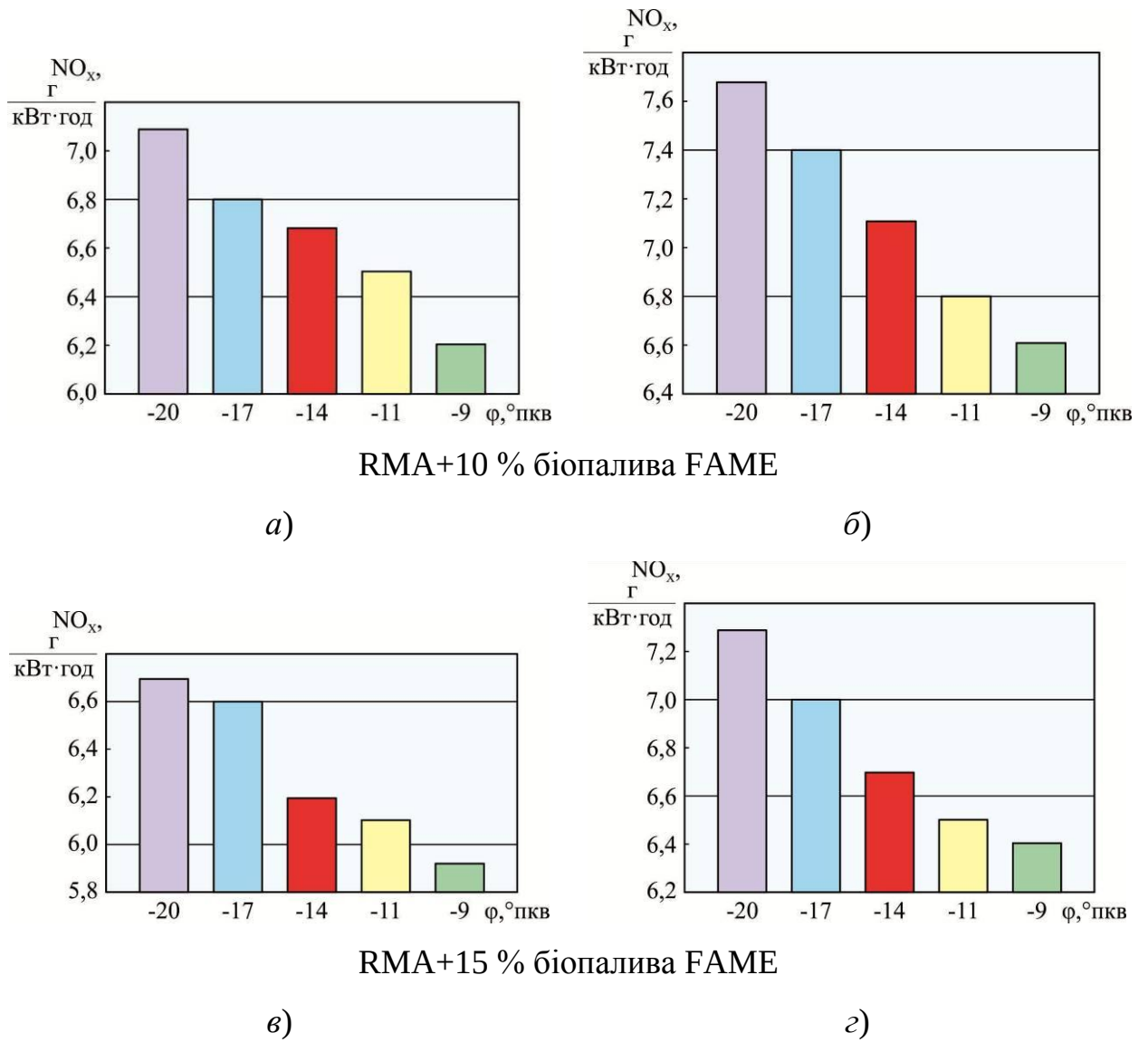


Рис. 5.6. Зміна емісії оксидів азоту для різних кутів випередження впорскування, різного складу паливної суміші та різних умов експлуатації дизеля 6Н17/28:

$a, в - 0,3N_{еном}$; $б, г - 0,8N_{еном}$

5.2. Управління екологічною безпекою суден морського транспорту шляхом використання палива біологічного походження

Використання палива біологічного походження є одним із методів забезпечення екологічної безпеки суден морського та внутрішнього водного транспорту [7, 43, 67]. Вміст сірки у цих сортах палива не перевищує 0,03 % за масою (що суттєво знижує викиди оксидів сірки). Вартість біопалива менша за вартість палива класу Marine Gas Oil із вмістом сірки 0,1 %. При цьому в багатьох портах вже існує можливість бункерування біопаливом, що розширює перспективи його застосування як у складі паливних сумішей з паливом нафтового походження, так і як самостійне паливо. У зв'язку з цим, доцільно оцінити можливість використання біопалива в судових дизелях, а також порівняти його ефективність його застосування з іншими методами, що забезпечують підтримку екологічної безпеки навігаційних переходів морських суден. При цьому необхідно встановити вплив біопалива на емісію оксидів сірки із випускними газами судових дизелів. З практичної точки зору це дасть можливість рекомендувати використовувати паливні суміші, які містять біопаливо, як один із методів управління екологічною безпекою суден морського транспорту. Викиди SO_x регламентуються масовим вмістом сірки у судовому паливі. З 01.01.2020 р. відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки у паливі не повинен перевищувати 0,1 % за умови експлуатації судна в зонах спеціального екологічного контролю (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) та не більше 0,5 % під час експлуатації судна поза районами SECAs. Спеціальні зони SECAs визначені Міжнародною морською організацією (ІМО) та показані на рис. 5.7. Для країн Європи до них належать акваторії Північного та Балтійського морів, а також порти Середземномор'я [56].

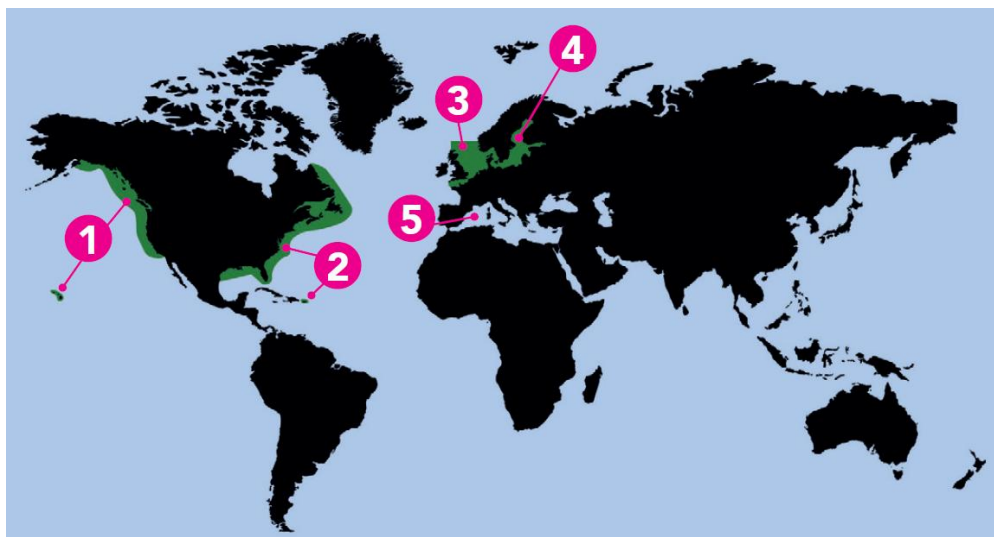


Рис. 5.7. Райони SECAs відповідно до вимог ІМО:

1 – The North American SECA, включаючи most of US, Canadian coast and Hawaii; 2 – US Caribbean SECA, включаючи Puerto Rico і US Virgin Islands; 3 – The North Sea SECA, що включає The English Channel; 4 – The Baltic Sea SECA; 5 – All EU Ports

Використання палива із вмістом сірки понад 0,5 % за масою можливе лише за умови додаткового очищення випускних газів у спеціальних технічних пристроях (якими зазвичай встановлюються скрубери) [67]. У разі управління екологічною безпекою навігаційного переходу за допомогою додаткового очищення випускних газів контролюється відношення $\text{SO}_2(\text{ppm})/\text{CO}_2(\%)$ після скрубера. Ця величина не повинна перевищувати значення 4,1 SO_2/CO_2 під час знаходження судна в SECAs і значення 21 7 SO_2/CO_2 під час знаходження судна за межами SECAs.

Дослідження виконували на двох однотипних морських спеціалізованих суднах класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. В енергетичну установку судна входили дизелі 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar. Основні характеристики дизелів представлені у таблиці 5.1.

На одному із суден використовувалася скруберна система додаткового очищення випускних газів від оксидів сірки (рис. 5.8). Це дозволяло використовувати для судових дизелів паливо із вмістом сірки до 3,5 % за масою.

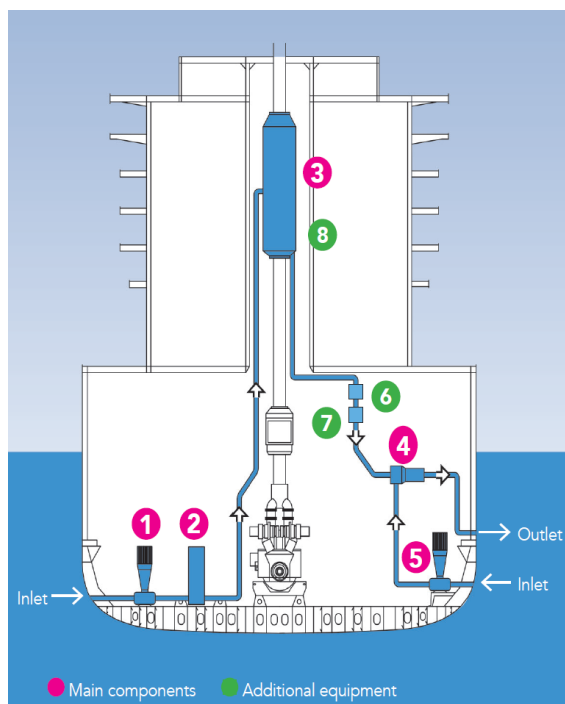


Рис. 5.8. Комплектація суднової системи очищення випускних газів:

1 – насос заборотної (морської) води; 2 – фільтр заборотної (морської) води;
3 – скруббер; 4 – змішувач; 5 – буферний насос; 6 – блок дегазації; 7 – блок
фільтрації; 8 – охолоджувач випускних газів

Очищення випускних газів виконувалося за відкритим типом. Гази від головного двигуна і трьох допоміжних двигунів (на рис. 2 не показані) надходили до скрубера 3. Для очищення газів використовувалася морська вода, яка подавалася в скруббер 3 насосом морської води 1 через фільтр 2. Продуктивність насоса 1 (залежно від вмісту сірки у паливі, потужності головного двигуна, а також кількості працюючих допоміжних двигунів) змінювалась у діапазоні 200...550 кг/год. Температура газів у скруббері 3 підтримувалася в діапазоні 200...300 °С. У разі перевищення цього значення, гази охолоджувалися за допомогою охолоджувача 8. Вода після скрубера 3 надходила до блока дегазації 6 і блок фільтрації 7, у яких виконувалося відділення від води газів і твердих домішок. Далі вода зливалася за борт. Для утримання необхідного рівня кислотності (рівень якої підтримувався в діапазоні $\text{pH}=6,8\ldots7,0$) у воду, яка зливалася за борт, змішувачем 4 додавалася забортна вода. Подача заборотної води у змішувач 4 здійснювалася

буферним насосом 5. Продуктивність буферного насоса змінювалася в діапазоні 200..300 кг/год. Робота всіх елементів системи контролювалася автоматично. Також автоматично підтримувалося необхідне відношення SO_2/CO_2 . Це забезпечувалося шляхом зміни продуктивності насоса заборотної води 1.

Система забезпечує необхідний рівень очищення випускних газів у наступному діапазоні роботи суднової енергетичної установки:

- мінімальний експлуатаційний режим – робота одного допоміжного двигуна 6EY18ALW Yanmar на будь-якому навантаженні;
- максимальний експлуатаційний режим – робота головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo на навантаженні 85 % та двох допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar на навантаженні 85 % [56].

Також система може експлуатуватися за умови 105 % навантаження головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та загального навантаження допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar 150 %. Система передбачає автоматичну реєстрацію місця знаходження судна, навантаження на головний двигун та допоміжні двигуни, параметри морської води в контурі очищення, а також поточне значення SO_2/CO_2 . Реєстрація цих даних проводиться з інтервалом 3 хв. Фрагмент таблиці з реєстрацією параметрів роботи системи наведено на рис. 5.9.

Data and Time UTC	Latitude			Longitude			Load, %				Parameters of sea water in the treatment system			Ratio SO_x/CO_2 [ppm/%]
	degrees	minutes	seconds	degrees	minutes	seconds	ME	AE No. 1	AE No. 2	AE No. 3	Flow [m ³ /h]	Temperature at Overboard Discharge [°C]	Acid number (Ph) at Overboard Discharge	
12/07/2023 09:02	58	28	78	1	29	87	78	68	0	0	171	25	6.9	2.43
12/07/2023 09:05	58	28	78	1	28	87	78	54	0	55	302	25	6.9	2.48
12/07/2023 09:08	58	28	78	1	27	87	77	55	0	55	306	25	6.9	2.45
12/07/2023 09:11	58	27	78	1	26	87	77	55	0	55	307	25	7.0	2.45

Рис. 5.9. Фрагмент таблиці з реєстрацією параметрів системи очищення випускних газів судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63 246 тонн (ME – main engine / головний двигун; AE – auxiliary engine / допоміжний двигун)

На всіх експлуатаційних режимах, а також у всіх районах плавання (всередині та поза SECAs) робота головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar відбувалася з використанням палива RMG380.

На другому судні додаткове очищення випускних газів не виконувалося. У зв'язку з цим під час експлуатації дизелів у SECAs використовувалося паливо DMA, під час експлуатації дизелів за межами SECAs використовувалося паливо RME180. На цьому судні була реалізована технологія, яка дозволяє застосовувати біодизельне паливо, як таке використовувалося паливо B30 класу FAME. Основні характеристики палив наведені у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8

Характеристики палив

Параметр	RMG380	RME180	DMA	FAME B30
В'язкість за 50 °C, сСт	329	184	12,8	36,3
Густина за 15 °C, кг/м ³	986	928	896	914
Вміст сірки, %	2,7	0,48	0,082	0,018
Температура спалаху, °C	81	73	67	71
Теплотворна здатність, кДж/кг	39070	40480	43420	36890

Принципова схема паливної системи, що дозволяла використовувати суднові моторні палива DMA та RME180, а також біодизельне паливо FAME B30 відповідає схемі, показаній на рис. 5.1.

Під час дослідження обидва судна здійснювали навігаційний перехід між портами Aughinish (Ireland) та Tallinn (Estonia) з проміжним заходом до портів Scagen (Denmark), Kalundborg (Denmark), Gdynia (Poland). Під час руху з порту Aughinish до порту Scagen судна заходили до Baltic SECA. План навігаційного переходу наведено на рис. 5.10. Характеристики навігаційного переходу наведено у таблиці 5.9.

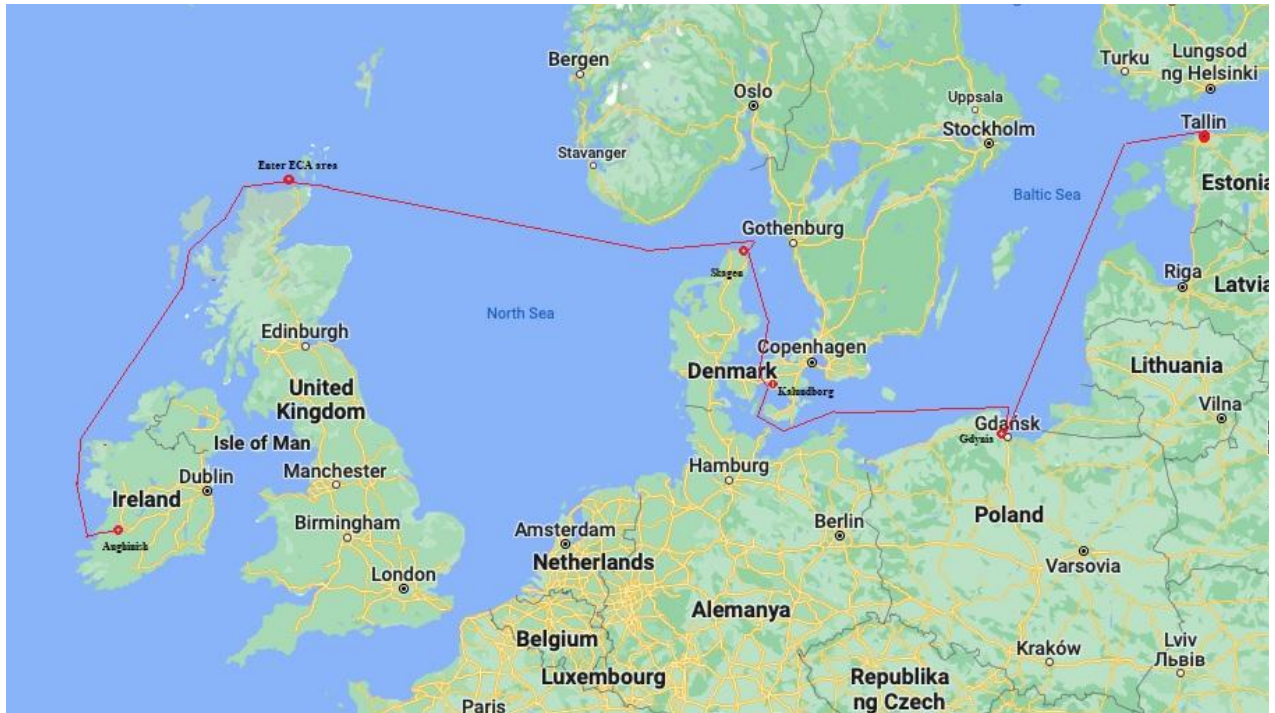


Рис. 5.10. План навігаційного переходу

Таблиця 5.8

Характеристики навігаційного переходу

Port of departure	Port of arrival	Distance, nautical miles	Time to go, hours
Aughinish (Ireland)	Enter Baltic SECA	519	47
Enter Baltic SECA	Scagen (Denmark)	508	46
Scagen (Denmark)	Kalundborg (Denmark)	155	14
Kalundborg (Denmark)	Gdynia (Poland)	397	36
Gdynia (Poland)	Tallinn (Estonia)	419	38

Під час всього навігаційного переходу обидва судна перевозили однакові вантажі та виконували однакові вантажні операції у портах розвантаження. Це забезпечувало ідентичність зовнішніх умов під час проведення експериментів та ідентичність навантажень на головний двигун суден. Також ідентичним для кожного із суден підтримувалися навантаження на допоміжні двигуни. Це забезпечувалося однаковими навантаженнями на судові споживачі енергії.

Програма автоматичного моніторингу роботи системи очищення випускних газів (фрагмент якої показано на рис. 5.9) дозволяла контролювати її основні параметри. Однак для аналізу ефективності системи очищення

випускних газів розглядалася лише зміна відношення емісії оксидів сірки до оксидів вуглецю в часі. – $\frac{SO_2}{CO_2} = f(t)$.

Результати цих досліджень (для навігаційного переходу, характеристики якого вказані в таблиці 5.8) наведено в таблиці 5.9. Значення відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ фіксувалися системою моніторингу через кожні 3 хв. Для скорочення обсягу інформації дані значення в таблиці 5.9 наведено через 5 годин (під час роботи судна поза SECA) та через 10 годин (під час роботи в SECA).

Таблиця 5.9

Моніторинг відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ під час навігаційного переходу

Робота поза SECA			Робота в SECA					
Час, години	SO ₂ /CO ₂		Час, години	SO ₂ /CO ₂		Час, години	SO ₂ /CO ₂	
	1	2		1	2		1	2
5	7,22	18,72	50	2,51	3,75	120	2,47	3,80
10	6,82	19,21	60	2,48	4,02	130	2,48	4,05
15	6,94	17,72	70	2,48	3,72	140	2,47	3,72
20	7,74	18,68	80	2,45	3,18	150	2,44	3,63
25	7,78	20,02	90	2,47	3,82	160	2,29	3,53
30	7,62	20,83	100	2,49	4,17	170	2,34	3,61
35	6,53	19,22	110	2,48	4,15	180	2,32	3,68
40	6,55	18,32	–	–		–	–	
45	6,46	18,82	–	–		–	–	

Примітка: 1 – використання системи скрубєрного очищення;

2 – використання паливної суміші з біодизельним паливом.

Для кращої візуалізації отримані значення представлені у вигляді рис. 5.11.

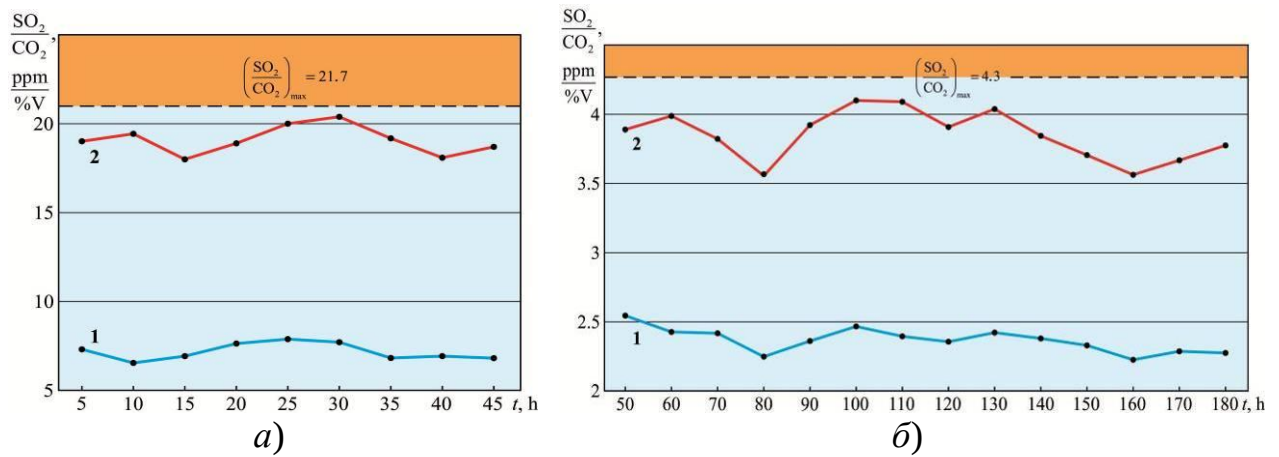


Рис. 5.11. Зміна відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ за різних способів управління екологічною

безпекою навігаційного переходу судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн:

- 1 – використання системи скрубберного очищення; 2 – використання паливної суміші з біодизельним паливом;
 а – робота поза SECA; б – робота в SECA

Ефективність методу управління екологічною безпекою можна оцінити за виразом, що характеризує екологічну стійкість судна:

$$Eco^+ = \frac{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{max} - \left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_t}{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{max}} \cdot 100\%,$$

де $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{max}$ – максимальне для умов роботи судна (в SECA або поза SECA)

значення відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$;

$\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_t$ – відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ в момент часу t .

Чим більше величина Eco^+ , тим далі від максимально допустимого значення залежність $\frac{SO_2}{CO_2} = f(t)$ – рис. 5.11, тим вище екологічна стійкість

судна та екологічна безпека навігаційного переходу. Значення екологічної стійкості щодо різних способів управління екологічною безпекою наведено у таблиці 5.10.

Таблиця 5.10

Екологічна стійкість судна під час навігаційного переходу Aughinish – Tallinn
для різних способів управління екологічною безпекою

Робота поза SECA			Робота в SECA					
Час, години	Есо ⁺ , %		Час, години	Есо ⁺ , %		Час, години	Есо ⁺ , %	
	1	2		1	2		1	2
5	66,73	15,92	50	41,63	12,79	120	42,56	11,63
10	68,57	12,96	60	42,33	6,51	130	42,33	5,81
15	68,02	22,46	70	42,33	13,49	140	42,56	13,49
20	64,33	16,17	80	43,02	26,05	150	43,26	15,58
25	64,15	8,39	90	42,56	11,17	160	46,75	17,91
30	64,88	4,18	100	42,09	3,02	170	45,58	16,05
35	69,91	12,90	110	42,33	3,49	180	46,05	14,42
40	69,82	18,46	—	—	—	—	—	—
45	70,23	15,30	—	—	—	—	—	—

Примітка: 1 – використання системи скрубберного очищення;

2 – використання паливної суміші з біодизельним паливом.

Для кращої візуалізації за результатами таблиці 5.10 побудовано номограми – рис. 5.12.

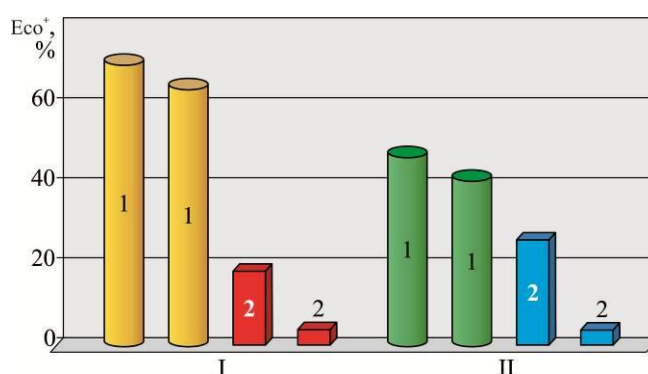


Рис. 5.12. Зміна екологічної стійкості судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн за різних способів управління екологічною безпекою:

1 – використання системи скрубберного очищення; 2 – використання паливної суміші з біодизельним паливом;

I – робота у SECA; II – робота поза SECA

Використання методів управління екологічною безпекою завжди пов'язане з підвищенням витрат енергії з їхнього забезпечення [205, 206]. У разі системи скрубберного очищення додаткові витрати енергії пов'язані з використанням насосів морської води та буферних насосів (позиції 1 та 5 на рис. 5.8). Крім того, використання скрубберного очищення на 1,0...1,5 % знижує потужність головного та допоміжних двигунів. Це з підвищенням аеродинамічного опору в газовипускній магістралі дизелів. У разі використання паливної суміші, що містить біодизельне паливо, додаткові витрати енергії пов'язані з роботою насоса біодизельного палива (позиція 9 на рис. 5.1). Для розглянутої скрубберної системи очищення випускних газів потужність необхідна для забезпечення роботи двох насосів морської води:

$$N_p^{sw} = 2 \cdot 40 = 80 \text{ кВт},$$

де 40 кВт – потужність одного насоса морської води;

потужність необхідна для забезпечення роботи двох буферних насосів:

$$N_p^{bw} = 2 \cdot 35 = 70 \text{ кВт},$$

де 35 кВт – потужність одного буферного насоса [56].

Втрата 1,0...1,5 % потужності головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo за умови його роботи на навантаженні 0,85 %:

$$N_e^{ME} = 0,85 \cdot 8050 \cdot 0,01 = 68,4 \text{ кВт},$$

$$N_e^{ME} = 0,85 \cdot 8050 \cdot 0,015 = 102,6 \text{ кВт}.$$

Втрата 1,0...1,5 % потужності допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar за умови їхньої роботи на навантаженні 0,85 %:

$$N_e^{AE} = 0,85 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 0,01 = 13,6 \text{ кВт},$$

$$N_e^{AE} = 0,85 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 0,015 = 20,4 \text{ кВт}.$$

Загальні втрати потужності у випадку використання скрубберної системи очищення випускних газів:

$$\Delta N^{sc} = N_p^{sw} + N_p^{bw} + N_e^{ME} + N_e^{AE}.$$

Залежно від втрат потужності головним двигуном 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та допоміжними двигунами 6EY18ALW Yanmar діапазон загальних втрат потужності складає:

$$\Delta N^{sc} = 237 \dots 278 \text{ кВт.}$$

Загальні втрати потужності під час використання паливної суміші, що містить біодизельне паливо, визначаються потужністю насоса біодизельного палива:

$$\Delta N^{bio} = N_p^{bf}.$$

Враховуючи характеристики паливного насоса біодизельного палива, діапазон загальних втрат потужності складає:

$$\Delta N^{bio} = 18 \dots 20 \text{ кВт.}$$

Номограму, що відображає втрати потужності під час використання різних методів управління екологічною безпекою, наведено на рис. 5.13.

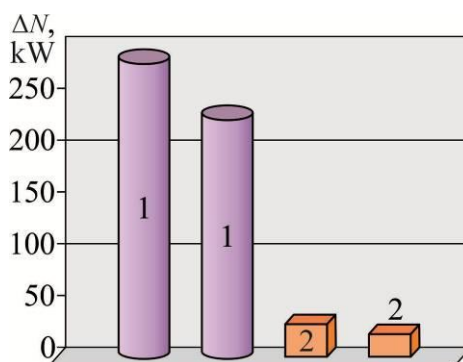


Рис. 5.13. Втрати потужності за різних способів управління екологічною безпекою судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн:

1 – використання системи скрубберного очищення; 2 – використання паливної суміші, до складу якої входить біодизельне паливо

Під час проведення досліджень контролювалися та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та

допоміжних двигунів, а також параметри в системах, які забезпечують їхнє функціонування.

Управління екологічною безпекою навігаційних переходів є одним із складових, які визначають роботу суден морського транспорту. Особливо актуальною є підтримка екологічної безпеки для районів Північної Європи, в яких створені спеціальні екологічні райони контролю викидів оксидів сірки.

Виконання міжнародних вимог щодо рівня емісії SO_x можливе шляхом додаткового очищення випускних газів, а також за рахунок використання палива з низьким вмістом сірки. У першому випадку випускні гази піддаються очищенню у спеціальних скруберах, у другому – використовується біодизельне паливо, вміст сірки в якому не перевищує 0,02 %. Ефективність використання методів управління екологічною безпекою може бути оцінена за екологічною стійкістю судна. Чим вище значення екологічної стійкості – тим від максимально можливих значень емісії SO_x перебувають поточні значення емісії SO_x . Метод використання додаткового очищення випускних газів у скруберах характеризується найвищою екологічною ефективністю. При цьому використання як методу управління екологічною безпекою біодизельного палива також забезпечує високий рівень екологічної стійкості.

До недоліків методів керування екологічною безпекою відносяться втрати потужності дизеля, які пов'язані з додатковим аеродинамічним опором у газовипускній магістралі. Також вимагає додаткових витрат енергії додаткове обладнання, яке забезпечує функціонування систем очищення газів або підготовки палива. У випадку використання скрубєрного очищення газів – це насоси морської води та буферні насоси. У разі використання біодизельного палива додаткові витрати енергії потрібні для забезпечення роботи біодизельного насоса. Крім того, необхідна додаткова комплектація паливної системи дозаторами біодизельного палива.

Економічна ефективність скрубєрного очищення випускних газів визначається можливістю використання в судових дизелях палива, вміст

сірки у яких сягає 3,5 %. Дані сорти палива (порівняно з паливом із вмістом сірки до 0,5 %) мають меншу вартість. Тому використання скрубєрного очищення випускних газів найбільш раціональне для морських суден з потужними енергетичними установками і, відповідно, підвищеною витратою палива.

Використання біодизельного палива можливе для дизелів будь-якої потужності, що виконують функції як головних, так і допоміжних двигунів. Однак методи управління екологічною безпекою характеризуються додатковими ризиками та загрозами. Для системи скрубєрного очищення випускних газів – це робота з відкритого контуру, при якому вода зі скрубєра зливається за борт без додаткового очищення. Це зобов'язує виконувати постійний моніторинг та забезпечувати постійний контроль її кислотного числа. Основним ризиком під час використання біодизельного палива є неможливість бункерування даним видом палива в деяких морських портах. При цьому виникає необхідність збільшувати кількість біодизельного палива в портах його можливого бункерування. Якщо враховувати поступове розшарування біопалива протягом часу, то це знижує надійність його зберігання та ефективність використання.

Таким чином, управління екологічною безпекою навігаційних переходів морських суден можливе за допомогою додаткового очищення випускних газів судових дизелів у скрубєрах, а також шляхом використання біодизельного палива. Однією з морських акваторій, в яких управління екологічною безпекою навігаційних переходів має найбільше значення, є спеціальні райони контролю за емісією викидів сірки – SECAs. До таких районів належать Північне та Балтійське море – Європейські морські райони підвищеної інтенсивності судноплавства, що характеризуються близькістю материкової території.

Критерієм ступеня очищення випускних газів від домішок сірки є відношення оксиду сірки до оксиду вуглецю – SO_2/CO_2 . Визначено, що для судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн:

1) використання скрубберного очищення забезпечує відношення SO_2/CO_2 :

- під час знаходження судна в SECA у діапазоні 2,29...2,51 (при максимально допустимому значенні 4,3);

- під час знаходження судна поза SECA у діапазоні 6,46...7,78 (при максимально допустимому значенні 21,7);

2) використання паливної суміші, до складу якої входить біодизельне паливо забезпечує відношення SO_2/CO_2 :

- під час знаходження судна в SECA у діапазоні 3,18...4,17;

- під час знаходження судна поза SECA у діапазоні 17,72...20,83;

3) екологічна стійкість судна:

- під час використання скрубберного очищення:

 під час знаходження судна в SECA в діапазоні 41,63...46,75 %;

 під час знаходження судна поза SECA в діапазоні 64,15...70,23 %;

- під час використання паливної суміші, до складу якої входить біодизельне паливо:

 під час знаходження судна у SECA у діапазоні 3,02...26,05 %;

 під час знаходження судна поза SECA у діапазоні 4,18...22,46 %;

4) використання методів управління екологічною безпекою підвищує витрати енергії на забезпечення цього процесу. Під час використання додаткового очищення в скруберах втрати потужності становлять 237...278 кВт. У разі використання паливної суміші, до складу якої входить біодизельне паливо, втрати потужності становлять 18...20 кВт;

5) використання паливної суміші, до складу якої входить біодизельне паливо, характеризується меншим рівнем екологічної стійкості. При цьому, порівняно з використанням скрубберного очищення випускних газів, цей метод вимагає менше витрат енергії, а також характеризується більш простим додатковим обладнанням. У зв'язку з цим (а також враховуючи, що при цьому забезпечуються всі вимоги Annex VI MARPOL), саме він рекомендується як основний для забезпечення екологічної безпеки навігаційних переходів суден морського транспорту.

5.3. Корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання палива біологічного походження

Одним із завдань, що потрібно розв'язувати під час використання біодизельного палива, є визначення його об'єму під час бункерування судна. При цьому потрібно враховувати термін зберігання біопалива, його витрату та можливість поповнення запасів. Конструкція суднових паливних систем не передбачає транспортування та збереження біопалива в танках запасу палива, у відстійних або витратних танках. Ці ємності спроектовані та розраховані для суднового моторного палива (дизельного, або важкого). Тому постачання біопалива під час бункерування виконується в бочкотарі об'ємом до 200 літрів. Їх збереження здійснюється на відкритих палубах судна (що неможливо для деяких типів суден) та безпосередньо в машинному відділенні судна (що суттєво зменшує кількість біопалива). Це вимагає постійного поповнення запасів біопалива, при цьому період отримання біопалива (в разі його постійного використання в суднових дизелях) менший за період отримання моторного палива. Важливим фактором під час отримання біопалив є необхідність повернення порожньої бочкотари після його використання (тобто зменшення запасів біопалива не зменшує об'єм суднових приміщень, які це паливо займає). Під час визначення необхідного об'єму біопалива необхідно також враховувати його оптимальну концентрацію в паливній суміші з нафтовим паливом. Через обмежений об'єм біопалива отримання та збереження якого можливо на борту судна, паливні суміші, до яких воно входить, використовують у суднових допоміжних дизелях, які (порівняно з головними, через меншу потужність мають меншу годинну / добову або рейсову витрату палива) [207].

Світовими лідерами з виробництва біопалива є Бразилія (у Південній Америці, США (у Північній Америці), Німеччина в країнах ЄС, Індонезія в Азіатському та Тихоокеанському басейні. Але при цьому не в кожному

морському порту є можливість отримання біопалива – з метою його подальшого використання в суднових дизелях. Це призводить до лише періодичного використання біопалива під час забезпечення роботи дизелів та зменшення їх екологічної стійкості [208].

Метою дослідження є корегування переходу судна класу General Cargo дедвейтом 10820 тонн між портами Бразилії та Карибського басейну з урахуванням забезпечення постійної роботи суднових допоміжних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на суміші моторного палива та біопалива (це, у свою чергу, сприятиме підвищенню екологічності роботи дизелів через зниження емісії оксидів азоту) [209]. До основних характеристик дизелів відносяться:

частота обертання колінчатого валу – $n=1000 \text{ хв}^{-1}$;

ефективна потужність на номінальному режимі роботи – $N_{\text{еном}}=490 \text{ кВт}$;

питома ефективна витрата палива в діапазоні експлуатаційних навантажень $(0,6 \dots 0,95)N_{\text{еном}} - 0,194 \dots 0,186 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$;

кількість у складі суднової допоміжної в установки – 3.

Принципова схема витратної паливної системи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel з урахуванням можливості виготовлення та використання паливної суміші, до складу якої входить біопаливо та суднове моторне паливо, надана на рис. 4.10. Експлуатація дизелів виконувалась на дизельному (легкому) паливі DMA10 (з вмістом сірки 0,08 %) або на середньоважкому паливі RMB30 (із вмістом сірки 0,36 %), характеристики яких забезпечували якісне утворення їх сумішей з біопаливом. Як біопаливо використовувалось паливо B99.9 FAME.

Перехід здійснювався за маршрутом Сан-Паулу (Бразилія) – Ріо-де-Жанейро (Бразилія) – Салвадор (Бразилія) – Форталеза (Бразилія) – Порт Спейн (Тринідад та Тобаго) – Пуерто Кабело (Венесуела) – Кінгстон (Ямайка) – Гавана (Куба). Зворотній перехід Гавана – Сан-Паулу виконувався в баласті. Навігаційний перехід судна наведено на рис. 5.14.



Рис. 5.14. Навігаційний перехід Сан-Паулу – Гавана – Сан-Паулу

Під час переходу загальне навантаження на суднові допоміжні дизелі 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel змінювалось в діапазоні 350...750 кВт, але для розрахунків приймалось середньозважене навантаження, яке розраховувалось у такий спосіб:

$$\overline{N_e^x} = 0,65 N_{\text{еном}} n_{\text{дд}}^x; \quad (5.1)$$

де 0,65 – прийнятий середньозважений коефіцієнт навантаження під час роботи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на переході (який у тому числі враховує втрати під час перетворення теплотворної здатності палива на корисну енергію);

$n_{\text{дд}}^x$ – кількість допоміжних дизелів, що забезпечували енергетичні потреби судна під час переходу (для ходового режиму роботи приймалось $n_{\text{дд}}^x = 2$).

Тоді: $\overline{N_e^x} = 0,65 \cdot 490 \cdot 2 = 637$ кВт.

Витрата біопалива під час переходу:

$$B_{\text{БП}}^x = \overline{N_e^x} b_e^x C_{\text{БП}} T_i^x, \quad (5.2)$$

де b_e^x – питома ефективна витрата палива на ходовому режимі, що відповідає обраному навантаженню, кг/(кВт·год);

$C_{\text{БП}}$ – концентрація біопалива в паливній суміші з нафтовим паливом;

T_i^x – час переходу судна між портами, год.

Під час стоянки з вантажними операціями загальне навантаження на суднові допоміжні дизелі 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel змінювалось у діапазоні 850...1200 кВт, але для розрахунків приймалось середньозважене навантаження,

$$\overline{N_e^c} = 0,75 N_{\text{еном}} n_{\text{дд}}^c; \quad (5.3)$$

де 0,75 – прийнятий середньозважений коефіцієнт навантаження під час роботи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на стоянці з вантажними операціями;

$n_{\text{дд}}^c$ – кількість допоміжних дизелів, що забезпечували енергетичні потреби судна під час стоянки з вантажними операціями (приймалось $n_{\text{дд}}^c = 3$).

Тоді: $\overline{N_e^x} = 0,75 \cdot 490 \cdot 3 = 1103$ кВт.

Витрата біопалива під час стоянки з вантажними операціями:

$$B_{\text{БП}}^c = \overline{N_e^c} b_e^c C_{\text{БП}} T_i^c; \quad (5.4)$$

де b_e^c – питома ефективна витрата палива під час стоянки з вантажними операціями, що відповідає обраному навантаженню, кг/(кВт·год);

T_i^c – час стоянки з вантажними операціями, год.

Для ходового режиму роботи з урахуванням середньозваженого коефіцієнту навантаження значення питомої ефективної витрати палива приймалось $b_e^x = 0,192$ кг/(кВт·год). Для режиму стоянки з вантажними операціями цей показник приймався $b_e^c = 0,188$ кг/(кВт·год). Визначення цих показників виконувалось експериментально, шляхом вимірювання витрати

палива та часу роботи дизелів на обраних режимах. Похибка у вимірюваннях не перевищувала 1,5 %. Вказані значення збігаються з показниками, що визначені в інструкції з експлуатації дизелів.

Сумарна витрата біопалива, яка необхідна для забезпечення роботи судових допоміжних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel за час переходу між портами та під час стоянки в одному з портів з вантажними операціями

$$\Sigma B_{\text{БП}} = B_{\text{БП}}^x + B_{\text{БП}}^c. \quad (5.5)$$

Розрахунок значень витрати біопалива для різних морських переходів та різних умов експлуатації, відповідно до рівнянь (5.2), (5.4), (5.5), а також значення відстані між портами та часу переходу між ними та часу стоянки в портах надані у таблиці 5.11.

Таблиця 5.11

Розрахунок витрати біопалива для різних умов навігаційного переходу

Морський перехід	Відстань між портами, морські милі	Час переходу, год	Середньозважена потужність дизелів під час переходу, кВт	Витрата біопалива під час переходу, кг/год	Час стоянки, год	Середньозважена потужність дизелів під час стоянки, кВт	Витрата біопалива під час стоянки, кг/год	Сумарна витрата біопалива, кг/год
Сан-Паулу – Ріо-де-Жанейро	210	21	637	385	12	1103	373	758
Ріо-де-Жанейро – Салвадор	749	75	637	1376	16	1103	497	1873
Салвадор – Форталеза	798	80	637	1468	9	1103	280	1747
Форталеза – Порт Спейн	1663	166	637	3045	14	1103	435	3481
Порт Спейн – Пуерто Кабельо	392	39	637	715	11	1103	342	1057
Пуерто Кабельо – Кінгстон	690	69	637	1266	8	1103	249	1515
Кінгстон – Гавана	743	74	637	1358	18	1103	560	1917

Бункерування біопаливом під час переходів (для розглянутого району плавання) можливо лише в наступних портах: Сан-Паулу, Форталеза, Пуерто Кабельо, Гавана. З урахуванням конструкційних особливостей палубного простору, технічних приміщень та машинного відділення судна вони були здатні до розміщення 25-ти 200 літрових бочок з біопаливом. Таким чином, обсяг біопалива під час проведення бункерування не перевищував 5000 літрів. З метою забезпечення роботи судових допоміжних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на паливній суміші (яка складається з судового моторного палива та біопалива) протягом всього переходу (в тому числі для переходу Гавана – Сан-Паулу, який виконувався в баласті) та підтримання екологічних показників їх роботи, схема навігаційного переходу була корегована відповідно до таблиці 5.12.

Дані, що наведені в таблиці 5.12, свідчать про можливість забезпечення необхідних запасів біопалива на всіх ділянках навігаційного переходу. Подальше виготовлення та використання паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо, буде сприяти підвищенню екологічності роботи судових допоміжних дизелів.

Під час проведення досліджень протягом всього навігаційного переходу контролювались основні енергетичні, теплові та екологічні показники роботи судових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel, до яких було віднесено: тиски наприкінці стиснення та згоряння, індикаторна потужність, температура випускних газів, вміст оксидів азоту в випускних газах.

Їх значення не перевищувало критичних величин та відповідало вимогам, що висуваються з боку міжнародних класифікаційних товариств та фірм-виробників дизелів та їх допоміжного обладнання.

Усі показники контролювались та фіксувались за допомогою програмного забезпечення для управління активами на судах. Поточні та кінцеві показники роботи судна та його енергетичної установки оформлювались як звіти та надавались до відділу технічного менеджменту компанії.

Таблиця 5.12

Корегована схема навігаційного переходу Сан-Паулу – Гавана – Сан-Паулу

Морський перехід	Витрата біопалива під час переходу, кг/год	Витрата біопалива під час стоянки, кг/год	Характеристика переходу	Сумарна витрата біопалива між проведенням бункерування, кг/год
Сан-Паулу – Ріо-де-Жанейро	385	373	бункерування, перехід, вантажні операції	4379
Ріо-де-Жанейро – Салвадор	1376	497	перехід, вантажні операції	
Салвадор – Форталеза	1468	280	перехід, вантажні операції	
Форталеза – Порт Спейн	3045	–	бункерування, перехід	4102
Порт Спейн – Пуерто Кабельо	715	342	перехід, вантажні операції	
Пуерто Кабельо – Кінгстон	1266	249	бункерування, перехід, вантажні операції	3433
Кінгстон – Гавана	1358	560	перехід, вантажні операції	
Гавана – Кінгстон	1358	–	бункерування, перехід	2624
Кінгстон – Пуерто Кабельо	1266	–	перехід	
Пуерто Кабельо – Порт Спейн	715	435	бункерування, перехід, вантажні операції	4195
Порт Спейн – Форталеза	3045	–	перехід	
Форталеза – Салвадор	1468	–	бункерування, перехід	3229
Салвадор – Ріо-де-Жанейро	1376	–	перехід	
Ріо-де-Жанейро – Сан-Паулу	385	–	перехід	

5.4. Висновки за розділом 5

У результаті досліджень, виконаних у розділі 5, визначимо наступне.

1. Використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, змінює перебіг робочого циклу в циліндрі дизеля та процес згоряння, це пов'язане з меншою порівняно з дизельним або дистилатним паливом температурою самозаймання палива біологічного походження. Це призводить до зміни експлуатаційних показників дизелів, при цьому виникає завдання визначення фаз паливоподачі (насамперед кута випередження подачі палива), за яких зміна цих показників підвищує ефективність роботи дизеля та покращує його екологічні показники. Розв'язання цього завдання можливо шляхом корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження.

2. Більш низькі температури самозаймання палива біологічного походження порівняно з нафтовими паливами та відповідно більш низькі температури самозаймання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, збільшують динамічні навантаження в циліндрі дизеля, що виявляється в зростанні максимального тиску згоряння. Компенсація цього негативного явища можлива шляхом управління фазами подачі палива, а саме – зменшенням кута випередження впорскування палива, що призводить до зсуву процесу згоряння в бік верхньої мертвої точки.

3. Для суднових дизелів 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo, 6EY18ALW Yanmar та 6H17/28 Hyundai Heavy Industries встановлено, що у випадку використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження з оптимальною концентрацією, зменшення кутів випередження впорскування палива забезпечує додаткове пропорційне зниження емісії оксидів азоту з випускними газами (яке за деяких

експлуатаційних режимів може до 4,5 % підвищувати це значення, досягнуте завдяки використанню паливної суміші з оптимальною концентрацією біопалива).

Також встановлено, що під час зменшення кута випередження подачі палива зменшується емісія оксидів азоту, що є позитивним фактором цього процесу. Одночасно з цим за таких умов відбуваються синусоїдальні зміни максимального тиску згоряння, при цьому зі зменшенням кута випередження зменшується тиск згоряння, що відноситься до негативного фактора. Під час зменшення кута випередження подачі палива здійснюється зменшення питомої витрати палива, але за умови досягнення критичних значень кута випередження спостерігається зростання витрати палива.

4. Виконана оцінка екологічної ефективності використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, з одним із найбільш поширених методів забезпечення екологічності роботи морських суден (а саме застосуванням скрубєрного очищення випускних газів під час використання палива з вмістом сірки більш ніж 0,5 %) висвітила, що під час цього:

- забезпечується виконання вимог щодо вмісту шкідливих домішок у випускних газах, а саме до відношення діоксиду сірки до діоксиду вуглецю SO_2/CO_2 , як під час експлуатації морських суден в районах спеціального екологічного контролю викидів SECA, також під час знаходження поза цими районами;

- забезпечується підвищення екологічної стійкості судна;

- зменшуються витрати енергії на підтримання екологічності роботи морського судна.

5. Через обмеження в забезпеченні бункерування паливом біологічного походження в деяких морських портах може виникати необхідність корегування навігаційних переходів з метою підтримання на необхідному рівні екологічних показників роботи судових дизелів – емісії оксидів азоту та вуглецю.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – забезпечення екологічних та економічних показників роботи морських та річкових засобів транспорту під час використання в судових дизелях палива біологічного походження.

Використання під час експлуатації морських засобів транспорту палив нафтового походження (дизельних або дистильтних) сприяє забрудненню доквілля шкідливими домішками, що входять до складу випускних газів, та зумовлює пошук шляхів підвищення екологічності роботи морських суден. Це, а також тенденція до виснажування природних запасів рідких вуглеводів, які є основною сировиною під час виготовлення нафтових палив нафтового походження, сприяють поширенню використання на морських суднах палив біологічного походження.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є доведена та практично підтверджена теза, що забезпечення екологічних та економічних показників роботи морських та річкових засобів транспорту гарантується утворенням стійких паливних сумішей з оптимальним вмістом у цих сумішах палива біологічного походження та забезпеченням оптимальних фаз подачі цих сумішей у циліндри дизелів морських засобів транспорту

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Утворення паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, найбільш доцільно забезпечувати безпосередньо перед паливним насосом, що підкачує паливо до паливної апаратури високого тиску дизеля. Забезпечення негативної висоти підйому біопалива під час його засмоктування паливним насосом, за допомогою якого утворюється паливна суміш (тобто утворення умов для додаткового гідростатичного тиску з боку палива біологічного походження), а також скорочення довжини паливних трубопроводів, за якими здійснюється

потрапляння палива біологічного походження в загальну магістраль нагнітання палива, – забезпечує мінімальний гідродинамічний опір та мінімальне додаткове навантаження на паливну апаратуру, за допомогою яких утворюється паливна суміш.

2. Діапазон доцільної концентрації біопалива в паливній суміші визначається відхиленням від значення палива нафтового походження в той чи іншій бік таких експлуатаційних характеристик паливної суміші: як густина, в'язкість та теплотворна здатності. Критичне відхилення в той чи іншій бік цих показників може призвести до підвищення гідродинамічного опору в паливних магістралях або підвищення витоків суміші в елементах паливної апаратури високого тиску; а також до неприпустимого зменшення кількості енергії, що утворюється під час згоряння палива, та відповідного зменшення крутного моменту на валу дизеля.

3. Для паливних сумішей, які складають дизельні / дистилятні палива RMA10, RME180, DMA та палива біологічного походження FAME B30 або FAME99, найбільш доцільною концентрацією біопалива є діапазон 5...20 % від загального об'єму паливної суміші. Перебільшення цього значення знижує теплотворну здатність паливної суміші та поширює відхилення густини та в'язкості суміші від палива нафтового походження. За умови утворення паливних сумішей, вміст палива біологічного походження в яких не перевищує 20 %, відхилення в значеннях її в'язкості та теплотворної здатності від подібних показників дизельного / дистилятного палива не перевищує 17,8 % та 2,1 % відповідно. Це забезпечує утворення стійких паливних сумішей, суцільність її руху в паливній системі та максимальну термічну ефективність робочого циклу під час її згоряння в циліндрі дизеля.

4. Ефективність використання паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, найбільш доцільно оцінювати за значенням відносного зниження емісії оксидів азоту з випускними газами дизелів морських суден (яке є екологічним критерієм) та за значенням відносного підвищення питомої витрати палива (яке є економічним критерієм).

5. Оптимальний склад паливної суміші, до складу якої входить паливо біологічного походження, визначається такою його концентрацією, за якою гарантується максимальне збільшення екологічного та мінімальне зниження економічного критеріїв роботи суднового дизеля з одночасним забезпеченням значення ефективної потужності дизеля.

6. Комплекс односпрямованих досліджень, що виконувався:

- на дизелі 6N165LW Yanmar судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн (під час якого випробувалася суміш, яку складали дизельне RMA10 та біодизельне паливо B99.9 FAME);

- на дизелі 5H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 9600 тонн (під час якого випробувалася суміш, яку складали дизельне RMB30 та біодизельне паливо B99.9 FAME);

- на дизелі 6H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн (під час якого випробувалася суміш, яку складали дистилятне DMA та біодизельне паливо B99.6 FAME);

- на дизелі 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel спеціалізованого морського судна дедвейтом 10820 тонн (під час якого випробувалася суміш, яку складали дистилятне DMB та біодизельне паливо B99.6 FAME), –

визначив, що використання вказаних паливних сумішей залежно від експлуатаційних режимів роботи дизеля забезпечує зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами до 26,6 % та зменшення концентрації емісії вуглецю у випускних газах до 23,6 %. На жаль, при цьому здійснюється підвищення питомої витрати палива, значення якої за деяких експлуатаційних режимів може майже на 9 % перебільшувати величину аналогічного показника під час використання палива нафтового походження. При цьому існує широкий діапазон експлуатаційних режимів, за яких підвищення питомої витрати палива під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, не перевищує 2,5...3,2 %.

7. Оптимальний вміст палива біологічного походження в паливній суміші (за яким забезпечується максимальне збільшення екологічного та мінімальне зниження економічного критеріїв) знаходиться в діапазоні 10...15 % та визначається експериментально відповідно до заздалегідь розробленої та погодженої з контролюючими структурами технології.

8. Використання в дизелях морських суден паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, змінює (порівняно з експлуатацією дизеля на паливі нафтового походження) процеси окислення та згоряння, що призводить до зміни термодинаміки процесу згоряння. Це стає підставою зміни основних експлуатаційних показників дизеля та зумовлює необхідність управління процесами згоряння під час використання палива біологічного походження.

9. Підвищення ефективності використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, полягає не лише у визначенні оптимального вмісту біопалива в суміші, але також у визначенні оптимальних кутів процесу подачі паливної суміші (кутів випередження впорскування палива), зміна яких необхідна у зв'язку зі зміною складу паливної суміші, що потрапляє для спалювання в циліндр дизеля. Обидва значення (вміст біопалива в паливній суміші та кут випередження впорскування) визначаються експериментальним шляхом та залежать від характеристик дизеля.

10. З метою підвищення ефективності використання паливних сумішей необхідно змішувати процес впорскування в бік верхньої мертвої точки, тобто знижувати кут випередження подачі палива, при цьому діапазон цієї зміни повинен відповідати рекомендаціям заводів виробників щодо можливих кутів впорскування палива.

11. Використання в дизелях морських суден паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, є одним з альтернативних способів, що підвищують рівень екологічної стійкості морських суден під час їх експлуатації в спеціальних екологічних районах

Світового океану. Відносна невелика енергоємність методу створення та використання подібних паливних сумішей сприяє поширенню його використання на багатьох засобах морського транспорту.

12. Утворення паливних сумішей, до складу яких входить паливо нафтового та біологічного походження, з оптимальним вмістом в цих сумішах палива біологічного походження та забезпечення процесу паливоподачі цих сумішей з оптимальними фазами впорскування призводить до поліпшення екологічності роботи морських засобів транспорту.

13. Наведені результати дозволяють сформулювати наступне наукове положення. Підвищення екологічності роботи морських та річкових засобів транспорту досягається шляхом утворення стійких паливних сумішей з оптимальною концентрацією в цих сумішах палива біологічного походження та подальшою подачею цих сумішей в циліндри дизеля з оптимальними фазами впорскування.

14. Наукові результати, що отримані в дисертаційному дослідженні, теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені під час проведення випробувань на морських засобах транспорту різного дедвейту та призначення, при цьому встановлені та використовуються:

- блок дозування, що забезпечує утворення стійких паливних сумішей, до складу яких входить палива біологічного та нафтового походження, – у паливній системі дизеля 6N165LW Yanmar судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн, що сприяло більш ніж на 20 % зниженню емісії оксидів азоту та 15...20 % зниженню емісії оксидів вуглецю;

- вдосконалена паливна система, яка дозволяє утворювати та використовувати паливні суміші, до складу яких входить паливо біологічного походження, – на дизелі 5H17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 9600 тонн, що для оптимального вмісту палива біологічного походження в складі паливної суміші забезпечило відносне зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах на 24,4...26,6 % та

відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах на 18,9...23,6 %;

- технологія утворення паливних сумішей – у паливній системі суднового дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн, що забезпечило зниження на 18,3...23,3 % відносної зміни концентрації оксидів азоту у випускних газах, а також покращення експлуатаційних показників дизеля;

- технологія корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання палива біологічного походження, а також модуль підготовки паливних сумішей з оптимальним вмістом компонентів, що їх складають, – у паливній системі суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel спеціалізованого морського судна дедвейтом 10820 тонн, що сприяло зниженню емісії оксидів азоту на 23,8...24,3 % та зниженню об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах на 17,8...25,4 %;

- технологія забезпечення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів шляхом корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, а також технологія управління екологічною безпекою суден морського транспорту шляхом використання палива біологічного походження – на суднових дизелях 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн, що забезпечило поліпшення екологічних та підтримання енергетичних показників дизелів.

15. Запропонована технологія утворення стійких паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, а також алгоритм визначення оптимальних фаз подачі палива, за якими забезпечується підвищення екологічності роботи морських та річкових засобів транспорту, є прикладом впровадження сучасних технологій під час експлуатації засобів морського транспорту.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sagin S.V. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel / S.V. Sagin, S. Karianskyi, S.S. Sagin, O. Volkov, Y. Zablotskyi, O. Fomin, V. Píšťek, P. Kučera // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
2. 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.
3. 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. Píšťek, P. Kučera // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
4. Сагін С.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів / С.В. Сагін, О.В. Матейко // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – Вип. 47. – Одеса: НУ «ОМА». – 2023. – С. 148-156. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.
5. 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.
6. 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.
7. Kuropyatnyk O.A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines /

O.A. Kuropyatnyk, S.V. Sagin // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

8. 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.

9. 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. Федунів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.

10. 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.

11. Melnyk O. Study of Environmental Efficiency of Ship Operation in Terms of Freight Transportation Effectiveness Provision / O. Melnyk, O. Onishchenko, S. Onyshchenko, V. Golikov, V. Sapiha, O. Shcherbina, V. Andrievska // *TransNav – the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. – 2022. – Vol. 16. – № 4. – P. 723-729. DOI: 10.12716/1001.16.04.14/

12. 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.

13. 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>.

14. 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.

15. Budashko V.V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes / V.V. Budashko // International journal of energy and environment. – 2020. – Vol. 14. – P. 5-8.

16. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна / С.И. Горб // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 17-34.

17. Горб С.И. Повышение эффективности работы главного двигателя корректировкой упора гребного винта / С.И. Горб, А.К. Сандлер, Н.И. Будуров // Автоматизация судовых технических средств : наук. -техн. зб. – 2019. – Вып. 25. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 35-52. DOI: 10.31653/1819-3293-2019-1-25-35-52.

18. Самонов С.Ф. Підвищення ефективності та надійності комбінованих судових пропульсивних установок / С.Ф. Самонов, О.М. Рак, О.В. Глазєва // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2020. – № 3(1357). – С. 29-35. DOI: 10.20998/2409-9295.2020.3.05.

19. 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. – Вып. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi : 10.31653/smf45.2022.5-16.

20. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз ефективності використання в судових дизелях палив різного фракційного та структурного складу //

Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 31-42. doi: 10.31653/smf45.2022.31142-42.

21. 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. – P.1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

22. 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.

23. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

24. Herrero A. Influence of the Implantation of the Onshore Power Supply (OPS) System in Spanish Medium-Sized Ports on the Reduction in CO2 Emissions: The Case of the Port of Santander (Spain) / A. Herrero, A. Ortega Piris, E. Diaz-Ruiz-Navamuel, M.A. Gutierrez, A.-I. Lopez-Diaz // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 10. – P. 1446. <https://doi.org/10.3390/jmse10101446>.

25. 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>.

26. Рибальченко М.Є. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малообертового двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден / М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов // Розвиток транспорту. Науковий журнал. – 2022. – Т. 14. – С. 91-109. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.06

27. Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згоряння : Серія підручників у 6 томах, Т. 1. Теорія ДВЗ – 2-е видання / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов,

Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, А.Ф. ШЕХОВЦОВ. За редакцією проф. А.П. Марченко. – Харків : Видавничий центр НТУ "ХПІ", 2014. – 348 с.

28. 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.Є. Рибальченко, В.П. Савчук, Г.Я. Тулученко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – № 1. – С. 51-59. DOI : 10.20998/0419-8719.2022.1.07.

29. 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.

30. 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>.

31. Neumann S. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems / S. Neumann, R. Varbanets, D. Minchev, V. Malchevsky, V. Zalozh. // Ships and Offshore Structures. – 2023. – Vol. 18. – Iss. 11. – P. 1535-1546. DOI: 10.1080/17445302.2022.2128558.

32. Сагін С.С. Вдосконалення взаємодії елементів суднового пропульсивного комплексу під час забезпечення маневру розходження морських суден / С.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108-121. doi: 10.31653/smf47.2023.118-131.

33. Сагін С.В. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден / С.В. Сагін, П.С. Суворов, С.А. Бондар // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 122-130. doi: 10.31653/smf47.2023.122-130.

34. 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.

35. 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>.

36. 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 згоряння. – 2023. – № 2. – С. 26-36. doi : 10.20998/0419-8719.2023.2.04.

37. 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

38. 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.

39. 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.

40. Ткаченко І.В. Розробка технології розділення і очищення вод, що містять нафту / І.В. Ткаченко // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 24-30. DOI : 10.31653/smf340.2020.24-30.

41. 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*. – 2021. – №5 (73), –P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>

42. 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>.

43. Sagin S.V. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines / S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8. – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

44. 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](https://doi.org/10.31653/smf340.2020.49-54).

45. 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 // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2022. – № 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

46. 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](https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.05).

47. 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.

48. 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.

49. 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.

50. Solberg K.E. Time to Rescue for Different Paths to Survival Following a Marine Incident / K.E. Solberg, J.E. Jensen, Barane E., S. Hagen, G. Johansen // J. Mar. Sci. Eng.– 2020. – Vol. 8(12). – P. 997. <https://doi.org/10.3390/jmse8120997>.

51. Melnyk O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment / O. Melnyk, S. Onyshchenko, O. Onishchenko // Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport. – 2023. – Vol. 118. – P.195-206. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.

52. Solakivi T. How shipowners have adapted to sulphur regulations—Evidence from Finnish seaborne trade / T. Solakivi, S. Laari, T. Kiiski, J. Töyli, L. Ojala // Case Studies on Transport Policy. – 2019. – Vol. 7. – Is. 2. – P. 338-345. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.03.010.

53. 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.

54. Sagin S.V. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines / S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. –2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.

55. Dhyani V. Control of backfire and NO_x emission reduction in a hydrogen fueled mylti-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>.

56. 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>.

57. 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>.

58. Rapalis P. Ship Air Pollution Estimation by AIS Data: Case Port of Klaipeda / P. Rapalis, G. Šilas, J. Žaglinskis // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 10. – P. 1950. <https://doi.org/10.3390/jmse10121950>.

59. 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. Rekhletskaia, U.A. Makhova, V.M. Kapustin, D.Y. Mukhina, T.M.M. Abdellatief // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 10. – P. 1828. <https://doi.org/10.3390/jmse10121828>.

60. Резолюция МЕРС.340(77) руководство 2021 года по системам очистки отработавших газов <http://www.imo.org/>

61. Резолюция МЕРС.324(75) поправки к приложению VI к конвенции МАРПОЛ (процедуры отбора проб и проверки содержания серы в судовом топливе и конструктивный коэффициент энергоэффективности (ККЭЭ)). <http://www.imo.org/>

62. Резолюция МЕРС.305(73) поправки к Приложению VI к Конвенции МАРПОЛ (Запрет на перевозку не соответствующего требованиям судового топлива, предназначенного для сгорания с целью обеспечения движения или эксплуатации судна). URL: <http://www.imo.org/>

63. Energy Efficiency related Rules and Regulation – EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulation. URL: <http://www.imo.org/>

64. Резолюция МЕРС.282(70) руководство 2016 года по разработке плана управления энергоэффективностью судна (ПУЭС). URL: <http://www.imo.org/>

65. Резолюция МЕРС.333(76) руководство 2021 года по методу вычисления фактического коэффициента энергоэффективности существующего судна (КЭСС). <http://www.imo.org/>

66. Резолюция МЕРС.254(67) руководство 2014 года по освидетельствованию и выдаче свидетельств в отношении конструктивного коэффициента энергоэффективности (ККЭЭ). URL: <http://www.imo.org/>

67. 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.

68. Panchuk M. New Technologies for Hull Assemblies in Shipbuilding / M. Panchuk, A. Śladkowski, A. Panchuk, I. Semianyk // Naše more. – 2021. – Vol. 68. – No. 1. – P. 48-57. <https://doi.org/10.17818/NM/2021/1.6>.

68. Резолюция МЕРС.278(70) поправки к Приложению VI к Конвенции МАРПОЛ. Система сбора данных по расходу топлива судами. URL: <http://www.imo.org/>

69. Reusser C.A. Challenges for Zero-Emissions Ship / C.A. Reusser, J.R. Pérez Osses // J. Mar. Sci. Eng. – 2021. – Vol. 9. – P. 1042. <https://doi.org/0.3390/jmse9101042>.

70. Sharma V. Experimental Investigation of Neat Biodiesels' Saturation Level on Combustion and Emission Characteristics in a CI / V. Sharma, A.K. Hossain, G. Duraisamy // Engine. Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 5203. <https://doi.org/10.3390/en14165203>.

71. 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>.

72. 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>.

73. Javed F. Kinetics of Biodiesel Production from Microalgae Using Microbubble Interfacial Technology / F. Javed, M.W. Saif-ul-Allah, F. Ahmed, N. Rashid, A. Hussain, W.B. Zimmerman, F. Rehman // *Bioengineering*. – 2022. – Vol. 9. – P 739. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9120739>.

74. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових 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.*

75. Солодовніков В.Г. Використання ультразвукової обробки в модульних схемах побудови суднових систем паливопідготовки / В.Г. Солодовніков // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 158-168.*

76. Petković M. Wind Assisted Ship Propulsion Technologies - Can they Help in Emissions Reduction? / M. Petković, M. Zubčić, M. Krčum, I. Pavić // *Naše more*. – 2019. – Vol. 68. – No 2. – P. 102-109. <https://doi.org/10.17818/NM/2021/2.6>.

77. Kondratenko O. Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels / O. Kondratenko, I. Mishchenko, G. Chernobay, Yu. Derkach, Ya. Suchikova // *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and*

Power Systems (IEPS–2018): Book of Papers (10–14 September, 2018, NTU «KhPI», Kharkiv). – Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. – pp. 57-1–57-6. – DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559570.

78. Gallo M. The Use of Hydrogen for Traction in Freight Transport: Estimating the Reduction in Fuel Consumption and Emissions in a Regional Context / M. Gallo, M. Marinelli // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P.508. <https://doi.org/10.3390/en16010508>.

79. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів / Ю.В. Заблоцький // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40.* – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 12-16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

80. 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.

81. Карьянский С.А. Обеспечение эксплуатационных характеристик высокоплотных технических жидкостей при их транспортировке морскими судами / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // *Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць*, 2020. – Вип. 1(61). – С. 97-105. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-97-105.

82. 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.

83. 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>

84. 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).

85. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics / T. Stoliaryk // *Technology Audit and Production Reserves.* – 2022. – Vol.5(1(67)). – P. 22–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.

86. 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>.

87. el Abbassi M. The Effect of Variable Air–Fuel Ratio on Thermal NO_x Emissions and Numerical Flow Stability in Rotary Kilns Using Non-Premixed Combustion / M. el Abbassi, D. Lahaye, C. Vuik // *Processes.* – 2021. – Vol. 9. – P. 1723. <https://doi.org/10.3390/pr9101723>.

88. 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](https://doi.org/10.31653/smf44.2022.132-141).

89. Lee J. Techno-Economic Analysis of NH₃ Fuel Supply and Onboard Re-Liquefaction System for an NH₃-Fueled Ocean-Going Large Container Ship / J. Lee, Y. Choi, J. Choi // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2022. – Vol.10. – P. 1500. <https://doi.org/10.3390/jmse10101500>.

90. 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>.

91. Сагін С.В. Аналіз ефективності використання в суднових дизелях палив різного фракційного та структурного складу / С.В. Сагін, Р.В. Побережний // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний*

збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 31-42. doi: 10.31653/smf45.2022.31142-42.

92. М'який М.М. Вдосконалення процесу очищення вод, що містять нафту / М.М. М'який, І.І. Ткаченко // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 26-29. DOI : 10.31653/smf341.2020.26-29

93. Сагін С.В. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту / С.В. Сагін, Д.Г. Парменова, М.О. Колегаєв // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.

94. Husnain N. Iron oxide based catalysts for low temperature selective catalytic reduction NO_x with NH_3 / N. Husnain, E. Wang, K. Li, M.T. Anwar // Reviews in chemical engineering. – 2019. – Vol. 35. – No. 2. – P. 239-264. <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0064>.

95. Chen C. Selective catalytic reduction of nitrogen oxides with methanol over the (Cobalt-Molybdenum)/Alumina dual catalysts under the diesel methanol dual fuel conditions / C. Chen, A. Yao, C. Yao, H. Wang, M. Liu, Z. Li // Chemical engineering science. – 2022. – Vol. 211. – P. 115320. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115320>.

96. Jiang Y. Supercritical CO_2 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>.

97. Torres Cantero C.A. Design and Control Applied to an Extractive Distillation Column with Salt for the Production of Bioethanol / C.A. Torres Cantero, R. Pérez Zúñiga, M. Martínez García, S. Ramos Cabral, M. Calixto-Rodriguez, J.S. Valdez Martínez, M.G. Mena Enriquez,

A.J. Pérez Estrada, G. Ortiz Torres, F.d.J. Sorcia Vázquez, et al. // Processes. – 2022. – Vol. 10. – P. 1792. <https://doi.org/10.3390/pr10091792>.

98. Malakhov O. Improvement of working parameters of ships with the use of water-fuel emulsions / O. Malakhov, M. Kolegaev, D. Malakhova, I. Maslov, I. Brazhnik, R. Gudilko // Technology audit and production reserves. – 2018. – Vol. 6/3(44). – P. 14-20. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152255.

99. Kuropyatnyk O. A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines / O. A. Kuropyatnyk // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992.

100. 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/smf343.2021.25-40

101. 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.

102. Мадей В.В. Використання альтернативних палив в суднових дизелях середньої потужності / Мадей В.В. // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт». –2021. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 100-102.

103. Мадей В.В. Визначення раціональних режимів роботи суднових дизелів під час використання палив нафтового походження / Мадей В.В. // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». –2022. –Одеса: НУ "ОМА". – С. 63-66.

104. Мадей В.В. Використання альтернативного палива в суднових середньообертових дизелях / В.В. Мадей // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 45-53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.

105. Wang Y. Selective NO₂ Detection by Black Phosphorus Gas Sensor Prepared via Aqueous Route for Ship Pollutant Monitoring / Y. Wang, Y. Sun, K. Zhang, C. Zhang, J. Liu, C. Fu, J. Wang // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 1892. <https://doi.org/10.3390/jmse10121892>.

106. Winnes H. Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions / H. Winnes, E. Fridell, J. Moldanová // Journal Marine Science and Engineering. – 2020. – Vol. 8. – P. 299; doi:10.3390/jmse8040299.

107. Pyagay J.G. Speight, Influence of Asphaltenes on the Low-Sulphur Residual Marine Fuels' Stability / J.G. Pyagay // J. Mar. Sci. Eng. – 2021. – Vol. 9. – P.1235. <https://doi.org/10.3390/jmse9111235>.

108. Cai T. Evaluation of NO_x emissions characteristics in a CO₂-Free micro-power system by implementing a perforated plate / T. Cai, D. Zhao, Y. Sun, S. Ni, W. Li, D. Guan, B. Wang // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2021. – Vol. 145. – P. 111150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111150>.

109. Сагин С.В. Использование биодизельного топлива в судовых вспомогательных дизелях / С.В. Сагин, В.В. Мадей // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування». – 2021. – Херсон : Херсонська державна морська академія – С. 160-162.

110. Мадей В.В. Забезпечення екологічності морських суден під час їх експлуатації в спеціальних екологічних районах Північної Європи / В.В. Мадей, О.М. Волков, С.С. Сагін // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», –2023– Одеса : НУ «ОМА». – С. 61-65.

111. Мадей В.В. Забезпечення екологічності роботи суднових дизелів під час використання біопалива / В.В. Мадей // Матеріали X Міжнародної

науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – 2021– НУ «КБ» – С. 227-230.

112. Мадей В.В. Використання біопалива в двигунах внутрішнього згоряння / В.В. Мадей С.В. Сагин // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 91-92.

113. Kuczyński S. Impact of Liquefied Natural Gas Composition Changes on Methane Number as a Fuel Quality Requirement / S. Kuczyński, M. Łaciak, A. Szurlej, T. Włodek // *Energies* – 2022. – Vol. 13(19). – P.50-60. <https://doi.org/10.3390/en13195060>.

114. Smyshlyaeva K.I. Influence of Asphaltenes on the Low-Sulphur Residual Marine Fuels' Stability / K.I. Smyshlyaeva, V.A. Rudko, V.G. Povarov, A.A. Shaidulina, I. Efimov, R.R. Gabdulkhakov, I.N. Pyagay, J.G. Speight // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2021. –, 9, 1235. <https://doi.org/10.3390/jmse9111235>.

115. Manojkumar N. Comprehensive review on the application of response surface methodology for optimization of biodiesel production using different oil sources / N. Manojkumar, C. Muthukumaran, G.A. Sharmila // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences.* – 2022. – Vol. 34. – Iss. 3. – P. 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.09.012>.

116. Hossain N. Experimental investigation, techno-economic analysis and environmental impact of bioethanol production from banana stem / N. Hossain, A.N. Razali, T.M.I. Mahlia, T. Chowdhury, H. Chowdhury, H.C. Ong, A.H. Shamsuddin, A.S. Silitonga // *Energies.* – 2019. – Vol. 12. – P. 3947. <https://doi.org/10.3390/en12203947>.

117. Cavalcante F.T.T. Opportunities for improving biodiesel production via lipase catalysis / F.T.T. Cavalcante, F.S. Neto, I.R. de Aguiar Falcão, J.E. da Silva Souza, L.S. de Moura Junior, P. da Silva Sousa, T.G. Rocha, I.G. de Sousa, P.H. de Lima Gomes, M.C.M. de Souza // *Fuel.* – 2021. – Vol. 288. – P. 119577. [10.3390/bioengineering9100539](https://doi.org/10.3390/bioengineering9100539).

118. Sales M.B. Sustainable Feedstocks and Challenges in Biodiesel Production: An Advanced Bibliometric Analysis / M.B. Sales, P.T. Borges, M.N. Ribeiro Filho, L.R. Miranda da Silva, A.P. Castro, A.A. Sanders Lopes, R.K. Chaves de Lima, M.A. de Sousa Rios, J.C.S.d. Santos // *Bioengineering*. – 2022. – Vol.9, P 539. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100539>.

119. Alanen J. The formation and physical properties of the particle emissions from a natural gas engine / J. Alane, E. Saukko, K. Lehtoranta, T. Murtonen // *Fuel*. – 2015. – Vol. 162(15). – P. 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.003>.

120. Likhanov V.A. Dynamics of soot formation and burnout in a gas diesel cylinder / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 862. – P. 062033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062033>.

121. Lopez J.A. An inventory control policy for liquefied natural gas as a transportation fuel / J.A. Lopez, P. Alvarez, B. Onur, A. Kiliciris, F.A. Vis // *Omega*. – 2020. – Vol. 90. – P. 101985. – DOI: 10.1016/j.omega.2018.10.015.

122. Sharafian A. Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential / A. Sharafian, P. Blomerus, W. Mérida // *Energy Policy*. – 2019. – Vol. 131. – P. 332-346. – DOI: 10.1016/j.enpol.2019.05.015.

123. Vilke S. The use of hydrogen as an alternative fuel in urban transport / S. Vilke, F. Tadic, I. Ostović, B. Debelić // *Scientific Journal of Maritime Research*. – 2020. – Vol. 34. – P. 376-386. – DOI: 10.31217/p.34.2.18.

124. Chen Z. Parametric study on effects of excess air/fuel ratio, spark timing, and methanol injection timing on combustion characteristics and performance of natural gas/methanol dual-fuel engine at low loads / Z. Chen, H. Chen, L. Wang, L. Geng, K. Zen // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – P. 112742. – DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112742.

125. Zaky A.S. A Preliminary Life Cycle Analysis of Bioethanol Production Using Seawater in a Coastal Biorefinery Setting / A.S. Zaky, C.E. Carter, F. Meng,

C.E. French // Processes. – 2021. – Vol. 9. – P. 1399. <https://doi.org/10.3390/pr9081399>.

126. Alqahtani R.T. Stability and Performance Analysis of Bioethanol Production with Delay and Growth Inhibition in a Continuous Bioreactor with Recycle / R.T. Alqahtani, S.K. Bhowmik, A. Ajbar, M. Boumaza // Processes. – 2021. – Vol. 9. – P. 461. <https://doi.org/10.3390/pr9030461>.

127. Hossain N.I. Experimental Investigation, Techno-Economic Analysis and Environmental Impact of Bioethanol Production from Banana Stem / N.I. Hossain, A.N. Razali, T. Mahlia, T. Chowdhury, H. Chowdhury // Energies. – 2019. – Vol. 12. – P. 3947; doi:10.3390/en12203947.

128. Wu Y. High-Titer Bioethanol Production from Steam-Exploded Corn Stover Using an Engineering *Saccharomyces cerevisiae* Strain with High Inhibitor Tolerance / Y. Wu, C. Su, G. Zhang, Z. Liao, J. Wen, Y. Wang, Y. Jiang, C. Zhang, D. Cai // Fermentation. – 2023. – Vol. 9. – P. 906. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100906>.

129. Rathore D. Bioengineering to Accelerate Biodiesel Production for a Sustainable Biorefinery / D. Rathore, S. Sevda, S. Prasad, V. Venkatramanan, A.K. Chandel, R. Kataki, S. Bhadra, V. Channashettar, N. Bora, A. Singh // Bioengineering. – 2022. – Vol. 9. – P. 618. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9110618>.

130. Awogbemi O. Application of Tubular Reactor Technologies for the Acceleration of Biodiesel Production / O. Awogbemi, D. V. V. Kallon // Bioengineering. – 2022. – Vol. 9. – P. 347. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080347>.

131. Almeida E.L. Production of Biofuels from Glycerol from the Biodiesel Production Process – A Brief Review / E.L. Almeida, J.E. Olivo, C.M.G. Andrade // Fermentation. – 2023. – Vol. 9. – P. 869. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100869>.

132. Delović S.; Deep Eutectic Solvents for Biodiesel Purification in a Microextractor: Solvent Preparation, Selection and Process Optimization /

S. Delović, M. Božinović, Ž. Čurić, A. Šalić, A. Jurinjak Tušek, K.Z. Kućan, M. Rogošić, M. Radović, M. Cvjetko Bubalo, B. Zelić // *Bioengineering*. – 2022. – Vol. 9. – P. 665. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9110665>.

133. Поповський О.Ю. Експлуатаційні характеристики нових мастильних матеріалів біологічного походження / О.Ю. Поповський, Б.А. Алтоїз, О.Ф. Бутенко, О.К. Копійка, R. Laurencas // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2021. – № 59. – С. 201-211. DOI: 10.18524/0367-1631.2021.59.236756.

134. Zhang Q. Zr-Based Metal-Organic Frameworks for Green Biodiesel Synthesis: A Minireview / Q. Zhang, J. Wang, S. Zhang, J. Ma, J. Cheng, Y. Zhang // *Bioengineering*. – 2022. – Vol. 9. – P. 700. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9110700>.

135. Anderlini B. Upgrading of Biobased Glycerol to Glycerol Carbonate as a Tool to Reduce the CO₂ Emissions of the Biodiesel Fuel Life Cycle / B. Anderlini, A. Ughetti, E. Cristoni, L. Forti, L. Rigamonti, F. Roncaglia // *Bioengineering*. – 2022. – Vol. 9. – P. 778. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9120778>.

136. Högosta J. Sensitivity Analysis of the Climate Effect of Using Pyrochar Biofuel for Heat and Electricity Generation / J. Högosta, A. Mohammadi // *Processes* – 2021. – Vol. 8. – P. 1744. <https://doi.org/10.3390/pr9101744>.

137. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2022. – № 2 (1(64)). – P. 34-41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

138. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-110. DOI: 10.31653/smf44.2022.93-110.

139. Palacios-Velásquez A. Acquisition, Characterization, and Optimization of Distilled Bioethanol Generated from Fermented Carrot (*Daucus carota*) Residues / A. Palacios-Velásquez, V. Quispe-Coquil, E.M. Casimiro-Soriano,

K.M. Tapia-Zarate, A.R. Huamán-De la Cruz // *Fermentation*. – 2023. – Vol. 9. – P. 867. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100867>.

140. Yang L. Review on Potential Biofuel Yields from Cover Crops / L. Yang, L.D. Lamont, S. Liu, C. Guo, S. A. Stoner // *Fermentation*. – 2023. – Vol. 9. – P. 912. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100912>.

141. Saini R. Valorization of Pineapple Leaves Waste for the Production of Bioethanol / R. Saini, C.-W. Chen, A.K. Patel, J.K. Saini, C.-D. Dong, R.R. Singhanian // *Bioengineering*. – 2022. – Vol. 9. – P. 557. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100557>.

142. Zhou D. Biodiesel as Dispersant to Improve the Stability of Asphaltene in Marine Very-Low-Sulfur Fuel Oil / D. Zhou, H. Wei, Z. Tan, S. Xue, Y. Qiu, S. Wu // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2023. – Vol. 11. – P. 315. <https://doi.org/10.3390/jmse11020315>.

143. Levterov A. Thermodynamic properties of fatty acid esters in some biodiesel fuels / A. Levterov // *Functional Materials*. – 2018. – Vol. 25. – № 2. – P. 308-312.

144. Zhao F. Challenges, Potential and Opportunities for Internal Combustion Engines in China / F. Zhao, K. Chen, H. Hao, Z. Liu // *Sustainability*. – 2020. – № 12(12). – P. 4955; <https://doi.org/10.3390/su12124955>.

145. Голіков В.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голіков, М.А. Козьмініх, О.А. Онищенко. – Одеса : ОНМА, 2014. – 164 с.

146. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання / Богом'я В.І., Горбань А.В., Павленко М.А., Тимочко О.І., Тимощук О.М. // За заг. ред. О.М. Тимощук. – Київ : Держ. ун-т інфраструктури та технологій. – 2018. – 305 с.

147. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>. Дата звернення 01.01.2024 р.

148. Системний аналіз інформаційних процесів : навчальний посібник / В.М. Варенко, І.В. Братусь, В.С. Дорошенко, Ю.Б. Смольников, В.О. Юрченко. – К. : Університет «Україна», 2013. – 203 с.

149. Шабанова Ю.О. Системний підхід у вищій школі : підручник / Ю.А. Шабанова – Д. : Національний гірський університет. – Донецьк : НГУ, 2014. – 119 с.

150. Устенко А.О. Теорія систем і системний аналіз : навчальний посібник / А.О. Устенко, О.Я. Малинка. – Івано-Франківськ : Фоліант, 2012. – 328 с.

151. Кустовська О.В. Методологія системного підходу та наукових досліджень : Курс лекцій / О.В. Кустовська – Тернопіль : Економічна думка, 2005. – 124 с.

152. Грицюк П.М. Основи теорії систем і управління : навчальний посібник / П.М. Грицюк, О.І. Джоші, О.М. Гладка. – Рівне : Національного університету водного господарства та природокористування, 2021. – 272 с.

153. Кондратенко О.М. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / О.М. Кондратенко, В.Ю. Колосков, Ю.Ф. Деркач, С.А. Коваленко. – Харків : Стиль-Издат, 2020. – 522 с.

154. Васильев А.П. Конвективный теплообмен в ламинарном потоке / А.П. Васильев // Вестник Одесского гос. ун-та. – 2003. – № 3. – С. 97-101.

155. Popovskii A.Y. Structural properties and model rheological parameters of an ELC layer of hexadecane / A.Y. Popovskii, B.A. Altoiz, V.F. Butenko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – № 92(3). – P. 703-710.

156. Алтоїз Б.А. Структура перекритих епітропних рідких кристалів / Б.А. Алтоїз, О.Ю. Поповський, О.Ф. Бутенко // Фізика аеродисперсних систем. – 2023. – № 61. – С. 63-69.

157. Кондратенко О.М. Удосконалення математичного описання теплофізичних властивостей альтернативних моторних палив на основі

модифікованої термодинамічної теорії збурень. Частина 1 / О.М. Кондратенко, О.М. Умеренкова, А.М. Левтеров, О.П. Строков, В.Ю. Колосков // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – № 1. – С. 25-32. doi : 10.20998/0419-8719.2023.1.04.

158. Поповський О.Ю. Епітропні шари олеїнової кислоти. Орієнтаційна впорядкованість та реологічні характеристики / О.Ю. Поповський, Б.А. Алтоїз, О.Ф. Бутенко // Фізика аеродисперсних систем. – 2019. – № 57. – С. 34-46.

159. Popovskii A.Y. Structural properties and model rheological parameters of an ELC layer of hexadecane / A.Y. Popovskii, B.A. Altoiz, V.F. Butenko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92(3). – P. 703+. <https://link.gale.com/apps/doc/A600789362/AONE?u=anon~ac57d9f3&sid=googleScholar&xid=9f33777a>.

160. 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.

161. Мацкевич Д.В. Забезпечення реологічної стійкості суднових моторних мастил / Д.В. Мацкевич // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Одеса : НУ «ОМА». – Вип. 40. – С. 17-23. DOI : 10.31653/smf340.2020.17-23.

162. Кондратенко О.М. Удосконалення математичного описання теплофізичних властивостей альтернативних моторних палив на основі модифікованої термодинамічної теорії збурень. Частина 2 / О.М. Кондратенко, О.М. Умеренкова, А.М. Левтеров, О.П. Строков, В.Ю. Колосков // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – № 2. – С. 54-63. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.07>.

163. Kondratenko O. Development and Use of the Index of Particulate Matter Filter Efficiency in Environmental Protection Technology for Diesel-Generator with Consumption of Biofuels / O. Kondratenko, V. Andronov, V. Koloskov,

O. Stokov // 2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology: Conference Proceedings (13–17 September 2021, NTU «KhPI», Kharkiv). – Kharkiv: NTU «KhPI», 2021. – pp. 239–244. – DOI: 10.1109/KhPI Week53812.2021.9570034.

164. Kondratenko O. Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels / O. Kondratenko, V. Koloskov, S. Kovalenko, Y. Derkach, O. Stokov // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020: Conference Proceedings (05–10 October 2020, NTU «KhPI», Kharkiv). – Kharkiv : NTU «KhPI», 2020. – pp. 177–182. – DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250118.

165. Ju H.-j. Analysis of Characteristic Changes of Blended Very Low Sulfur Fuel Oil on Ultrasonic Frequency for Marine Fuel / H.-j. Ju, S.-k. Jeon // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol.10. – P. 1254. <https://doi.org/10.3390/jmse10091254>.

166. Солодовніков В.Г. Поліпшення експлуатаційних показників судових дизелів шляхом кавітаційної обробки палива / В.Г. Солодовніков // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 120-129. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-120-129.

167. 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.

168. 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.

169. Wärtsilä RTA58T – Maintenance Manual https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/08/mm-rta58t_2008-10.pdf. Дата звернення 19.12.23 р.

170. Сагін С.В. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил судових дизелів / С.В. Сагін, Т.О. Столярик // Суднові енергетичні

установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

171. Сагин С.В. Контроль реологических характеристик судовых моторных масел в процессе эксплуатации среднеоборотных дизелей / С.В. Сагин // Austria-science. – 2017. – № 7. – С. 29-33.

172. 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

173. Varbanets R. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis / R. Varbanets, V. Zalozh, A. Shakhov, I. Savelieva, V. Piterska // Diagnostyka. – 2020. – № 21(1). – P. 51-60. <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.

174. Сагін С.В. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками / С.В. Сагін, Т.О. Столярик // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 - 119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

175. Sagin S. Use of biofuels in marine diesel engines / S. Sagin, V. Madey, O. Volkov // Матеріали V міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2024». – 2021. – ОНМУ, 2024. <https://2024.depas.od.ua>.

176. Мадей В.В. Забезпечення екологічних показників судових дизелів шляхом використання палива біологічного походження // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)», 24-25 травня 2023 року. – Херсон : ХДМА. –2023. – С. 238-240.

177. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2009. URL: <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/FLUENT/flth.pdf> (дата звернення: 24.01.2021).

178. ANSYS ICEM CFD User Manual, 2012.
URL:[http://ptechgroup.ir/Virtual Education/Mechanics/ICEM-CFD/PTEC-ICEM CFD 14.5 User Guide.pdf](http://ptechgroup.ir/Virtual_Education/Mechanics/ICEM-CFD/PTEC-ICEM_CFD_14.5_User_Guide.pdf) (дата звернення: 24.01.2021).

179. 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.

180. Марченко О.О. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив / О.О. Марченко, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 10-14. – DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

181. Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згоряння : Серія підручників у 6 томах, Т. 5. Екологізація ДВЗ – 2-е видання / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, А.Ф. ШЕХОВЦОВ. За редакцією проф. А.П. Марченко. – Харків : Видавничий центр НТУ "ХПІ", 2014. – 348 с.

182. 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.

183. 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>.

184. Pham V C. Effects of Various Fuels on Combustion and Emission Characteristics of a Four-Stroke Dual-Fuel Marine Engine / V.C. Pham, B.-S. Rho, J.-S. Kim, W.-J. Lee, J.-H. Choi // J. Mar. Sci. Eng. – 2021. – Vol.9. – P. 1072. <https://doi.org/10.3390/jmse9101072>.

185. Lebedevas S. Research of Organic Rankine Cycle Energy Characteristics at Operating Modes of Marine Diesel Engine/ S. Lebedevas, T. Cepaitis // J.Mar. Sci. Eng. –2021. – Vol.9. – P. 1049. <https://doi.org/10.3390/jmse9101049>.

186. Varbanets R. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters / R. Varbanets etc. Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 321. [https://doi.org/ 10.3390/ jmse9030321](https://doi.org/10.3390/jmse9030321)

187. Савчук В.П. Система моніторингу шатунних підшипників колінчастих валів суднових двигунів внутрішнього згоряння / В.П. Савчук, Є.В. Білоусов, Д.О. Зінченко, М.О. Бойко // Розвиток транспорту. – 2022. – № 1(12). – С. 64-74. DOI : <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.06>.

188. Sultanbekov R. Research of the Influence of Marine Residual Fuel Composition on Sedimentation Due to Incompatibility / R. Sultanbekov, S. Islamov, D. Mardashov, I. Beloglazov, T. Hemmingsen // J. Mar. Sci. Eng. – 2021. – Vol.9. – P. 1067 <https://doi.org/10.3390/jmse9101067>.

189. Visan N.A. Study on the Cumulative Effects of Using a High-Efficiency turbocharger and Biodiesel B20 Fuelling on Performance and Emissions of a Large Marine Diesel Engine / N.A. Visan, R. Carlanescu, D.C. Niculescu, R. Chiriac // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol.10. – P. 1403 <https://doi.org/10.3390/jmse10101403>.

190. Ju H.-j. Ultrasound Irradiation on the Properties and Sulfur Contents of Blended Very Low-Sulfur Fuel Oil (VLSFO) / H.-j. Ju, S.-k. Jeon // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol.10. – P. 980. <https://doi.org/10.3390/jmse10070980>.

191. 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.

192. Мадей В.В. Екологічні та економічні аспекти використання в суднових дизелях палив біологічного походження / В.В. Мадей, О.М. Волков // 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. 201-204.

193. Sultanbekov R. Reduction of Sulphur in Marine Residual Fuels by Deasphalting to Produce VLSFO / R. Sultanbekov, K. Denisov, A. Zhurkevich, S. Islamov // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol.10. – P. 1765. <https://doi.org/10.3390/jmse10111765>.

194. 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.

195. 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>.

196. Мадей В.В. Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження / В.В. Мадей, О.М. Волков, О.О. Сторчак // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 55-68. doi: 10.31653/smf47.2023.55-68.

197. Tadros M. Effect of Hull and Propeller Roughness during the Assessment of Ship Fuel Consumption / M. Tadros, M. Ventura, C. Guedes Soares // J. Mar. Sci. Eng. – 2023. – Vol.11. – P. 784. <https://doi.org/10.3390/jmse11040784>.

198. Lebedevas S. Development and Validation of Heat Release Characteristics identification Method of Diesel Engine under Operating Conditions / S. Lebedevas, J. Žaglinskis, M. Drazdauskas // J. Mar. Sci. Eng. – 2023. – Vol.11. – P. 182. <https://doi.org/10.3390/jmse11010182>.

199. 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.

200. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.

201. Мадей В.В. Визначення оптимальних фаз подачі палива під час використання в суднових дизелях палива біологічного походження / В.В. Мадей // 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. 74-78.

202. Мадей В.В. Оптимізація процесу впорскування паливних сумішей / В.В. Мадей // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2024 – 21.03.2024.– Одеса : НУ «ОМА», 2024. – С. 54-56.

203. Мадей В.В. Управління процесом впорскування під час використання в суднових 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.

204. 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.

205. Paulauskas V. The Influence of Port Tugs on Improving the Navigational Safety of the Port / V. Paulauskas, M. Simutis, B. Plačiene, R. Barzdžiukas, M Jonkus, D. Paulauskas // J. Mar. Sci. Eng. – 2021. – Vol.9. – P. 342. <https://doi.org/10.3390/jmse9030342>.

206. Begovic E. KISS (Keep It Sustainable and Smart): A Research and Development Program for a Zero-Emission Small Crafts / E. Begovic, C. Bertorello, F. De Luca, B. Rinauro // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol.10. – P. 16. <https://doi.org/10.3390/jmse10010016>.

207. Кирилычев А.А. Решение задачи нормирования ходового времени и расхода топлива морского судна / А.А. Кирилычев, Н.В. Ивановский, С.П. Голиков, Д.Г. Куценко, В.А. Зеленцов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/3(60). – С. 28-32.

208. Kim K. Proposal of Zero-Emission Tug in South Korea Using Fuel Cell Energy Storage System: Economic and Environmental Long-Term Impacts/ K. Kim, K. Park, G. Roh, C. Choung, K. Kwag, W. Kim // J. Mar. Sci. Eng. – 2023. – Vol. 11. – P. 540. <https://doi.org/10.3390/jmse11030540>.

209. Мадей В.В. Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів / В.В. Мадей, О.М. Волков, С.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. - техн. зб. – 2022. – Вип. 28. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
 Національного університету
 «Одеська морська академія»
 д-р юрид. наук, професор
 Шемякін О. М.
 «19» січня 2024 р.



про використання результатів дисертаційної роботи **Мадєя Володимира Васильовича**
 на тему «**Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження**»
 в освітньому процесі Національного університету «Одеська морська академія»

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу Національного університету «Одеська морська академія» Пархоменко М.М., завідувач відділу аспірантури та докторантури к-т техн., наук, доцент Волков О.М., директор навчально-наукового інституту навігації, д-р техн., наук, професор Ворохобін І.І., директор навчально-наукового інституту інженерії, к-т техн., наук, професор Колегаєв М.О., склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Мадєя Володимира Васильовича на тему «Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження» впроваджені в освітній процес під час підготовки здобувачів освіти навчально-наукового інституту інженерії, навчально-наукового інституту навігації та аспірантури, а саме:

технологія створення паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження, технологія визначення оптимального вмісту палива біологічного походження в цих сумішах, а також технологія контролю показників робочого циклу судових дизелів – під час викладання освітніх компонентів «Технологія використання робочих речовин» та «Суднові двигуни внутрішнього згоряння» (для здобувачів наукового ступеня бакалавр);

послідовність визначення оптимальних кутів впорскування палива під час переведення судових дизелів на використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, – під час викладання освітніх компонентів «Екологічна безпека та альтернативні джерела енергії» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання в судових дизелях палива біологічного походження – під час викладання освітніх компонентів «Обробка та оцінка навігаційної інформації», «Організація логістичних систем», «Проблеми безпеки судноводіння та охорони навколишнього середовища» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

метод визначення втрат енергії, які необхідні для забезпечення екологічної стійкості морських засобів транспорту, – під час викладання освітніх компонентів «Процеси перетворення енергії судових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр) та «Енергоресурсозбереження на морському та внутрішньому водному транспорті» (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 навігації,
д-р техн., наук, професор

Ігор ВОРОХОБІН

Директор навчально-наукового інституту інженерії,
к-т техн., наук, професор

Михайло КОЛЕГАЄВ

ISO 9001

BUREAU VERITAS
Certification

АКТ ВПОВАДЖЕННЯ

окремих результатів дисертаційної роботи

Мадея Володимира Васильовича

«Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден
під час використання палива біологічного походження»

Цей акт свідчить, що технологія утворення паливних сумішей, що розроблена та запропонована Мадеєм Володимиром Васильовичем в дисертаційної роботі «Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження» була впроваджена в паливній системі суднового дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries спеціалізованого морського судна дедвейтом 14745 тонн, що забезпечило зниження на 18,3...23,3 % відносної зміни концентрації оксидів азоту у випускних газах, а також покращенню експлуатаційних показників дизеля.

Капітан т/х "Alicia"

Старший механік т/х "Alicia"



V. Hanford

O. Tertil

АКТ ВПОВАДЖЕННЯ

окремих результатів дисертаційної роботи

Мадея Володимира Васильовича

«Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден
під час використання палива біологічного походження»

Цей акт складений у тому, що вдосконалена паливна система, яка дозволяє утворювати та використовувати паливні суміші до складу яких входить паливо біологічного походження, були випробувана під час експлуатації суднових середньообертових дизелів 5Н17/28 Hyundai Heavy Industries, що встановлені на т/х “ARCOLA”.

Під час проведення досліджень був встановлений оптимальний вміст біопалива B99.9 FAME в його суміші з дизельним паливом RMB30, що забезпечило відносне зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах на 24,4...26,6 % та відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю у випускних газах на 18,9...23,6 %;

Старший механік т/х “ARCOLA”



І. Хустов



Pacific Drilling

11700 Katy Freeway / Suite 175
Houston / Texas / 77079
ph / +1 713334-6662
web / www.pacificdrilling.com

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Мадея Володимира Васильовича
на тему «**Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження**»,
спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Ми, що нижче підписалися, капітан m/v "Pacific Mistral" Грехам Андерсон та старший механік Іван Ткаченко склали цій акт, який свідчить, що окремі результати дисертаційної роботи **Мадея Володимира Васильовича** на тему «**Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження**» були використані під час експлуатації m/v "Pacific Mistral", а саме:

технологія корегування навігаційних переходів суден морського транспорту під час використання палива біологічного походження;

модуль підготовки паливних сумішей з оптимальним вмістом компонентів, що її складають – в паливній системі суднових допоміжних дизелів 5DC-17A Tier II Daihatsu,

що сприяло зниження емісії оксидів азоту на 23,8...24,3 % та зниженню об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах на 17,8...25,4 %.

Результати досліджень були схвалені відділом технічного менеджменту компанії Pacific Drilling.

Капітан m/v "Pacific Mistral"

Грехам Андерсон

Старший механік m/v "Pacific Mistral"

Іван Ткаченко

**АКТ**

про використання окремих результатів дисертаційної роботи

Мадея Володимира Васильовича

на тему «**Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження**»

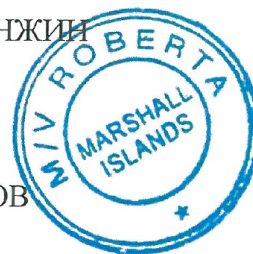
Цей акт складений та свідчить про те, що технологія забезпечення експлуатаційних показників роботи суднових дизелів шляхом корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, а також технологія управління екологічною безпекою суден морського транспорту шляхом використання палива біологічного походження, були апробовані, схвалені та рекомендовані до подальшого використання на суднових дизелях 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. Використання вказаних технологій забезпечило поліпшення екологічних та підтримання енергетичних показників дизелів.

Капітан m/v "Roberta",
капітан далекого плавання

Сергій ГАРАНЖИЙ

Старший механік m/v "Roberta",
механік I-го розряду

Андрій ЄРШОВ




Grace Fire Pte Ltd

20 Woodlands Link #06-26 Singapore 738733
 Tel: +65 6484 3515 Fax: +65 6484 0929
 Email: gracefiresafety@singnet.com.sg
 Business Reg No. / GST Reg No. : 201133019C


АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Мадея Володимира Васильовича

на тему «**Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження**»,
 спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Ми, що нижче підписалися, капітан т/х “ASKLIOIOS” Вацлав Полчер та другий механік Звонимир Крандеуш склали цей акт, який свідчить, що окремі результати дисертаційної роботи **Мадея Володимира Васильовича** на тему «**Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження**» були використані під час експлуатації т/х “ASKLIOIOS”, а саме:

блок дозування, що забезпечує утворення стійких паливних сумішей до складу яких входить палива біологічного та нафтового походження, – у паливній системі дизеля 6N165LW Yanmar судна класу General Cargo дедвейтом 14800 тонн, що сприяло більш ніж на 20 % зниженню емісії оксидів азоту та 15...20 % зниженню емісії оксидів вуглецю.

Результати досліджень були схвалені відділом технічного менеджменту компанії Grace Fire Pte Ltd.

Капітан
 т/х “ASKLIOIOS”

Другий механік
 т/х “ASKLIOIOS”



Вацлав Полчер

Звонимир Крандеуш