

Сазін С.В., Заблоцький Ю.В., Сазін А.С.

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ РОБОТИ СУДНОВИХ СЕРЕДНЬООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Надані результати досліджень, щодо визначення впливу паливних присадок на економічні показники роботи суднових дизелів. Експерименти виконувались на судні класу Container ship необмеженого району плавання, здатного для перевезення 9850 TEU-контейнерів (до 620 з яких – рефрижераторні). Дослідження виконувались на чотирьох однотипних суднових дизелях Wartsila 6L32, що використовувались як допоміжні дизель-генераторів. Дизелі експлуатувались на дистильованих паливах DMA20 (зі вмістом сірки 0,077 % за масою) та RMG450 (зі вмістом сірки 0,46 % за масою). У разі знаходження судна у спеціальних екологічних районах експлуатація дизелів виконувалася на паливі DMA20, під час знаходження судна поза цих районів – на паливі RMG450. Як паливні присадки використовувались продукти фірми Drew Marine: Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus. В трьох дизелях Wartsila 6L32 використовувалась паливна суміш, яка складалась з палива нафтового походження (RMG450 або DMA20) та паливної присадки Amergy 1000, паливна суміш з RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergize, з RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergy XLS Plus. Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання біодизельного палива FAME. Один з дизелів експлуатувався виключно на паливі RMG450 або DMA20, без використання паливної присадки. Під час проведення експериментальних досліджень дизелі Wartsila 6L32 експлуатувались рівні проміжки часу на важкому паливі RMG450 або DMA20 з різними паливними присадками Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus. При цьому їх експлуатація виконувалась на навантаженнях 50 %, 60 %, 70 %, 80 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 1...3 години і залежала від умов плавання судна. Метою першого етапу дослідження було визначення з вказаних присадок такої, яка сприяє найкращій економічності роботи дизеля – а саме забезпечує мінімальну питому витрату палива. Як така присадка були визначена паливна присадка Amergy XLS. Завданням другого етапу було визначення оптимальної концентрації присадки в паливі. Це дало можливість визначити концентрацію, яка забезпечує мінімальну питому витрату палива, що сприяє підвищенню економічності роботи суднових середньообертових дизелів

Ключові слова: дистильоване паливо, економічність роботи, морський транспорт, паливна присадка, концентрація, питома витрата палива, судновий дизель-генератор, судновий середньо обертовий дизель

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Морський та внутрішній водний транспорт забезпечує перевезення вантажу між країнами та континентами, що поєднані річками або роз'єднані морями та океанами. При цьому судна морського транспорту є єдиним засобом транспорту, який забезпечує трансокеанське перевезення вантажів.

Рух морських та річкових суден неможливий без використання теплових двигунів (парових або газових турбін, а також двигунів внутрішнього згоряння). Сучасні тенденції використання сонячної енергії, гнучких та жорстких вітрил, а також акумуляторних батарей здатні лише частково компенсувати потреби судна в енергії. Крім того, подібні технології поки що перебувають у стадії розробки, розвитку та вдосконалення. Тому на сьогоднішній день існують поодинокі приклади використання подібних енергетичних установок та, відповідно, подібних суден.

Головними та допоміжними двигунами на морських судах є двигуни внутрішнього згоряння / дизелі [1, 2]. Саме цей тип теплових двигунів має найвищий коефіцієнт корисної дії та найнижчу питому витрату палива [3, 4]. Дизелі – основний тип теплових двигунів, що забезпечує рух морських суден, а також функціонування їх систем та механізмів [5, 6]. Сучасні альтернативи судовим дизелям, якими є сонячні батареї, вітрогенератори, жорсткі вітрила та скайт вітрила, акумуляторні батареї, паливні елементи можуть забезпечити енергетичні потреби морських суден лише за певних умов та обмежений період часу.

Отримання ефективної потужності в судових дизелях неможливе без використання в них рідкого палива нафтового походження. Нині є лише поодинокі приклади дизелів, функціонування яких забезпечується з допомогою використання газового палива [7, 8].

В останні роки на транспортних судах морського та внутрішнього водного транспорту для середньооберткових дизелів (СОД) все ширше застосовуються важкі сорти палива високої в'язкості, що мають більш низьку вартість [9-11]. Згідно з вимогами таких провідних фірм, що будують дизелі, як Wartsila-Sulzer, MAN Diesel & Turbo судові СОД повинні надійно експлуатуватися на всіх режимах (в тому числі на пускових і перехідних) під час використання палив з в'язкістю до 500 мм²/с. Перспективи розвитку транспортного суднобудування із застосуванням СОД в світовій практиці тісно пов'язані з використанням подібних видів палива. При цьому слід зазначити, що важкі сорти палива використовуються для роботи як головних СОД, що передають свою потужність на рушій, так і допоміжних, які є приводом електричних генераторів. Крім того, в судову практику чітко простежується тенденція використання важких сортів палива не тільки для сучасних моделей СОД, а також переведення СОД попередніх моделей (спроектованих з умовою їхньої роботи на легких сортах палива) на експлуатацію на паливі з підвищеною в'язкістю [12-15].

Використання в судових дизелях палив підвищеної в'язкості перш за все пов'язано зі намаганням зменшити експлуатаційні витрати на придбання рідкого палива. Одночасно з цим підвищенню економічності роботи судових дизелів сприяє не лише вартість палива, але також визначення оптимальних режимів його використання, а також впровадження сучасних технологій, що підвищують якість його збереження, транспортування та згоряння. До однієї з технологій, яка спрямована на підвищення економічності роботи дизелів морських суден, відноситься використання паливних присадок. При цьому фірми-виробники не рекомендують суворо визначений діапазон концентрації паливних присадок під час їх додавання в паливо. Як правило в інструкціях з їх використання вказується лише можливий діапазон цієї концентрації, при чому в більшості випадків нижні та верхні межі цього діапазону відрізняються один від одного в декілька разів. Це призводить до перевитрати паливних присадок, що, в зв'язку з їх більшою в порівнянні з нафтовим паливом вартістю, зменшує економічну ефективність використання. Також невірно обрана концентрація паливних присадок може призвести до того, що для цього випадку буде спостерігатися більше значення питомої витрати палива в порівнянні з режимом експлуатації дизеля з використанням іншої (оптимальної) концентрації паливної присадки [16-18].

Вказане підкреслює актуальність проведення досліджень, спрямованих на визначення оптимальної концентрації паливних присадок в паливі нафтового походження, перш за все це буде сприятиме підвищенню економічності роботи судових дизелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Присадки до судових палив в даний час набули досить широкого поширення на судах, однак результат їх застосування не завжди отримує однозначну оцінку [19-22]. Це пов'язано з різними причинами, які, перш за все, залежать від характеристик дизеля та елементів його паливної системи, а також від забезпечення правильної технології використання присадок та необхідності підтримання екологічності роботи судна [23-28]. Використання присадок до палива також обмежується діапазоном концентрації, яку рекомендують фірми-виробники. При цьому ці рекомендації не визначають оптимальну концентрацію присадки, яка в більшості випадків залежить від характеристик дистильованого палива, до якого вона додається, від технічного стану та навантаження на судовий дизель, а також від коректності її додавання до об'єму палива, що знаходиться в паливній системі [29-32].

Формулювання цілей статті. На даний момент конструктивне і технологічне виконання судових двигунів внутрішнього згоряння досягло своєї досконалості, що забезпечує мінімальні

питомі витрати палива даних типів теплових двигунів в порівнянні з іншими. У зв'язку з цим метою дослідження було визначення впливу паливних присадок на економічність роботи дизелів морських суден.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на судні класу Container ship необмеженого району плавання, здатного для перевезення 9850 TEU- контейнерів (до 620 з яких – рефрижераторні). Дослідження виконувались на чотирьох однотипних судових дизелях Wartsila 6L32, що використовувались як допоміжні дизель-генераторів. Основні характеристики дизелів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики судових дизелів Wartsila 6L32

Показник	Значення
Тип	Чотиритактний, тронковий, з наддувом, з охолодженням прісною водою та циркуляційною системою мащення
Діаметр циліндра, м	0,32
Хід поршня, м	0,40
Частота обертання, хв ⁻¹	720
Кількість циліндрів	6
Потужність, кВт	3210

Експлуатація дизелів вироблялась на двох видах топлива – DMA20 (при плаванні судна в районах SECAs) і RMG450 (при плаванні судна в районах SECAs). Основні характеристики топлив DMA20 та RMG450 приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики моторних палив

Характеристика	Марка палива	
	DMA20	RMG450
Густина при 20°C, кг/м ³	878	922
В'язкість при 40°C, мм ² /с	19,4	446
Вміст сірки, %	0,077	0,46
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	43320	40020

Розміщення дизелів Wartsila 6L32 в машинному відділенні судна показано на рис. 1.

Паливна система кожного з дизелів передбачала дозування до загального потоку палива, яке прямує до паливних насосів високого тиску, паливної присадки, що забезпечувалось за допомогою дозерної установки [33, 34].

Як паливні присадки використовувались продукти фірми Drew Marine: Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus, що мають наступні основні характеристики.

Паливна присадка Amergy 1000 – суміш органічних компонентів, призначена для забезпечення повнішого згорання і максимального використання енергії, що отримується від палива [35, 36]. Її можна використовувати в дизелях для різних видів палива, від дистилату до залишкових сортів. Забезпечуючи повніше згорання, Amergy 1000 знижує кількість вихлопних часток і відкладень нагару. Завдяки такій дії, поверхні камери згорання підтримуються в чистішому стані, скорочуються витрати на ремонт, а також зменшуються витрати палива. Amergy 1000 не містить металів і повністю поглинається в процесі згорання. Норма дозування Amergy 1000 – 1 літр на 1...8 тонн палива (1 / 1000...1 / 8000). Оптимальне дозування, проте, може розрізнятися залежно від конструкції двигуна, якості палива і експлуатаційних умов. Amergy 1000 подається безперервно в паливну систему. Це краще всього досягається за допомогою дозуючого насоса або через

витратомір. Така організація подачі препарату забезпечує належну дисперсію і рівномірний рівень розчинення в паливі.



Рисунок 1 – Розміщення суднових дизелів Wartsila 6L32F в машинному відділенні

Паливна присадка Amergize – суміш розчинних в мастилі органометаллів, найбільш ефективна для дизелів, що працюють на важкому паливі. Випробування присадки Amergize в двигунах показали, що поєднання інгредієнтів в Amergize забезпечує синергетичний ефект, що дозволяє знижувати відкладення і покращувати згорання. Amergize підходить як для середньо-, також і для малообертових дизелів, в яких виникають проблеми, пов'язані із згоранням і відкладеннями на внутрішніх поверхнях дизеля через наявність в паливі ванадію, сірки і натрію. Перетворювач відкладень в Amergize діє під час процесу згорання, вступаючи в реакцію з цими речовинами (ванадій, сірка, натрій) і змінюючи склад золи, що зменшує механічні втрати на подолання сил тертя. Стандартне дозування Amergize в межах 1 літр на 1...8 тонн палива. Дози можуть змінюватися залежно від рівня забруднення палива, конструкції двигуна і експлуатаційного стану енергетичної установки [37, 38].

Паливна присадка Amergy XLS Plus призначена для низько сірчистих палив. Amergy XLS Plus – це суміш дисперсантів, активаторів згорання, миючих засобів і мастильних присадок, призначена для зведення до мінімуму наслідків паливної нестабільності і зносу металевих поверхонь, що знаходяться в безпосередньому контакті один з одним. Палива з низьким вмістом сірки володіють низькими мастильними властивостями, необхідними для мінімізації безпосереднього контакту

металевих деталей паливної системи і двигуна. Таким чином, тривале використання дизельного палива з низьким вмістом сірки може призвести до надмірного зносу плунжерних пар паливних насосів високого тиску, а також розпилювачів форсунок. Присадка до палива Amergy XLS містить високоефективні мастильні компоненти, які зводять до мінімуму прямий контакт металевих частин і збільшують термін служби елементів паливної системи, дозволяючи використовувати низько сірчисті види палива. Рекомендоване фірмою Drew Marine дозування Amergy XLS Plus в межах 1 літр на 1...8 тонн палива.

Принципова схема паливної системи дизелів наведена на рис. 2.

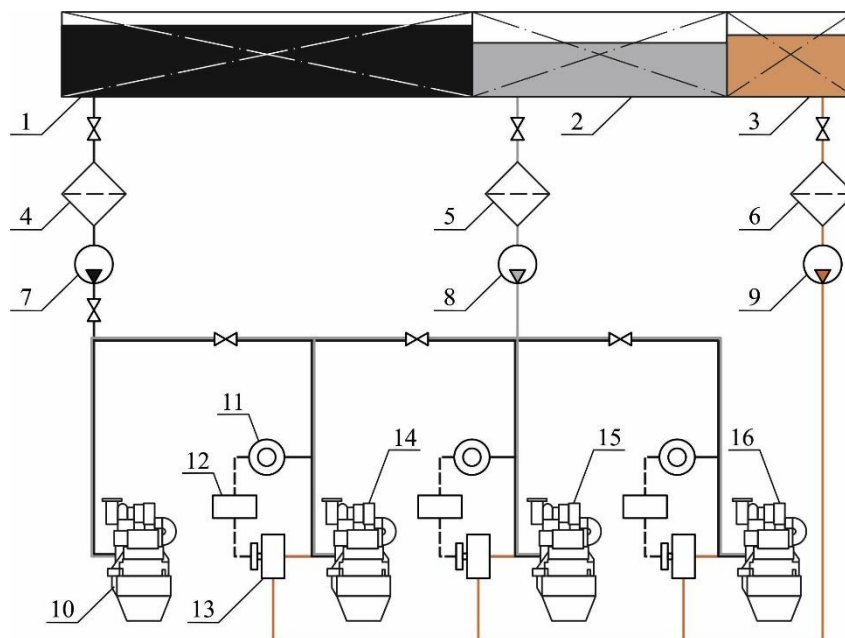


Рисунок 2 – Принципова паливна схема суднових дизелів Wartsila 6L32:

1 – витратна цистерна палива RMG450; 2 – витратна цистерна палива DMA20;

3 – витратна цистерна паливних присадок; 4, 5, 6 – паливні фільтри для палив RMG450, DMA20 та паливних присадок відповідно; 7, 8, 9 – паливні насоси для палив RMG450, DMA20 та паливних присадок відповідно; 10, 14, 15, 16 – дизелі;
11 – витратомір; 12 – мікроконтролер; 13 – дозатор

Експлуатація дизелів виконувалась в такій спосіб. Під час знаходження судна поза екологічних районів експлуатація дизелів здійснювалась на паливі RMG450, яке знаходилося у витратному танку 1. Стан палива RMG450 (насамперед його густина, в'язкість та температура) дозволяв його подачу до паливної апаратури дизелів 10, 14, 15, 16. Це забезпечувалось паливним насосом 7 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 4. Кількість одночасно працюючих дизелів визначалась залежно від загального навантаження на судову електростанцію, при цьому у будь-яких випадках не перевищувало трьох.

Під час знаходження судна в особливих екологічних районах експлуатація дизелів здійснювалась на паливі DMA20, яке знаходилося у витратному танку 2. Вміст сірки в паливі не перевищував 0,1 %, що забезпечувало вимоги Аппех VI MARPOL. Подача палива DMA20 до дизелів здійснювалась паливним насосом 8 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 5.

Крім вказаних варіантів, експлуатацію дизелів також можливо було виконувати з використанням паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus. Подача паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus до дизелів здійснювалась паливним насосом 9 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 6. Вміст паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus в складі палива змінювався відповідно до рекомендацій фірми-виробника. Дозування паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus забезпечувалось дозатором 13, якій

встановлювався на магістралі їх подачі до кожного з дизелів. Кількість паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus в суміші залежало від витрати палива RMG450 або DMA20, яке контролювалось витратоміром 11. Управління роботою дозатора 13 паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus забезпечувалось мікроконтролером 12. Використання суміші палива RMG450 або DMA20 та паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus було можливе для дизелів 14, 15, 16. При цьому в дизелі 14 використовувалась паливна суміш, яка складалась з палива нафтового походження (RMG450 або DMA20) та паливної присадки Amergy 1000; в дизелі 15 – паливна суміш з RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergize; в дизелі 16 – паливна суміш з палива RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergy XLS Plus. Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання біодизельного палива FAME. Дизель 10 експлуатувався виключно на паливі RMG450 або DMA20, без використання паливної суміші, до складу якої входили паливні присадки.

Основні параметри роботи паливної системи (тиск, витрата, температура, в'язкість палива) контролювалися та підтримувалися автоматично. Також автоматично підтримувалася частота обертання та навантаження допоміжних двигунів Wartsila 6L32 [39-41]. Крім того, автоматично підтримувався розподіл навантаження між кількома допоміжними двигунами (двома або трьома) у разі їхньої паралельної роботи. Дизелі були обладнані системою діагностики ProPower, яка забезпечувала контроль основних показників робочого процесу – тиску згоряння p_z , ефективної потужності N_e , питомої ефективної витрати палива b_e , температури випускних газів t_f . Система ProPower також здійснювала контроль та аналіз випускних газів дизелів, у тому числі визначення концентрації оксидів азоту NO_x [42, 43]. Система ProPower відноситься до сучасних систем діагностики робочого процесу суднових дизелів та використовується на великій кількості морських суден [44, 45].

Споживачами енергії суднових дизелів Wartsila 6L32 були машини та механізми суднових систем, а також рефрижераторні контейнери, які разом зі звичайними контейнерами транспортувались судном (саме через наявність рефрижераторних контейнерів допоміжна енергетична установка судна характеризувалась високою потужністю). Їх кількість для кожного з морських переходів була різною, але не змінювалась під час транспортування. Це забезпечувало різні між собою, але майже постійні на протязі одного морського переходу навантаження на судову електростанцію (та відповідно на судові дизелі Wartsila 6L32, які виконували функції допоміжних). При цьому експлуатаційні режими судової електростанції забезпечувались 50 %, 60 %, 70 % та 80 % навантаженням на судові дизелі, на яких виконувались дослідження.

Метою першого етапу дослідження було визначення з вказаних присадок такої, яка сприяє найкращої економічності роботи дизеля – а саме забезпечує мінімальну питому витрату палива. Технологія випробувань полягала в наступному. Один з чотирьох дизелів (перший) експлуатувався на паливі без додавання паливної присадки. Три з чотирьох дизелів використовували під час роботи паливну присадку: другий – Amergy XLS, третій – Amergy 1000, четвертий – Amergize. Схожі рекомендовані значення дозування присадок дозволяли їх використання в кожному з дизелів з однаковою концентрацією, за яку була прийнята 1 літр присадки на 4 тонни палива. З метою забезпечення коректності проведення досліджень на кожному з чотирьох дизелів та можливості подальшого порівняння результатів експерименту, створювались умови, що забезпечували однакове навантаження на дизелі, а також однаковий час експлуатації дизелів.

Питома ефективна витрата палива b_e , кг/(кВт·год) розраховувалась за виразом:

$$b_e = B_{\text{год}} / N_e ;$$

де $B_{\text{год}}$ – годинна витрата палива, кг/год, яка визначалась за показаннями витратоміру, що встановлено на магістралі подачі палива;

N_e – експлуатаційна потужність дизеля, кВт.

Зміна значень питомої витрати палива для різних умов проведення експерименту наведена на рис. 3.

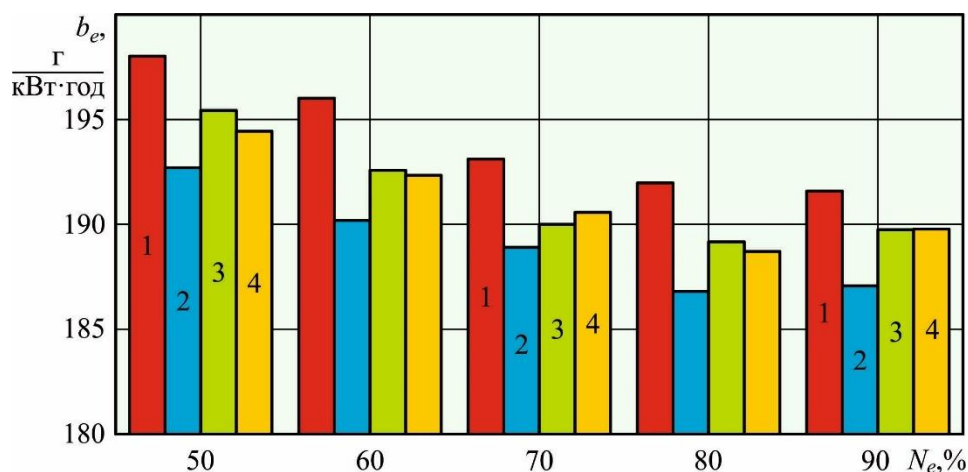


Рисунок 3 – Питома витрата палива на різних навантаженнях суднового середньобертового дизеля Wartsila 6L32F:

1 – робота дизеля без використання паливної присадки; 2, 3, 4 – робота з використанням паливних присадок Amergy XLS, Amergy 1000, Amergize відповідно

Результати першого етапу досліджень дозволили визначити паливну присадку, що забезпечує мінімальні значення питомої витрати палива. Як така присадка була прийнята паливна присадка Amergy XLS.

Метою другого етапу досліджень було визначення оптимальної концентрації паливної присадки Amergy XLS – експериментальне визначення такої її концентрації, яка призводить до мінімальної витрати палива дизелем Wartsila 6L32F. Під час цього етапу досліджень використовувалась лише паливна присадка Amergy XLS, при цьому її концентрація в загальному обсязі палива складала 1 / 2000, 1 / 3000, 1 / 4000, 1 / 5000, 1 / 6000. Результати досліджень наведені на рис. 4.

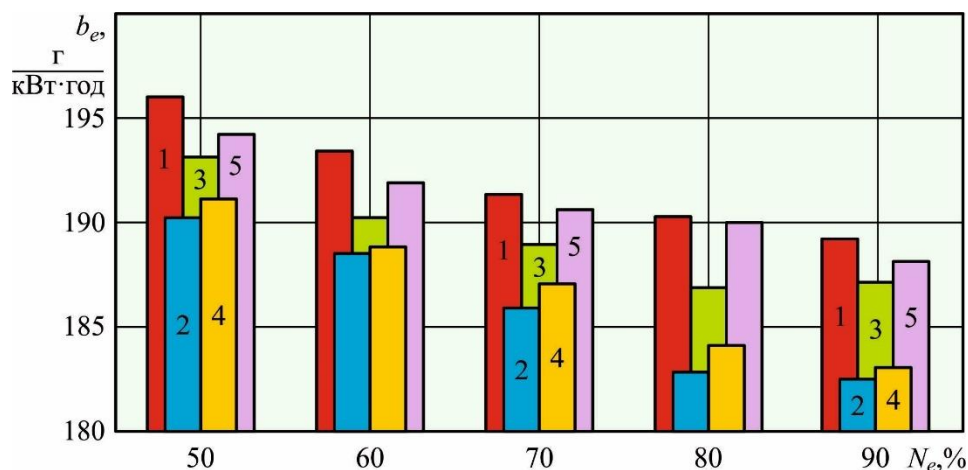


Рисунок 3 – Питома витрата палива на різних навантаженнях суднового дизеля Wartsila 6L32F для різної концентрації паливної присадки Amergy XLS:

1 – 1 / 2000, 2 – 1 / 3000,
3 – 1 / 4000, 4 – 1 / 5000, 5 – 1 / 6000

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки.

1. Експериментально отримані результати, що підтверджують зниження питомої ефективної витрати палива під час використання паливних присадок, свідчать про інтенсифікацію процесу сумішоутворення і згоряння палива. Це призводить до більш повного використання його теплотворної здатності та зниження кількості палива, що догоряє на ході розширення і в випускному колекторі. При цьому відзначимо, що для різної концентрації присадки в базовому паливі спостерігається різна величина зниження питомої ефективної витрати палива.

2. Використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності суднового дизеля. Під час використання паливних присадок на різних режимах роботи суднового дизеля Wartsila 6L32 було досягнуте 1,8...4,7 % зниження питомої ефективної витрати палива.

3. Концентрація присадки має оптимальне значення, визначається експериментально і залежить від характеристик дизеля і дистильного 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. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
3. 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 (372)). – Р. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
4. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5 (1(73)). – Р. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.
5. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
6. 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.
7. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
8. Сагін 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. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 79-89.
9. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
10. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
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. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
13. Petrychenko O. Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
14. Сагін С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.
15. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
16. Поповский А.Ю., Сагін С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
17. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
18. 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.
19. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.
20. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
21. 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.
22. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
23. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
24. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових 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.
25. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

27. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
28. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
29. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
30. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-ви́робн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
31. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
32. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtřek V., Kuřcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
34. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17.
35. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
36. 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.
37. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
38. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники : наук.-ви́робн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78-88.
39. 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.
40. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.
41. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
42. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689
43. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // 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.

44. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
45. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018.* – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

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. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport.* – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
3. 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>.
4. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves.* – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
5. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport.* – 2023. – № 2(38). – C. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
6. 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.
7. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport.* – 2024. – №. 1(39). – P. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
8. 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 facilities.* – 2019. – № 25. – P. 79-89.
9. Levynskiy M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Automation of ship technical facilities.* – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
10. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport.* – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
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. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants.* – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
13. Petrychenko O. Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies.* – 2023. – № 41. – P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
14. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants.* – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.

15. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
16. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship facilities. – 2014. – №20. – P. 74-83.
17. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
18. 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.
19. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Ensuring operational performance of diesel engines of marine vessels when using fuel of biological origin // Water transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.
20. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
21. 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.
22. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
23. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
24. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
25. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // Water Transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobryi T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // Water Transport. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
27. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
28. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
29. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
30. 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.
31. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Ship power plants. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
32. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022.– Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
34. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
35. 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.
36. 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.
37. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // Automation of ship facilities. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
38. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
39. Kuropyatnyk O.O., Sagin S.V. Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance // Automation of ship technical facilities. – 2018. – № 24. – P. 72-80.
40. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // Water transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.
41. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
42. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689
43. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // 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
44. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
45. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42

Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S.

INCREASING THE EFFICIENCY OF SHIP'S MEDIUM-SPEED DIESEL ENGINES

The results of research on determining the influence of fuel additives on the economic performance of marine diesel engines are presented. The experiments were performed on a Container ship class vessel of unlimited navigation area, capable of transporting 9850 TEU containers (up to 620 of which are refrigerated). The research was performed on four identical Wartsila 6L32 marine diesel engines, which were used as auxiliary diesel generators. The diesel engines were operated on distillate fuels DMA20 (with a sulfur content of 0.077% by mass) and RMG450 (with a sulfur content of 0.46% by mass). In the case of the vessel being in special ecological areas, the diesel engines were operated on DMA20 fuel, while the vessel was outside these areas - on RMG450 fuel. Drew Marine products were used as fuel additives: Amergy 1000, Amergize and Amergy XLS Plus. Three Wartsila 6L32 diesel engines were run on a fuel

mixture consisting of petroleum-based fuel (RMG450 or DMA20) and Amergy 1000 fuel additive, a fuel mixture of RMG450 or DMA20 and Amergize fuel additive, and a fuel mixture of RMG450 or DMA20 and Amergy XLS Plus fuel additive. These diesel engines were used for experimental studies to determine the efficiency of using FAME biodiesel. One of the diesel engines was operated exclusively on RMG450 or DMA20 fuel, without the use of a fuel additive. During the experimental studies, the Wartsila 6L32 diesel engines were operated at equal intervals on heavy fuel RMG450 or DMA20 with various fuel additives Amergy 1000, Amergize, and Amergy XLS Plus. At the same time, their operation was carried out at loads of 50%, 60%, 70%, 80% of the nominal power. The duration of the experiment at each of the loads was 1...3 hours and depended on the vessel's sailing conditions. The purpose of the first stage of the study was to determine from the specified additives the one that contributes to the best efficiency of the diesel engine - namely, provides the minimum specific fuel consumption. The fuel additive Amergy XLS was determined as such an additive. The task of the second stage was to determine the optimal concentration of the additive in the fuel. This made it possible to determine the concentration that provides the minimum specific fuel consumption, which contributes to increasing the efficiency of the operation of ship medium-speed diesel engines.

Keywords: *concentration, distillate fuel, efficiency of operation, fuel additive, maritime transport, ship diesel generator, ship medium-speed diesel, specific fuel consumption*