

УДК 629.5

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20*Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М.*

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВПОРСКУВАННЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ ДО СКЛАДУ ЯКИХ ВХОДИТЬ ПАЛИВО БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Розглянути питання управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження. Визначено, що під час використання паливних сумішей до складу яких входить біопаливо відбувається зміна експлуатаційних показників дизеля, насамперед максимального тиску згорання, температури випускних газів та емісії оксидів азоту з випускними газами. З метою попередження цього явища, а також з метою покращення екологічності роботи судового дизеля та зниження механічних і теплових навантажень запропоновано виконувати переналаштування паливної апаратури високого тиску, яке полягає в зміні кутів випередження впорскування палива. Експерименти, що підтвердили це припущення були виконані на судових дизелях 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel, експлуатація яких виконувалась на паливній суміші, до складу якої входило нафтове паливо RMA10 та біопаливо FAME 99.9, яке є сумішшю різних метилових ефірів жирних кислот. Експерименти виконувались для двох типів паливних сумішей: паливо RMA+10 % біопалива FAME 99.9 та паливо RMA+15 % біопалива FAME 99.9. Цей склад сумішей забезпечував максимальне зниження емісії оксидів азоту та діоксидів вуглецю з випускними газами та мінімальне підвищення питомої витрати палива. Експериментально доведена необхідність зменшення кута випередження впорскування палива в разі використання в судових дизелях паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження. При цьому встановлено, що зменшення кута випередження

впорскування палива зі значення -14° до -9° для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші забезпечує зниження максимального тиску згоряння зі значень 9,1...15,8 МПа до значень 8,7...15,5 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та зниження емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень 6,19...7,14 кг/(кВт·год) до значень 5,93...6,61 кг/(кВт·год) – тобто на 4,2... 7,4 %. Також встановлено, що збільшення кута випередження впорскування палива зі значення -14° до -20° для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші призводить до підвищення максимального тиску згоряння до значень 9,5...16,1 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та підвищення емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень до значень 7,10...7,70 кг/(кВт·год) – тобто на 7,1... 7,7 %. Визначення оптимальних кутів випередження палива досягається експериментальним шляхом та сприяє забезпеченню експлуатаційних показників роботи судових дизелів.

Ключові слова: експлуатаційні показники, екологічність роботи дизеля, кут випередження впорскування палива, механічна напруженість, паливна апаратура високого тиску, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, судовий дизель, теплова напруженість.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Морський та внутрішній водний транспорт під час забезпечення вантажів та пасажирів, споживає велику кількість палива. При цьому світові потреби у рідкому паливі постійно зростають, його природні запаси щорічно знижуються, обсяги видобутку регламентуються країнами-виробниками. Водночас посилюються вимоги Міжнародних конвенцій та класифікаційних товариств відносно екологічності морських суден під час їх знаходження в портах, прибережних акваторіях та спеціальних екологічних районах, а саме:

- встановлені спеціальні зони з обмеження використання палива вміст сірки в кому перевищує 0,1 % за масою (Sulfur Emission Control Areas – SECAs) [1];
- регламентовано концентрація оксидів азоту в випускних газах в залежності від частоти обертання дизеля та року побудови судна [2];
- посилено контроль за викидами оксидів вуглецю [3].

Україна, як Європейська держава, імплементувала всі основні міжнародні резолюції та конвенції країн ЄС, в тому числі такі, що спрямовані на захист довкілля та насамперед Міжнародну конвенцію про запобігання забрудненню з суден – МАРПОЛ73/78, а також вимоги Міжнародної морської організації (International Marine Organization – IMO) щодо розробці плану управління енергоефективністю судна [4].

Однім зі шляхів, який сприяє розв'язанню завдання зменшення негативного впливу на довкілля з боку енергетичних установок морських суден та підвищення енергоефективності суден є поступовий перехід на використання альтернативного палива. Інтенсивні дослідження можливості його застосування проводять у даний час в різних країнах. Основними видами альтернативного палива є:

- зріджені горючі гази;
- водень;
- спирти та їх суміші з нафтовим паливом;
- рослинні олії;
- штучне рідке та газове паливо (біопаливо та біогаз) [5, 6].

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На морських і річкових суднах як теплові двигуни використовуються паротурбінні, газотурбінні та дизельні установки. При цьому дизелі встановлюються на всіх суднах без винятку, незалежно від їх типу, класу та дедвейту [7, 8].

Ефективна потужність дизелів використовується для руху судна або забезпечення електричної енергії суднового обладнання, механізмів і систем. Її одержання неможливе без згоряння палива в циліндрі [9, 10]. Сучасні наукові проекти, спрямовані на використання сонячної енергії та енергії вітру, у морському транспорті можуть застосовуватись лише частково. Встановлення сонячних батарей на відкритих палубах потребує їх постійного демонтажу до та після виконання вантажних робіт. Застосування вітряних генераторів та жорстких вітрил збільшує аеродинамічний опір у випадку погіршенні гідрометеорологічних умов. Використання акумуляторних батарей на транспортних суднах потребує постійного відновлення їхньої ємності, що неможливо в умовах тривалих морських переходів [11, 12]. Таким чином, основним джерелом енергії для суднових енергетичних установок на найближчу перспективу залишиться рідке паливо, але водночас з цим на суднах морського та внутрішнього водного транспорту використовується паливо біологічного походження (біопаливо). Цей ти палива також відноситься до категорії рідких, має густину та в'язкість значення яких збігаються з аналогічними показниками рідкого палива нафтового походження, тому легко утворює з ними паливні суміші, які використовуються в суднових дизелях. Вміст біопалива в таких сумішах коливається в межах 5...30 % та, як правило, заснований на рекомендаціях виробників біопалива. При цьому оптимальний вміст біопалива в суміші (такий, що забезпечує найкращі екологічні показники роботи дизеля з одночасним підтриманням його ефективної потужності та мінімальним збільшення питомої витрати палива) знаходиться всередині вказаного діапазону, залежить від навантаження дизеля та визначається експериментально.

Формулювання цілей статті. Через різницю в структурному та фракційному складі нафтових палив та палив біологічного походження, суміші, що з них складаються, згоряють в циліндрі дизелів з іншою інтенсивністю тепловиділення в порівнянні з цим показником для нафтових палив. Це пов'язане з меншою температурою спалаху палив біологічного походження та більшою швидкістю їх згоряння. Це може призвести до критичного підвищення тиску наприкінці згоряння, а також (через збільшення температури під час згоряння) до підвищенню утворення теплових оксидів азоту та відповідному зростанню їх загальної кількості в складі випускних газів.

Розв'язання цього завдання можливе шляхом зміни кутів впорскування палива, за допомогою чого можливий зсув процесу згоряння в бік зниження максимальних значень з одночасним підтримання екологічних та енергетичних показників роботи дизеля. Для досягнення результатів необхідно проведення експериментів на основних експлуатаційних режимах роботи дизеля. В зв'язку з цим, ціллю статті була розробка рекомендацій щодо зміни фаз паливоподачі під час переведення роботи суднових дизелів на використання паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження, що забезпечили досягнення поставленої цілі, виконувались на спеціалізованому морському судні дедвейтом 12910 тонн. До складу допоміжної енергетичної установку судна входили три суднових середньообертових дизеля 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel з наступними основними характеристиками:

- діаметр циліндра – 0,20 м;
- хід поршня – 0,30 м;
- частота обертання – 720 хв⁻¹;
- номінальна потужність – 800 кВт;
- кількість циліндрів – 6.

Принципова схема паливної системи дизелів показана на рис. 1.

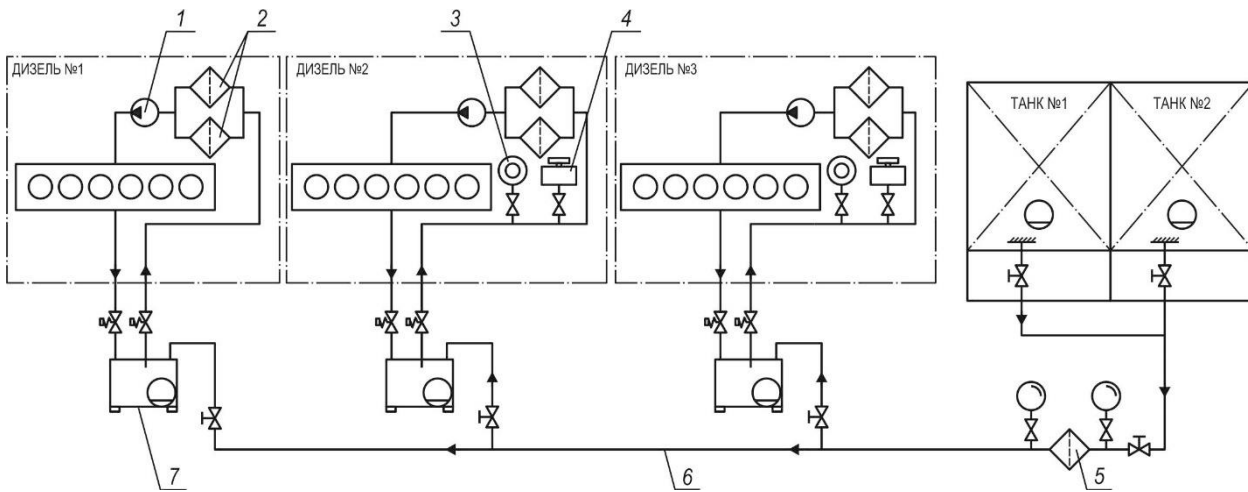


Рисунок 1 – Принципова схема паливної системи суднових дизелів 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel:

- 1 – насос, що підкачує паливо; 2 – подвійний паливний фільтр тонкого очищення;
- 3 – витратомір палива нафтового походження; 4 – дозатор біопалива; 5 – паливний фільтр грубого очищення 6 – магістраль поповнення кількості паливна в витратних цистернах;
- 7 – цистерна витратного паливна

Суднові дизелі обладнані системою електронного управління паливоподачею, в якій паливо потрапляє в загальний розподільний блок та за далі за високим тиском спрямовується до форсунок. Саме за допомогою електронного управління забезпечується зміна кутів впорскування палива в циліндри дизеля. Відповідно до принципової схеми, що надана на рис. 1., подача палива до загального розподільного блоку забезпечувалась насосом, що підкачує паливо 1. Якість очищення палива або паливної суміші підтримувалась в подвійному паливному фільтрі тонкого очищення 2. Кількість палива нафтового походження, що потрапляло до загальний розподільного блоку, контролювалось за допомогою витратоміру 3. Утворення суміші нафтового палива та біопалива забезпечувалось за допомогою дозатору 4. Кожний з дизелів був обладнаний окремою цистерною витратного паливна 7, необхідна кількість палива в якій забезпечувалась шляхом самопливу палива з загальних танків. Попереднє очищення палива забезпечувалось в фільтрі грубого очищення 5, якій було встановлено на загальній магістралі 6.

Під час проведення досліджень технічний стан дизелів відповідав один одному, це забезпечувалось однаковою кількістю годин яку дизелі знаходилися в експлуатації та збігом поточних результатів з визначення основних експлуатаційних характеристик моторного мастила, що забезпечувало режимі їх мащення [13, 14], тепловими зазорами в елементах випускної системі та станом колінчатого валу. Дослідження виконувались лише на сталих режимах роботи дизелів, при цьому у випадку проведення експериментів на двох дизелях, їх навантаження збігались з неузгодженістю не більш ніж $\pm 2,5\%$. З такою ж неузгодженістю підтримувались температура та тиск робочих речовин в системах циркуляційного мащення та внутрішнього охолодження прісною водою. У випадку збільшення навантаження на судову електростанцію, це навантаження рівномірно поділось між дизелями, на яких проводились дослідження. Це гарантувало збіг умов проведення експерименту для кожного з дизелів та надавало можливість порівняння результатів випробувань, що були отримані на різних дизелях [15, 16].

Експерименти виконувались з використанням палив, основні характеристики яких надані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики судових палив під час проведення досліджень на дизелях 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Характеристика	FAME 99.9	DMA	RMA10
В'язкість при 40 °C, мм ² /с	4,5...5	5,8...6,1	6,5...6,7
Температура спалаху, °C	120	122	135
Вміст сірки, г/кг	0,01	0,08	0,35
Густина при 15 °C, м ³ /кг	900	896	920
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	37650	42160	41910

Експлуатація дизелів на паливі DMA (зі вмістом сірки 0,08 % за масою) виконувалась під час знаходження судна в SECAs. За умовою знаходження судна поза SECAs використовувалось паливо RMA10 (зі вмістом сірки 0,35 % за масою) [17, 18]. Як біодизельне паливо використовувалось паливо FAME 99.9, яке є сумішшю різних метилових ефірів жирних кислот. До основних переваг палива FAME 99.9 відносяться його схожі з дизельним паливом експлуатаційні характеристики (насамперед в'язкість, густина та температура спалаху), а також відсутність токсичності та здатність до біорозкладення. Це дозволяє використовувати біопаливо FAME 99.9 в судових дизелях як складової паливної суміші, основною частиною якої (80...95 %) є дизельне паливо.

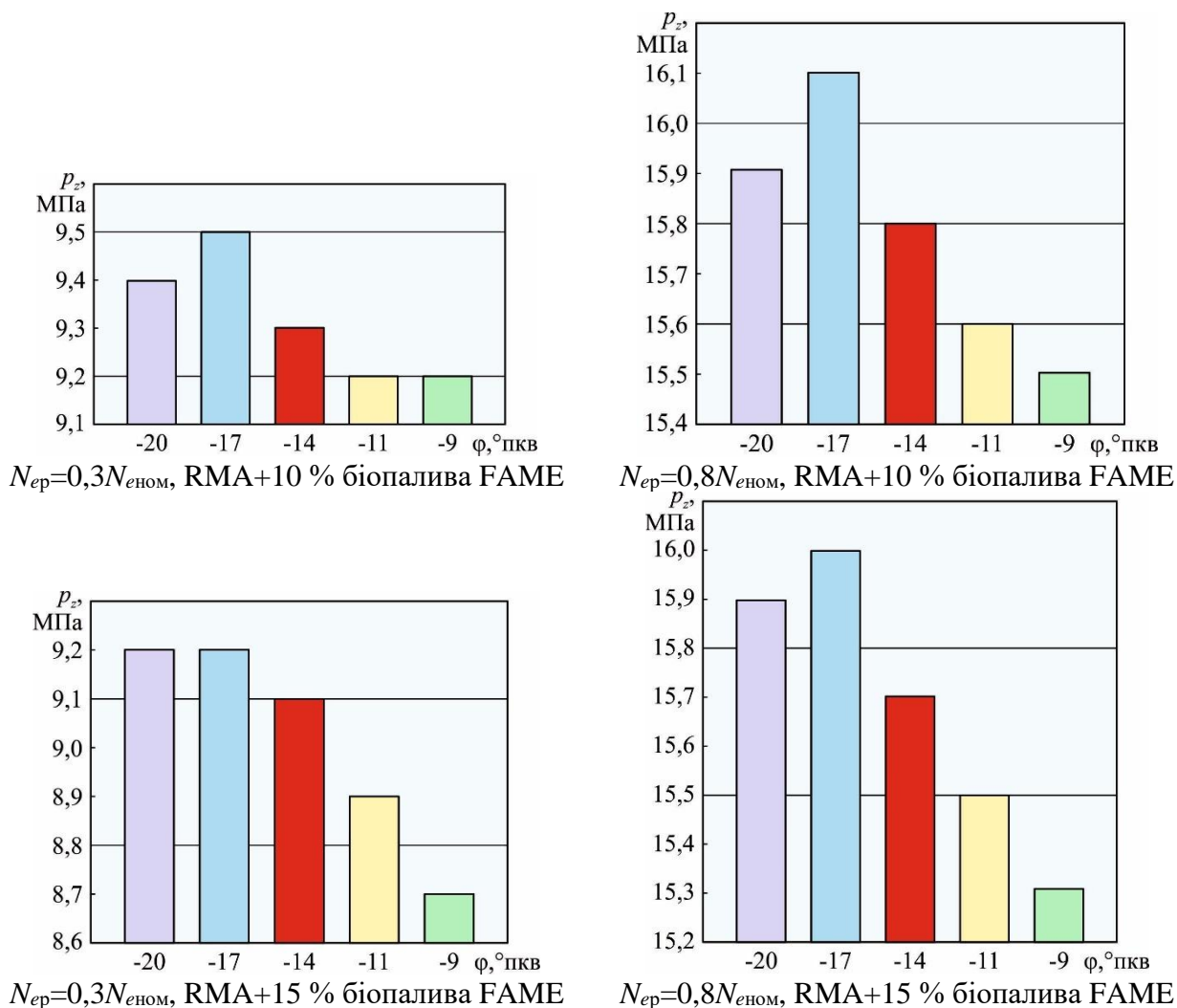
Паливні суміші, які утворювались за допомогою дозерного пристрою (позиція 4 на рис. 1), містили в своєму складі від 5 % до 20 % біодизельного палива (відповідно вміст в суміші палива нафтового походження коливався від 95 % до 80 %). Паливні суміші використовувались в двох дизелях, паливні системи яких додатково обладнувались витратоміром та дозатором. Паливна система ще одного дизеля не змінювалась та його експлуатація виконувалась виключно на паливі нафтового походження – DMA або RMA10. Дизелі експлуатувались на всьому діапазоні навантажень, але дослідження та фіксація результатів виконувались для навантажень 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 % від номінальної потужності. Зміна навантаження в бік збільшення або зменшення виконувалась поступово з інтервалом, що не перевищував 5 %, це забезпечувало мінімальні температурні навантаження на елементі дизеля та мінімальні втрати енергії, що виникають під час зміни режимів роботи дизеля [19].

Попередніми дослідженнями був встановлено оптимальний вміст біопалива в його суміші з дизельним, при цьому досягалось максимальне зниження емісії оксидів азоту NO_x та діоксидів вуглецю CO₂ з випускними газами та мінімальне підвищення питомої витрати палива b_e [20, 21]. Як такий був визначений паливо RMA+10 % біопалива та паливо RMA+15 % біопалива. Саме цей склад паливної суміші був використано в паливних системах дизелів, на яких проводилися експерименти.

Подальшим кроком дослідження було визначення оптимального кута випередження впорскування $\varphi_{вв}$, який забезпечує найбільш сприятливі з екологічної та енергетичної точки зору експлуатаційні показники роботи дизеля. Зміна кута випередження впорскування $\varphi_{вв}$ здійснювалась в рекомендованому інструкцією з експлуатації дизеля 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel діапазоні $\varphi_{вв}=-20...-10^\circ$ повороту колінчатого валу (пкв) [22, 23]. Попередній цикл досліджування (з визначення оптимального вмісту біопалива в паливної суміші) виконувався для кута випередження впорскування палива $\varphi_{вв}=-14^\circ$ пкв. Під час проведення досліджень контролювалось значення максимального тиску згоряння p_z , температури випускних газів $t_{вг}$ та емісії оксидів азоту NO_x [24, 25]. Технологія досліджень погоджувалась з технічним відділом, що виконує менеджмент судом [26, 27]. Результати досліджень, що відображають зміну цих показників для рідного складу паливної суміші, різного навантаження та різних кутів випередження впорскування $\varphi_{вв}$ наведені в таблицях 2-4. Для кращої візуалізації, результати, що надані в таблицях 2-3, відображені в вигляді діаграм (рис. 2-4).

Таблиця 2 – Максимальний тиск згоряння, МПа, в циліндрі дизеля для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Навантаження на дизель	Кут випередження впорскування, °ПКВ				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	9,4	9,5	9,3	9,2	9,2
$0,4N_{еном}$	10,1	10,2	10,0	9,9	9,8
$0,5N_{еном}$	11,1	11,2	11,0	10,8	10,7
$0,6N_{еном}$	12,4	12,7	12,5	12,4	12,2
$0,7N_{еном}$	14,0	14,2	14,0	13,8	13,6
$0,8N_{еном}$	15,9	16,1	15,8	15,6	15,5
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	9,2	9,2	9,1	8,9	8,7
$0,4N_{еном}$	10,2	10,0	9,9	9,7	9,6
$0,5N_{еном}$	11,3	11,0	10,8	10,6	10,4
$0,6N_{еном}$	12,4	12,3	12,3	12,1	13,8
$0,7N_{еном}$	14,3	14,0	13,8	13,6	13,4
$0,8N_{еном}$	15,9	16,0	15,7	15,5	15,3



Таблиця 3 – Температура випускних газів, °С, для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Навантаження на дизель	Кут випередження впорскування, °ПКВ				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
0,3N _{енорм}	265	267	269	269	272
0,4N _{енорм}	273	275	278	281	284
0,5N _{енорм}	285	285	287	291	295
0,6N _{енорм}	297	300	302	303	307
0,7N _{енорм}	292	295	298	302	307
0,8N _{енорм}	288	290	293	296	301
	RMA+15 % біопалива FAME				
0,3N _{енорм}	270	272	273	275	279
0,4N _{енорм}	277	281	283	286	291
0,5N _{енорм}	284	288	291	295	299
0,6N _{енорм}	299	303	306	308	309
0,7N _{енорм}	293	296	299	302	304
0,8N _{енорм}	288	292	296	296	299

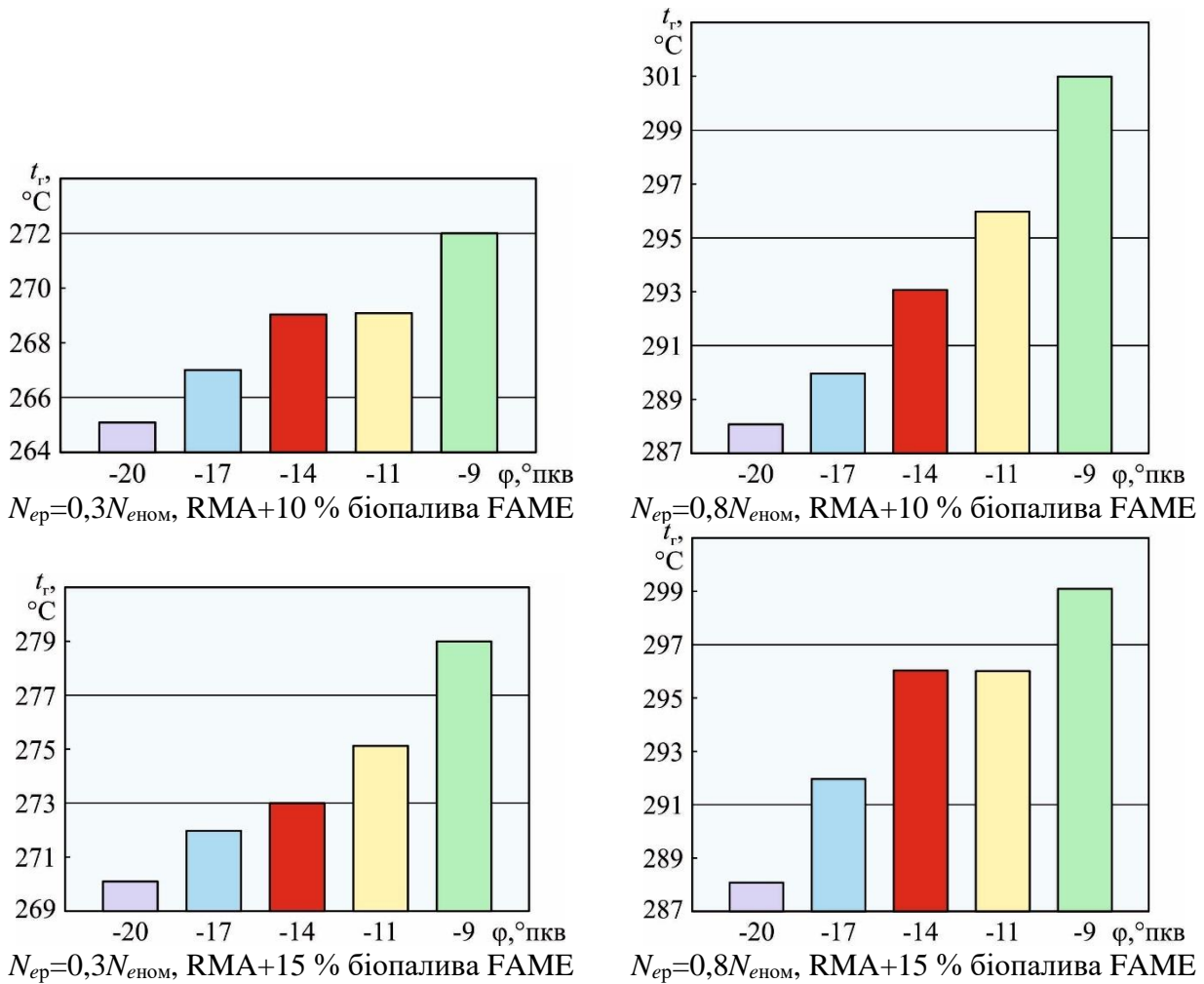


Рисунок 3 – Зміна температури випускних газів для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Таблиця 4 – Емісія оксидів азоту, г/(кВт·год), для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Режим роботи	Кут випередження впорскування, °ПКВ				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
0,3 $N_{еном}$	7,12	6,80	6,62	6,48	6,18
0,4 $N_{еном}$	7,28	6,96	6,68	6,58	6,27
0,5 $N_{еном}$	7,41	7,12	6,78	6,63	6,34
0,6 $N_{еном}$	7,52	7,28	6,82	6,72	6,46
0,7 $N_{еном}$	7,61	7,33	6,88	6,77	6,56
0,8 $N_{еном}$	7,67	7,40	7,14	6,80	6,61
	RMA+15 % біопалива FAME				
0,3 $N_{еном}$	6,63	6,60	6,19	6,15	5,93
0,4 $N_{еном}$	6,81	6,71	6,29	6,26	6,08
0,5 $N_{еном}$	6,94	6,79	6,41	6,32	6,16
0,6 $N_{еном}$	7,09	6,88	6,52	6,39	6,25
0,7 $N_{еном}$	7,19	6,93	6,54	6,48	6,33
0,8 $N_{еном}$	7,27	7,00	6,65	6,52	6,41

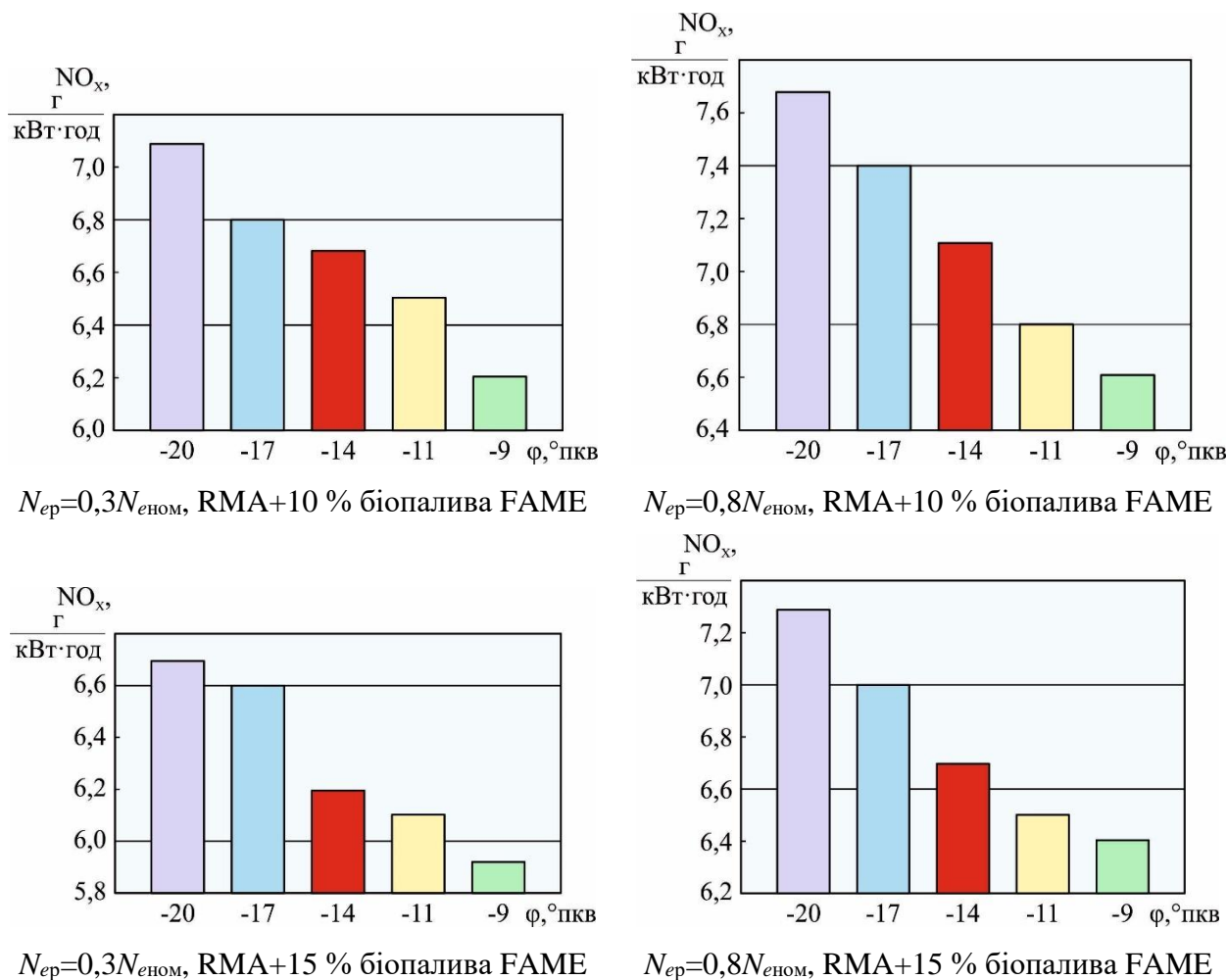


Рисунок 4 – Зміна емісії оксидів азоту для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Висновки. Виконані на суднових дизелях 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel дослідження дозволили зробити наступні висновки та визначити напрямок подальших досліджень.

1. До одного з найпоширеніших варіантів впровадження альтернативних видів палива в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту є використання паливних сумішей, основною складовою яких є паливо нафтового походження (його вміст в суміші досягає 80...95 %), решту (зі вмістом 5... 20 %) складає паливо біологічного походження.

2. Одним з розповсюджених видів палива біологічного походження є біопаливо FAME 99.9, через його схожі з дизельним паливом експлуатаційні характеристики (насамперед в'язкість, густину та температуру спалаху), це паливо може використовуватися для забезпечення роботи судових дизелів.

3. Через відмінний від дизельного палива структурний та фракційний склад біопалива, згорання паливних сумішей, що з них утворюються, здійснюється з більшим виділенням теплоти та з підвищеною швидкістю згорання. Це призводить до збільшення тиску та температури під час згорання та може стати причиною надмірного підвищення динамічних навантажень та критичного підвищення емісії оксидів азоту з випускними газами. Попередження та запобігання виникненню цих явищ можливо за рахунок зміни кутів випередження впорскування палива – як основного способу управління процесом згорання, що виникає в циліндрі дизеля.

4. Експериментально доведена необхідність зменшення кута випередження впорскування палива в разі використання в судових дизелях паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження. При цьому встановлено, що зменшення кута випередження впорскування палива зі значення -14°пкв до -9°пкв для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші забезпечує зниження максимального тиску згорання зі значень 9,1...15,8 МПа до значень 8,7...15,5 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та зниження емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень 6,19...7,14 кг/(кВт·год) до значень 5,93...6,61 кг/(кВт·год) – тобто на 4,2... 7,4 %. Також встановлено, що збільшення кута випередження впорскування палива зі значення -14°пкв до -20°пкв для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші призводить до підвищення максимального тиску згорання до значень 9,5...16,1 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та підвищення емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень до значень 7,10...7,70 кг/(кВт·год) – тобто на 7,1... 7,7 %.

5. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження сприяє підвищенню екологічних показників роботи судових дизелів та зменшенню їх динамічного навантаження. Визначення оптимальних кутів випередження палива досягається експериментальним шляхом та сприяє забезпеченню експлуатаційних показників роботи судових дизелів.

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 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.
3. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

4. Тимощук 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.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.
6. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
7. 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.
8. 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>.
9. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
10. 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>.
11. 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>.
12. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – № 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
13. Голяков В.А., Голяков В.В., Онищенко О.А. Використання технологій методології науки у дослідженнях морського та внутрішнього водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.
14. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // *Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал*. – 2012 . – № 3. – С. 84-103.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Сагін С. В. Зниження механічних втрат у суднових середньооберткових 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.

20. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
21. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки.* – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
22. 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>.
23. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy.* – 2024. – Vol. 224. – April 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.

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). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.
4. Tymoshchuk 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.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.
6. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering.* – 2023. – Vol. 11(1). – 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
7. 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.
8. 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>.

9. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
10. 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>.
11. 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>.
12. 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). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
13. Golikov V.A., Golikov V.V., Onishchenko O.A. Use of scientific and methodological technologies in maritime and inland waterway transport // *Water transport*. – 2022. – Vol. 1(35). – P. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.
14. 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.
15. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
16. 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.
17. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Sagin S.V. The rheology of motor oils in the starting and reversing modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – Vol. 3(48). – P. 67-71.
22. 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>.
23. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píštěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – April 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.

Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M.

DIRECTION OF THE INJECTION PROCESS DURING THE USE OF FUEL MIXTURES THAT INCLUDE FUEL OF BIOLOGICAL ORIGIN IN MARINE DIESEL ENGINES

Consider the issue of directing the injection process during the use of fuel mixtures that include fuel of biological origin in marine diesel engines. It was determined that during the use of fuel mixtures, which include biofuel, there is a change in the operating parameters of the diesel engine, primarily the maximum combustion pressure, the temperature of the exhaust gases, and the emission of nitrogen oxides with the exhaust gases. In order to prevent this phenomenon, as well as to improve the environmental friendliness of the ship's diesel engine and reduce mechanical and thermal loads, it is proposed to perform a reconfiguration of the high-pressure fuel equipment, which consists in changing the fuel injection advance angles. Experiments that confirmed this assumption were performed on marine diesel engines 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel, which were operated on a fuel mixture that included petroleum fuel RMA10 and biofuel FAME 99.9, which is a mixture of various methyl esters of fatty acids. Experiments were performed for two types of fuel mixtures: fuel RMA+10% biofuel FAME 99.9 and fuel RMA+15% biofuel FAME 99.9. This composition of the mixtures ensured the maximum reduction of the emission of nitrogen oxides and carbon dioxide with exhaust gases and the minimum increase in specific fuel consumption. The necessity of reducing the advance angle of fuel injection in the case of using fuel mixtures containing biological fuel in marine diesel engines has been experimentally proven. At the same time, it was found that reducing the fuel injection advance angle from -14° to -9° for different operating modes and different fuel mixture composition ensures a decrease in the maximum combustion pressure from values of 9.1–15.8 MPa to values of 8.7–15.5 MPa (by 1.9–4.4 %) and a decrease in the emission of nitrogen oxides with exhaust gases from the values of 6.19–7.14 kg/(kW·h) to the values of 5.93–6.61 kg/(kW·h) – by 4.2–7.4 %. It was also established that increasing the fuel injection advance angle from -14° to -20° for different operating modes and different fuel mixture composition leads to an increase in the maximum combustion pressure to values of 9.5–16.1 MPa (by 1.9–4.4 %) and an increase in the emission of nitrogen oxides with exhaust gases from values to values of 7.10–7.70 kg/(kW·h) – by 7.1–7.7 %. Determining the optimal fuel advance angles is achieved experimentally and contributes to ensuring the operational performance of marine diesel engines.

Key words: *environmental friendliness of diesel engine, fuel injection advance angle, fuel of biological origin, fuel of petroleum origin, high-pressure fuel equipment, marine diesel, mechanical stress, performance indicators, thermal stress.*