

10.31653/smf45.2022. 43-56

Мадей В.В., Волков О.М.

Національний університет «Одеська морська академія»

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПАЛИВОПОДАЧІ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ ДО СКЛАДУ ЯКИХ ВХОДИТЬ БІОДИЗЕЛЬНЕ ПАЛИВО**

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Енергетичні комплекси морських засобів транспорту забезпечують виконання комерційних завдань з перевезення вантажів та пасажирів, а також технологічні процеси, що відбуваються на морських судах, або виконуються суднами. Джерелом їх функціонування є рідке паливо, яке використовується у всіх без винятку теплових двигунах, що входять до складу суднової енергетичної установки. Сонячні та електричні батареї, повітряні генератори (в тому числі «жорсткі» та «м'які» вітрила) здатні лише компенсувати частину енергії, що витрачається на рух судна або роботу допоміжного обладнання. Найбільш розповсюдженим типом рідкого палива є паливо нафтового походження, під час згоряння якого разом з випускними газами 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 в природних родовищах. Викладені обставини є підставою для впровадження в суднову енергетику альтернативного палива, одним з якого є паливо біологічного походження (біодизельне паливо) [1-3].

На відміну від палива нафтового походження, біодизельне паливо виробляється з відновлюваних органічних джерел, його основні експлуатаційні характеристики (густина, в'язкість, температура спалаху, нижча теплотворна здатність) суттєво не відрізняються від аналогічних показників нафтового палива – це дозволяє використовувати його в сумішах з нафтовим паливом в більшості сучасних дизельних двигунів [4-6]. При цьому наукові розробки, що підтверджують ефективність використання біодизельного палива для суднових дизелів, мають поодинокий характер; рекомендації щодо використання сумішей дизельного та біодизельного палива не мають системного підходу. 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. Визначення оптимальної концентрації біопалива в його суміші з дизельним, а також оптимальні фази паливоподачі виконується експериментальним шляхом та залежить від багатьох характеристик, насамперед властивостей дизельного палива та режимів роботи дизеля [7-10]. Ефективність використання паливних сумішей, до складу яких входять дизельне паливо та паливо біологічного походження, безпосередньо залежить від компетентностей судових інженерів та наявності рекомендацій щодо технології застосування цих сумішей на різних експлуатаційних режимах роботи дизеля.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Біодизельне паливо (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) – складний метиловий ефір з характеристиками дизельного палива, що виготовляється з олій рослинного або тваринного походження. Біодизель випускають переважно з олій сільськогосподарських культур, якими є ріпакова, соняшник, пальмова, соєва та інші олії. Останніми роками розробки ведуться у сфері створення біодизельного палива з водоростей (біопаливо «третього покоління») [11-13]. Експлуатаційні характеристики та властивості біодизельного палива (як будь-якого іншого палива, що використовується для роботи засобів транспорту) повинні відповідати вимогам, що визначаються спеціальним стандартом [14, 15].

Як окреме джерело енергії біодизельне паливо не використовується. Перш за все це пов'язане з його більш високою (в порівнянні 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 (в тому числі на автотракторних дизелях), а також в промислових енергетич-

них 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 кг/м<sup>3</sup>. 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 [16-18].

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 (в 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.

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 (Sulphur emission control areas – SECAs) [19-22].

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 викликає глобальне потепління. Використання біопалива зменшує вплив парникових газів на довкілля [23-26].

У різних наукових дослідженнях містяться суперечливі дані щодо кількості викидів оксидів азоту NO<sub>x</sub> 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).

**Постановка завдання.** Завданням дослідження було вивчення впливу біодизельного палива біологічного походження на економічні та екологічні показники суднового дизеля, та подальше визначення за цими показниками оптимальної концентрації біодизельного палива в суміші з моторним паливом та оптимальних фаз паливopодачі цей суміші до циліндрів дизеля.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувалися на суднових середньооборотових дизелях 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries з наступними основними характеристиками: діаметр циліндра – 0,17 м; хід поршня – 0,28 м; частота обертання – 900 хв<sup>-1</sup>; номінальна потужність – 690 кВт; кількість циліндрів – 6. Три подібні дизелі входили до складу енергетичної установки морського судна дедвейтом 14745 тонн. Принципова схема паливної системи дизелів показана на рис. 1.

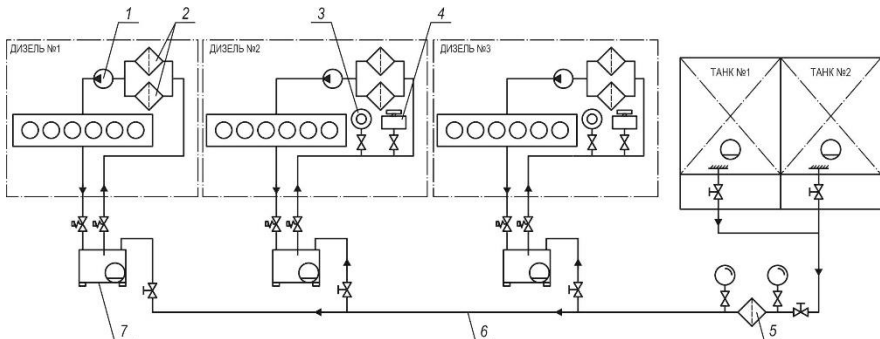


Рис. 1. Принципова схема паливної системи суднових дизелів 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries:

- 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 од-

наковому навантаженні, підтримка якого вимагала під час проведення експерименту. Під час проведення експерименту на всіх дизелях забезпечувалася підтримка постійних параметрів у системах мащення і охолодження. Робота дизелів на кожному з досліджуваних режимів проводилася не менше 1,5 ... 2 годин, протягом яких виконувалось вимірювання основних параметрів та усереднення отриманих значень. Це забезпечувало коректність проведення досліджень і можливість зіставлення вимірів, виконаних на різних дизелях.

Під час проведення досліджень використовувались біологічне паливо FAME та моторне паливо RMA10, характеристики яких наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні характеристики суднових палив

Характеристика	FAME паливо	Паливо RMA10
В'язкість при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	4,5...5	6,5...6,7
Температура спалаху, °С	120	135
Вміст сірки, г/кг	0,01	0,35
Густина при 15 °С, м <sup>3</sup> /кг	900	920
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	37650	41910

Контур подачі палива до дизеля № 1 не змінювався та дизель експлуатувався на паливі RMA10 (з в'язкістю 6,5...6,7 сСт і вмістом сірки 0,35 %). В'язкість палива дозволяє додавати в нього біодизельне паливо (з в'язкістю 4,5...5 сСт і вмістом сірки 0,01 %). Вміст біодизельного палива в паливній суміші змінювався в інтервалі 5 ... 20 %. Паливна суміш подавалася до дизелів № 2 і № 3. Для забезпечення дозування біодизельного палива в паливній суміші, в контур дизелів № 2 і № 3 додатково встановлювалися витратомір і дозатор (позиції 3 і 4 на рис. 1).

Ефективність використання біодизельного палива оцінювалася за економічним та екологічним критеріями. Критерієм економічності роботи дизеля була обрана питома ефективна витрата палива  $b_e$  [27]. Як екологічний критерій роботи суднових дизелів приймалися концентрація оксидів азоту  $C_{NO_x}$  та об'ємний вміст оксиду вуглецю  $C_{CO_2}$  в випускних газах [28, 29].

Під час проведення експериментів питома ефективна витрата палива  $b_e$  визначалася за допомогою суднових вимірювальних засобів, концентрація оксидів азоту  $NO_x$ , а також об'ємний вміст  $CO_2$  в випускних газах контролювалися за допомогою газоаналізатора Testo350XL [30].

Аналіз складу випускних газів виконувався в газовипускній магістралі на відстані 10 м від місця виходу газів з газотурбонагнетача, що відповідало вимогам Технічного кодексу за  $\text{NO}_x$ .

Під час проведення експерименту (за допомогою суднової системи діагностування Doctor) також визначались максимальний тиск згоряння  $p_z$  та температура випускних газів  $t_{\text{вг}}$ . Похибка в вимірюванні цих показників не перевищувала  $\pm 0,5\%$ .

Похибка в вимірюванні емісії  $\text{NO}_x$  та  $\text{CO}_2$  у випускних газах, що виконувалась газоаналізатором Testo350XL становила  $\pm 1,0\%$ ; похибка у визначенні питомої ефективної витрати палива не перевищувала  $\pm 2,5\%$ .

Під час проведення дослідження для забезпечення споживачів енергією експлуатувався «контрольний» дизель (що використовував паливо RMA10) та один, або два інших (в яких використовувалась суміш палива RMA10 та біопалива FAME). Дизелі, на яких виконувалися експериментальні дослідження, забезпечували потужністю постійні групи споживачів та експлуатувались на однакових навантаженнях та однаковий час. Дослідження виконувались в діапазоні навантажень на дизель  $(0,3 \dots 0,8)N_{\text{ном}}$ .

Перед початком проведення експерименту всі дизелі мали порівняний моторесурс паливної апаратури, деталей циліндрової групи, підшипників руху, а також однаковий технічний стан. У випадку зміни кількості споживачів енергії та їх потужності необхідне навантаження перерозподілялося на дизелі, що не задіяні в експерименті, при цьому дизель, на якому проводилися дослідження, експлуатувався на постійному навантаженні. Крім того, під час проведення експерименту на дизелі підтримувалися постійні температурні режими в системах змащування та охолодження. Під час проведення експерименту дизель протягом 1,0...1,5 годин працював на постійному навантаженні протягом яких виконувалось вимірювання основних параметрів і усереднення отриманих значень. Це забезпечувало коректність проведення досліджень і можливість зіставлення вимірів, виконаних на різних дизелях. За таких умов також постійною можливо вважати концентрації  $\text{CO}_2$  та  $\text{NO}_x$  в випускних газах. Похибка в навантаженні під час переходу дизеля з одного сталого режиму до іншого не перевищувала  $\pm 1,5\%$  [31].

Результати дослідження наведені в табл. 2-6.

Таблиця 2. 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 <sub>енорм</sub>	208	212	217	222	225
0,4N <sub>енорм</sub>	203	208	212	216	218
0,5N <sub>енорм</sub>	197	203	209	211	213
0,6N <sub>енорм</sub>	193	197	203	204	205
0,7N <sub>енорм</sub>	192	193	195	197	199
0,8N <sub>енорм</sub>	193	194	197	199	201

Таблиця 3. 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 <sub>енорм</sub>	7,42	7,32	6,62	6,19	6,77
0,4N <sub>енорм</sub>	7,56	7,41	6,68	6,29	6,85
0,5N <sub>енорм</sub>	7,72	7,49	6,78	6,41	6,94
0,6N <sub>енорм</sub>	7,88	7,63	6,82	6,52	6,97
0,7N <sub>енорм</sub>	8,02	7,74	6,88	6,54	7,01
0,8N <sub>енорм</sub>	8,12	7,86	7,12	6,65	7,14

Таблиця 4. Об'ємний вміст оксиду вуглецю в 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 <sub>енорм</sub>	6,67	6,52	6,35	5,98	5,41
0,4N <sub>енорм</sub>	6,81	6,62	6,48	6,14	5,47
0,5N <sub>енорм</sub>	7,14	6,93	6,57	6,31	5,63
0,6N <sub>енорм</sub>	7,31	7,08	6,75	6,36	5,78
0,7N <sub>енорм</sub>	7,56	7,17	7,07	6,57	5,88
0,8N <sub>енорм</sub>	7,96	7,37	7,14	6,77	5,99

Таблиця 5. 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 <sub>енорм</sub>	9,5	9,4	9,3	9,1	8,8
0,4N <sub>енорм</sub>	10,3	10,2	10,0	9,9	9,6
0,5N <sub>енорм</sub>	11,3	11,2	11	10,8	10,6
0,6N <sub>енорм</sub>	12,8	12,6	12,5	12,3	12,1
0,7N <sub>енорм</sub>	14,3	14,1	14,0	13,8	13,6
0,8N <sub>енорм</sub>	16,1	16,0	15,8	15,6	15,4

Таблиця 6. 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 <sub>енорм</sub>	265	265	269	273	275
0,4N <sub>енорм</sub>	275	275	278	283	285
0,5N <sub>енорм</sub>	285	285	287	291	295
0,6N <sub>енорм</sub>	300	300	302	306	309
0,7N <sub>енорм</sub>	295	295	298	299	302
0,8N <sub>енорм</sub>	290	290	293	296	298

Дані, що наведені в табл. 2-6, 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<sub>x</sub> та вуглецю CO<sub>2</sub> (відповідно в діапазоні 1,35...18,45 % та 2,25...24,75 % в залежності 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.

Попередження цього явища можливо за рахунок експериментального визначення оптимальних фаз паливоподачі, а саме – зміни кута випередження впорскування  $\varphi_{вв}$  паливної суміші, що містить моторне паливо та біопаливо. Тому наступні дослідження 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 табл. 2-6) забезпечує максимальне зниження емісії NO<sub>x</sub> та CO<sub>2</sub> та мінімальне підвищення питомої витрати палива  $b_e$ . На протязі цієї частини експерименту дизель № 2 (рис. 1) 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) в діапазоні  $\varphi_{\text{вв}} = -20 \dots -10^\circ$  повороту колінчатого валу (пкв). Цей діапазон рекомендований фірмою Hyundai Heavy Industries та визначений в інструкції з експлуатації дизеля 6Н17/28. Попередній цикл досліджування (результати якого наведені в таблицях 2-6) виконувався для кута випередження палива  $-14^\circ$  пкв. Під час проведення досліджень контролювалось значення максимального тиску згоряння  $p_z$  та температура випускних газів  $t_{\text{вг}}$ . Зміна цих показників в залежності від кута випередження впорскування  $\varphi_{\text{вв}}$  паливної суміші надана в табл. 7, 8.

Таблиця 7. 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				
$0,3N_{\text{енорм}}$	9,4	9,5	9,3	9,2	9,2
$0,4N_{\text{енорм}}$	10,1	10,2	10,0	9,9	9,8
$0,5N_{\text{енорм}}$	11,1	11,2	11,0	10,8	10,7
$0,6N_{\text{енорм}}$	12,4	12,7	12,5	12,4	12,2
$0,7N_{\text{енорм}}$	14,0	14,2	14,0	13,8	13,6
$0,8N_{\text{енорм}}$	15,9	16,1	15,8	15,6	15,5
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{\text{енорм}}$	9,4	9,2	9,1	8,9	8,7
$0,4N_{\text{енорм}}$	10,2	10,0	9,9	9,7	9,6
$0,5N_{\text{енорм}}$	11,3	11,0	10,8	10,6	10,4
$0,6N_{\text{енорм}}$	12,4	12,3	12,3	12,1	13,8
$0,7N_{\text{енорм}}$	14,3	14,0	13,8	13,6	13,4
$0,8N_{\text{енорм}}$	16,0	15,8	15,6	15,5	15,3

Таблиця 8. 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 <sub>енорм</sub>	265	267	269	269	272
0,4N <sub>енорм</sub>	273	275	278	281	284
0,5N <sub>енорм</sub>	285	285	287	291	295
0,6N <sub>енорм</sub>	297	300	302	303	307
0,7N <sub>енорм</sub>	292	295	298	302	307
0,8N <sub>енорм</sub>	288	290	293	296	301
	RMA+15 % біопалива FAME				
0,3N <sub>енорм</sub>	270	272	273	275	279
0,4N <sub>енорм</sub>	277	281	283	286	291
0,5N <sub>енорм</sub>	284	288	291	295	299
0,6N <sub>енорм</sub>	299	303	306	308	309
0,7N <sub>енорм</sub>	293	296	299	302	304
0,8N <sub>енорм</sub>	288	292	296	296	299

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо сприяє підвищенню екологічності їх роботи. Експериментально встановлено, що для суднового дизеля 6Н17/28 Hyundai Heavy Industries під час використання паливної суміші, яка складається з 80...95 % палива RMA10 та 20...5 % біопалива FAME, забезпечується  $\approx 25$  % зниження емісії оксидів азоту NO<sub>x</sub> та  $\approx 20$  % зниження емісії оксидів вуглецю CO<sub>2</sub>. Одночасно з цим до 8,2 % збільшується питома витрата палива. Найбільш оптимальною сумішшю є така, що містить 10...15 % біодизельного палива. При цьому забезпечується максимальне підвищення екологічних характеристик дизеля при одночасному мінімальному зниженню економічності його роботи.

2. Використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, призводить до зсуву процесу згоряння на лінію розширення. При цьому до 7,4 % знижується максимальний тиск згоряння та спостерігається зростання на 15 °С температури випускних газів. Шляхом оптимізації процесу паливоподачі (а саме через зміну кута випередження впорскування) можливо зміщення процесу згоряння в бік верхньої мертвої точки та підтримання мак-

симального тиску згоряння на рівні, що відповідає використанню палива нафтового походження (без утворення його суміші з біодизельним паливом). Експериментально встановлено, що для навантажень в діапазоні 30...80 % спостерігається наявність оптимального кута випередження впорскування палива, який забезпечує збільшення максимального тиску згоряння та зменшення температури випускних газів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

2. Ратайчук О.В., Сагін С.В. Підвищення ефективності процесу наддува суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. - техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

3. 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.

4. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10-14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.

5. 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>.

6. 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](https://doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59).

7. 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. – Одесса: ОНМА. – С.116-125.

8. 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. – Одесса : ОНМА. – С.109-118.

9. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. Зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 -100.

10. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

11. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022. 93-110.

12. Сагин С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

13. 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>.

14. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 2(1(64)). – P. 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

15. 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>.

16. 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. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

17. 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.

18. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні 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.

19. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.

20. 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. – Iss. 9. – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

21. 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 & Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

22. 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.

23. 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.

24. 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: НУ «ОМА». – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

25. Куропятник А.А., Сагін С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72 - 80.

26. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

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

28. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-142.

29. Сагін С.В., Кривий М.О. Розрахунок контактного тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 84 - 92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

30. 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.

31. Мадей В.В. Використання альтернативного палива в судових середньооборотних дизелях // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА».– С. 45-53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.