

Sagin A.C., Sagin C.B.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ФАЗ ПОДАЧІ ПАЛИВА В ЦИЛІНДР СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Розглянути питання щодо експериментального визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр дизеля під час зміни одного сорту палива на інший. Визначено, що відповідно до вимог Додатку VI Міжнародної конвенції MARPOL експлуатація суднових дизелів в деяких районах Світового океану можлива лише за умовою використання палива, вміст сірки в яких не перевищує 0,1 %. Важливо ретельно аналізувати паливо для дизельного двигуна, адже характеристики палива суттєво впливають на його роботу та екологічні показники. Під час використання такого палива швидкість згоряння та тиск у камері згоряння дизеля значно вище. Це може призвести до підвищеного зносу деталей двигуна та збільшення викидів оксидів азоту. Як метод, що сприяє попередженню або зменшенню негативної дії цих явищ запропоновано переналаштування паливної апаратури високого тиску, а саме зміна кутів впорскування палива. Дослідження виконувались на судні класу General Cargo з головним двигуном 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo. Ефективність методу оцінювалась за тиском згоряння, ступенем його підвищення, температурою та концентрацією оксидів азоту в випускних газах. Експерименти показали, що метод знижує всі ці показники, що свідчить про його позитивний вплив на екологічну стійкість роботи дизеля. Метод, заснований на зміні кутів впорскування палива, дозволяє покращити екологічні та енергетичні показники роботи суднових дизелів та може бути впроваджений під час експлуатації двигунів з електронною системою управління подачею палива.

Ключові слова: *впорскування палива, головна енергетична установка, динамічні навантаження, діагностування дизеля, екологічні показники, кут впорскування палива, морський транспорт, паливна апаратура, паливо для суднових дизелів, судновий дизель, теплові навантаження.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасні судна морського та внутрішнього флоту є життєво важливою ланкою в ланцюжку постачання, що з'єднує країни на різних континентах. Різноманітні вантажі, від готової продукції та сировини до зерна, нафти та газу, перевозяться морськими судами різної вантажопідйомності та призначення. [1, 2].

Від сучасних двигунів потребується не лише забезпечення необхідної потужності та надійності, а ще також відповідність сучасним екологічним нормам. Концентрація SO_x та NO_x у випускних газах – це два ключові показники екологічності, які регулюються MARPOL. Їх граничні значення залежать від року випуску та частоти обертання дизеля (Tier I, II або III) для NO_x та від вмісту сірки в паливі для SO_x [3-5]. Відповідно до цих вимог, вміст сірки в паливі що використовують судна не повинен перебільшувати 0,5 % та 0,1 % під час експлуатації судна в спеціальних зонах контролю [6-8].

Перехід дизельних двигунів на паливо з низьким вмістом сірки несе за собою ряд проблем, пов'язаних зі зміною його хімічного складу. Зниження концентрації сірки веде до зменшення густини, в'язкості та температури самозаймання. Збільшення швидкості згоряння та тиску під час згоряння може мати як позитивні, так і негативні наслідки. Тому важливо правильно налаштувати двигун для роботи з паливом з низьким вмістом сірки, щоб максимізувати позитивні ефекти та мінімізувати негативні. Це може включати: зміну параметрів впорскування палива, зміну тиску наддуву. З іншого боку збільшення швидкості

згоряння може призвести до збільшення навантаження на деталі двигуна та скорочення його ресурсу.

Двотактні дизелі більш чутливі до проблем, пов'язаних з раннім самозайманням та високою температурою при роботі з паливом з низьким вмістом сірки. Це пов'язано з збільшеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму та підвищеними ударними навантаженнями на підшипники. Результати моделювання для дизелів MAN-Diesel&Turbo з однаковим діаметром циліндра D , але різним ходом поршня S , наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання

Дизель та його характеристики	Характеристики палива		Температура наприкінці згоряння, К
	вміст сірки, %	теплотворна здатність, кДж/кг	
K80ME $D=0,8$ м, $S=2,3$ м	0,48...0,50	41580	1869
	0,4...0,45	41864	1878
	0,05...0,09	42180	1896
L80ME $D=0,8$ м, $S=2,592$ м	0,48...0,50	41596	1825
	0,4...0,45	41899	1839
	0,05...0,09	42241	1858
S80ME $D=0,8$ м, $S=3,056$ м	0,48...0,50	41695	1815
	0,4...0,45	41888	1836
	0,05...0,09	42240	1851
G80ME $D=0,8$ м, $S=3,72$ м	0,48...0,50	41595	1758
	0,4...0,45	41918	1762
	0,05...0,09	42260	1788

Зміна палива на сорти, що містять низку кількість сірки з одного боку забезпечує екологічні вимоги MARPOL, з іншого – через підвищення температури згоряння може призвести до акумуляції зайвої теплоти в деталях циліндрової групи та газовипускної магістралі дизеля, що сприяє підвищенню температурної напруженості та зростанню концентрації оксидів азоту в випускних газах [15-17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують методи боротьби з вказаними негативними наслідками, що виникають під час переведення дизелів на паливо з низьким вмістом сірки. До них відносяться додаткове зволоження стиснутого повітря, додаткове впорскування води в циліндр дизеля, використання системи перепуску та рециркуляції випускних газів, а також їх безпосередньо очищення. Для досягнення оптимальних результатів важливо обрати методи, що відповідають конкретному двигуну та умовам його роботи. Боротьба з негативними наслідками переходу на екологічне паливо, хоча й має рішення у вигляді стиснутого повітря, додаткового впорскування води та технологій зниження викидів NO_x , зумовлює зниження потужності двигуна, швидкості судна та потребує додаткових витрат [18-20]. Крім того, впровадження цих методів можливо лише на етапі будівництва дизелів, тому не може бути рекомендовано для суднових дизелів, що знаходяться в експлуатації. Найбільш сприятливим методом керування процесами згоряння під час використання палива з різними експлуатаційними характеристиками та структурним складом є зміна кутів впорскування палива. Також визначимо, що цей метод найбільш доцільний до використання в дизелях з електронним управлінням подачею палива.

Формулювання цілей статті. В зв'язку з викладеним, метою дослідження було розробка методу керування фазами впорскування під час тимчасового використання в суднових дизелів паливо з низьким вмістом сірки.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є процес експлуатації суднових дизелів з використанням палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %. Дослідження проводилося на спеціалізованому морському судні класу General Cargo. Як головний двигун на

судні був встановлений судновий дизель 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo. Як основні показники дизеля визначимо:

- діаметр циліндра – 0,50 м;
- хід поршня – 2,214 м;
- частота обертання вала – 117 об/хв;
- кількість циліндрів – 7;
- номінальна потужність – 12460 кВт.

Параметри роботи дизеля та характеристики випускних газів контролювалися за допомогою суднової системи діагностики, яка дозволяла виконувати їх визначення з відхиленням не більш $\pm 0,5\%$.

Під час досліджень дизель експлуатувався на трьох видах палива: в разі знаходження в зонах спеціального екологічного контролю SECAs – на дистильованому паливі DMB; в разі знаходження поза зон SECAs – на важких паливах RMK380 або RMG500. Основні характеристики палив наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики суднових палив

Характеристика	RMG500	RMK380	DMB
Вміст вуглецю, %	83,0	83,6	83,6
Вміст водню, %	10,3	10,5	11,4
Вміст сірки, %	0,46	0,48	0,06
Густина за 15 °C, кг/м ³	991	996	892
В'язкість за 50 °C, мм ² /с	500	380	6
Температура спалаху, °C	88	92	64
Температура самозаймання, °C	216	231	111
Теплотворна здатність, кДж/кг	41056	40953	42444

Перехід суднових дизелів на паливо з меншим вмістом сірки призводить до збільшення навантажень і погіршення екологічних показників. Зміну кута випередження впорскування було обрано як метод регулювання фаз подачі палива. [21, 22]. Оптимальні значення кута випередження впорскування визначаються заводом-виробником під час стендових випробувань для номінального режиму роботи та палива, характеристики якого найбільш узгоджуються з сортами палива, на яких в майбутньому працюватиме дизель. Під час експлуатації дизелів судновий екіпаж враховує рекомендації заводу-виробника щодо найбільш оптимального діапазону кутів впорскування палива та в разі необхідності виконує переналаштування паливної апаратури з урахуванням саме цих значень. Відповідно з цим, технологія досліджень передбачала переналаштування системи подачі палива під час знаходження судна в SECA шляхом зміни кутів випередження для окремих циліндрів.

Переналаштування системи подачі палива дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo виконувалось в такій спосіб. Відповідно до рекомендацій заводу-виробнику, подачу палива в циліндр дизеля необхідно виконувати в діапазоні $-1...+5^{\circ}$ кутів повороту колінчатого валу (пкв). Для циліндру №4 значення куту впорскування палива (для якого відбувалась експлуатація дизеля під час використання палива RMG500) залишилося незмінним і становило $+2^{\circ}$ пкв.

Для циліндрів №№ 1, 2, 3, 5, 6, 7 встановлювались нові кути випередження подачі палива: $+5, +4, +3, +3, +4, +5^{\circ}$ пкв відповідно. Встановлення однакових кутів впорскування палива в двох циліндрах (в першому та сьомому, другому та шостому, третьому та п'ятому) застосування даного методу дало змогу розширити масив даних, покращити точність вимірювань та вносити корективи у разі їх відхилення.

Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск горіння p_z , тиск в кінці стиску p_c та температура випускних газів t_f . Для кожного з наведених параметрів розраховувалося середнє значення. Наприкінці кожної серії експериментів всі циліндри дизелі

переводились на однаковий кут впорскування, після чого виконувалось вимірювання кількості оксидів азоту в випускних газах дизеля. Вимірювання цього показнику виконувалось послідовно для всього діапазону кутів впорскування палива, тобто +5, +4, +3, +2° пкв. Результати експериментів наведені в таблиці 3 та подані в вигляді номограм – рис. 2.

Таблиця 3 – Результати досліджень

Показник	Номер циліндру						
	1	2	3	4	5	6	7
Кут впорскування палива, θ , °пкв	+5	+4	+3	+2	+3	+4	+5
Тиск в циліндрі наприкінці процесу згоряння, p_z , МПа	14,7	14,65	14,55	14,35	14,45	14,58	14,76
Тиск в циліндрі наприкінці процесу стиснення, p_c , МПа	11,62	11,65	11,52	11,53	11,48	11,6	11,58
Температура випускних газів, t_r , °C	397	385	373	367	376	388	403
Концентрація оксидів азоту в випускних газах, NO_x , г/(кВт·год)	12,35	12,52	12,83	13,38	13,07	12,58	12,22
Ступінь підвищення тиску під час згоряння палива, λ	1,271	1,266	1,258	1,240	1,249	1,260	1,276

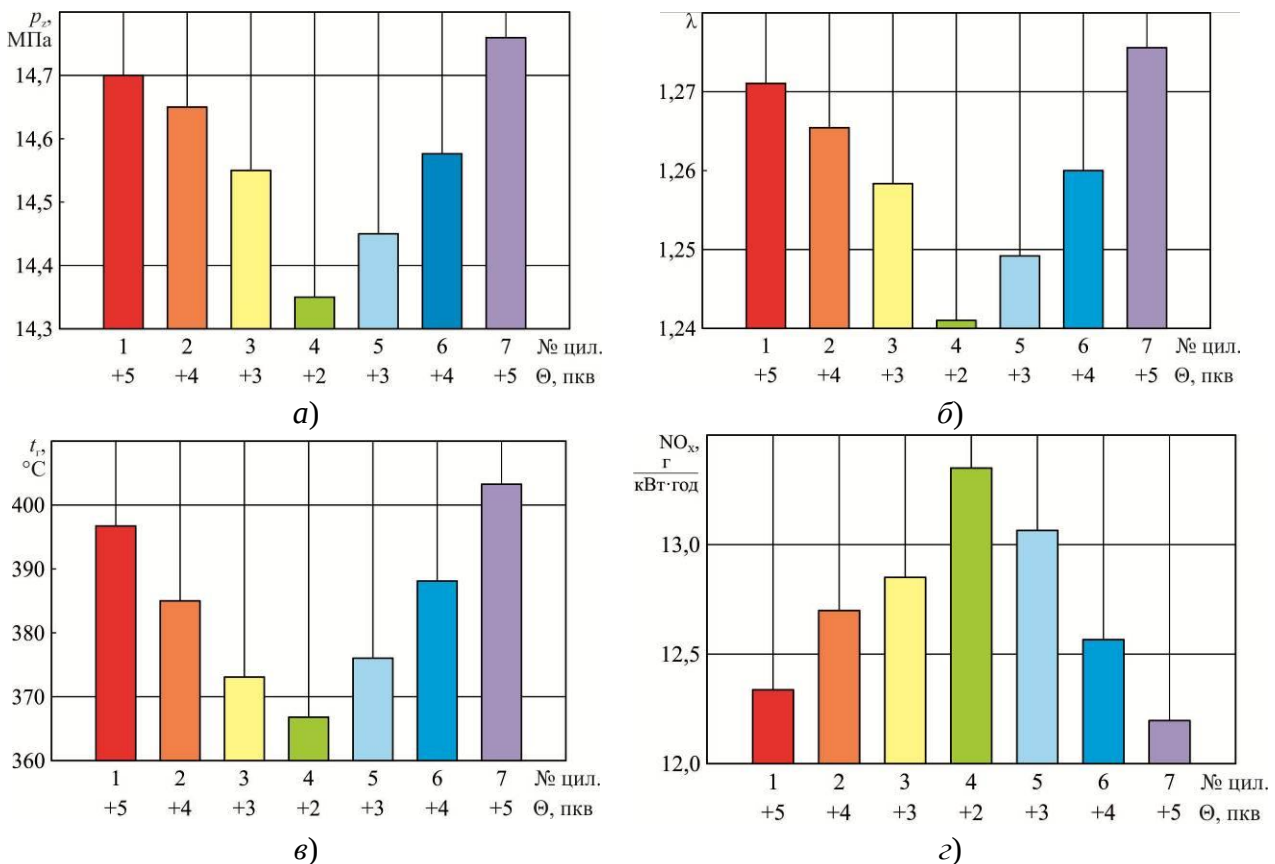


Рисунок 2 – Зміна показників роботи суднового двигуна

7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo за різних кутів впорскування палива θ :

а – максимальний тиск під час згоряння; б – температура випускних газів; в – ступінь підвищення тиску під час згоряння; г – концентрація оксидів азоту в випускних газах

Відносна зміна контрольованих показників роботи дизеля, яка може характеризувати екологічну – ΔNO_x , теплову – Δt_r та динамічну – $\Delta \lambda$ стійкість, розраховувалась за виразами:

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^{Tier} - NO_x^i}{NO_x^{Tier}} \cdot 100\%; \quad \Delta t_r = \frac{t_r^{max} - t_r^i}{t_r^{max}} \cdot 100\%; \quad \Delta \lambda = \frac{\lambda^{max} - \lambda^i}{\lambda^{max}} \cdot 100\%;$$

де NO_x^{Tier} – максимальне значення викидів оксидів азоту відповідно до Додатку VI MARPOL;

t_r^{max} , λ^{max} – максимальні значення температури випускних газів та ступеня тиску;

NO_x^i , t_r^i , λ^i – відповідно, значення концентрації оксидів азоту в випускних газах, температури випускних газів та ступеня підвищення тиску, що були отримані під час проведення експерименту [27, 28].

Результати, що отримані під час розрахунку, наведені в таблиці 4 та подані на рис. 3.

Таблиця 4 – Показання запасу стійкості дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo

Показник	Кут повороту колінчатого валу						
	+5	+4	+3	+2	+3	+4	+5
Екологічна стійкість, %	14,24	13,06	10,90	7,08	9,241	12,64	15,15
Температурна стійкість, %	1,49	4,47	7,44	8,93	6,70	3,72	0
Динамічна стійкість, %	0,41	0,75	1,42	2,78	2,10	1,22	0

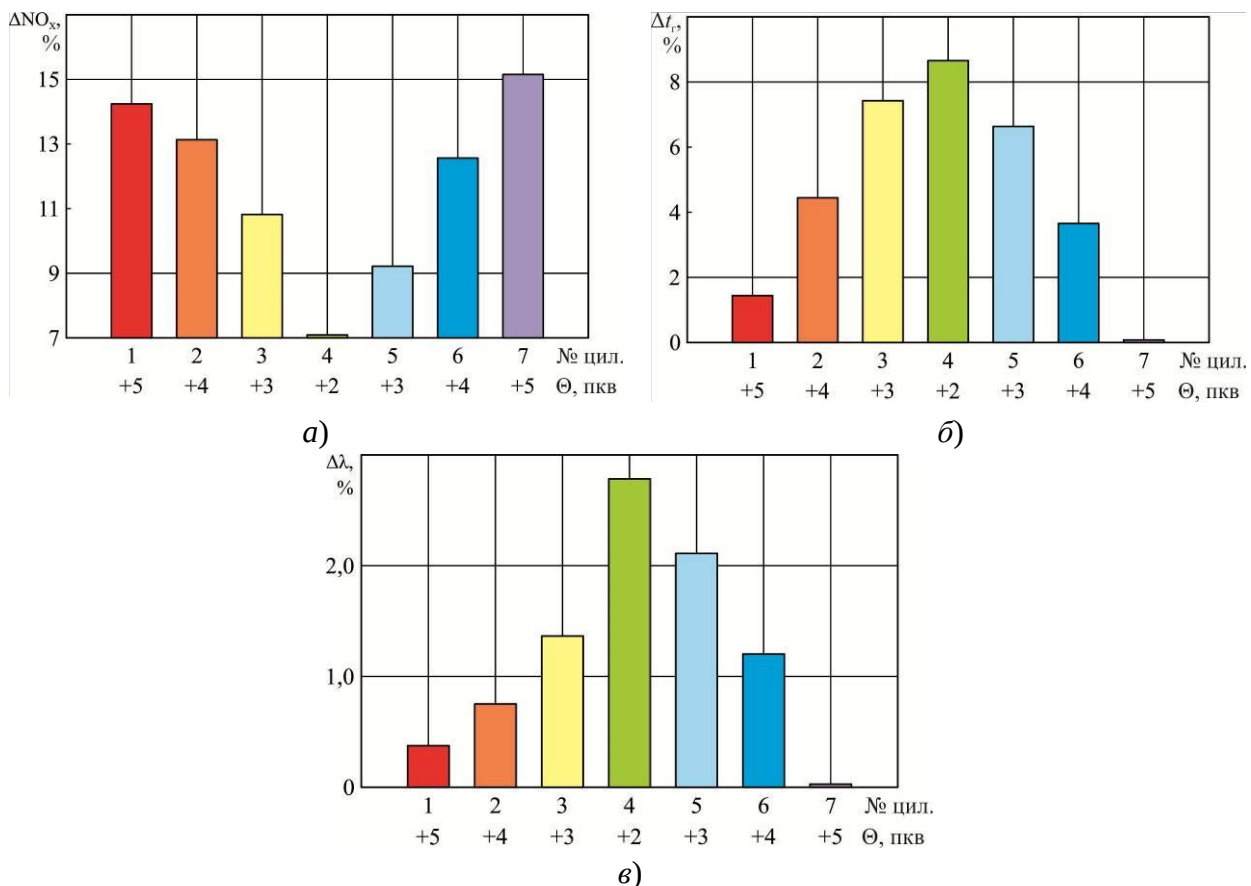


Рисунок 3 – Екологічна (а), теплова (б), динамічна (в) стійкість роботи суднового дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo за різних кутів впорскування палива θ

Проведення всіх експериментів було погоджено з технічним відділом судноплавної компанії, яка здійснює менеджмент судна та його енергетичної установки [29, 30].

Під час проведення експериментів все відбувалось згідно нормам та рекомендованим показникам дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo.

Висновки. На підставі виконаних досліджень визначимо наступне.

1. Переведення роботи дизелів на використання палива з низьким вмістом сірки, якій є обов'язковим під час експлуатації дизелів в екологічних зонах SECAs, може призвести до

інтенсифікації згорання, збільшення теплових та динамічних навантажень на дизель та погіршення екологічних показників його роботи.

2. Як метод, що попереджує збільшення теплової та динамічної напруженості дизеля в разі його тимчасового переведення на палива з низьким вмістом сірки, може використовуватися переналаштування паливної апаратури високого тиску дизеля, яке полягає в зміні кутів впорскування палива.

3. Експериментальними дослідженнями, що були проведені на судновому дизелі 7S50ME-B9.3-TPI MAN-Diesel&Turbo під час його переведення з важкого палива RMG500 зі вмістом сірки 0,46 % на дистильатне паливо DMB зі вмістом сірки 0,06 %, встановлено наступне:

збільшення кута випередження впорскування від +2 до +5°пкв призводить до зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах – зі значень 13,38 г/(кВт·год) до значень 12,22 г/(кВт·год), що забезпечує 2,1-кратне підвищення екологічної стійкості роботи дизеля;

одночасно з цим підвищується тепла та динамічна напруженість роботи дизеля, що вимагає додаткового контролю та регулювання.

4. Запропонований метод найбільш доцільно використовувати в двотактних та чотиритактних дизелях з електронною системою управління впорскуванням палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
3. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.
4. Тимошук О.М., Мельник О.В. Дослідження безпеки бункерування на водному транспорті // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.
5. 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 Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.
6. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.
7. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
8. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
9. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: науч.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – С. 84-103.
10. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
11. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих

- жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
12. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
13. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – С. 79-89.
14. Сагін С. В. Зниження механічних втрат у судових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
15. Богом'я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.
16. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
17. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.
18. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
19. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – С.109-118.
20. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб. – 2011. – № 26. – С.116-125.
21. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
22. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
23. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
24. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol.10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
25. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotyskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
26. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.

27. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Vienna. –2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
28. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
29. Голіков В.А., Нікольський В.В., Левінський М.В., Нікольський М.В., Слободянюк М.В. Модернізація системи віддаленого управління та контролю аварійного дизель-генератора навчального машино-котельного відділення // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2022. – № 44. С. 64-70. 10.31653/smf44.2022. 64-70.
30. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Pířtěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – P. 120221. doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.

REFERENCES

1. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
3. Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Parmenova D.G. Management techniques for self-assessment of shipboard safety management system efficiency // *Water transport*. – 2023. – Vol. 1(37). – C. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.
4. Timoshchuk O.M., Melnik O.V. Research of safety of bunking on maritime transport // *Water transport*. – 2020. – Vol. 1(29). – P. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.
5. 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 Marine Science and Engineering*. – 2022. –Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.
6. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // *Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.
7. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // *American Scientific Journal*. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
8. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Marine diesel exhaust gas management to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities*. – 2018. –№ 24. – P.72-80.
9. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
10. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
11. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // *Automation of ship technical facilities*. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
12. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
13. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship technical facilities*. – 2019. – Vol. 25. – P. 79-89.
14. Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine medium-speed diesel engines due to optimization of lubrication circulation systems // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2020. – Vol. 1(61). – P. 87 -96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

15. Bohomia V., Bazhak O. // Water transport – 2022. – Vol. 1(35). – P. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.
16. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – Vol. 4(57). – P. 109-120.
17. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142.
18. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – Vol. 1(58). – P. 89-100.
19. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // Ship power plants. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.
20. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // Ship power plants. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
21. Sagin S.V., Zablotsky Yu. V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
22. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
23. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // Ship power plants. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
24. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.
25. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022. – Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
26. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
27. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna. – 2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
28. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // Scientific Horizons. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
29. Golikov V., Nikolskyi V., Levinskyi M., Nikolskyi M., Slobodianiuk M. Emergency diesel generator remote control system upgrade in training engine room // Ship power plants. – 2022. – № 44. C. 64-70. 10.31653/smf44.2022. 64-70.
30. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Pištěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – P. 120221. doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.

Sagin A.S., Sagin S.V.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF OPTIMAL PHASES OF FUEL SUPPLY TO THE CYLINDER OF MARINE DIESEL ENGINES

Consider the issue of experimental determination of the optimal phases of fuel supply to the diesel cylinder during the change of one type of fuel to another. It was determined that in accordance with the requirements of Annex VI of the MARPOL International Convention, the operation of marine diesel engines in some areas of the world ocean is possible only under the condition of using fuel with a sulfur content of no more than 0.1 %. Similar types of fuel are characterized by a lower auto-ignition temperature and higher calorific value. During combustion, this leads to an increase in the rate of fuel combustion and the degree of pressure increase during combustion, precisely because of this, the dynamic loads on the parts of the cylinder-piston group and diesel engine bearings increase. Also, this (due to the increase in temperature at the end of combustion) creates conditions for an increase in the concentration of nitrogen oxides in diesel exhaust gases. Reconfiguration of the high-pressure fuel equipment, namely changing the fuel injection angles, is proposed as a method that contributes to the prevention or reduction of the negative effects of these phenomena. The research was carried out on a General Cargo class vessel with a 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo main engine. Combustion pressure, the degree of pressure increase during combustion, the temperature of exhaust gases, and the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases were chosen as the indicators for evaluating the use and implementation of the proposed method. It has been experimentally proven that this results in an increase in the environmental sustainability of diesel operation by 7.08-15.15 %, an increase in thermal stability – up to 8.93 %, and an increase in dynamic stability – up to 2.72 %. This is due to the shift of the self-ignition and combustion process towards expansion and the corresponding decrease in pressure and temperature at the end of combustion. The most favorable use of this method is on modern diesel engines that have an electronic fuel injection control system, so they do not require mechanical reconfiguration of fuel pumps. Taking this into account, the method based on the change of fuel injection angles is defined in such a way as to ensure the maintenance of environmental and energy indicators of marine diesel engines during their transfer from one type of fuel to another.

Key words: diesel diagnostics, dynamic loads, environmental indicators, fuel equipment, fuel for marine diesels, fuel injection angle, fuel injection, main power plant, marine diesel, marine transport, thermal loads.