

УДК 629.5.016

ARTICLE HISTORY

Received 18.10.2021

Accepted 30.10.2021

Сагін Сергій Вікторович¹, Мадей Володимир Васильович²,
Сагін Арсеній Сергійович³
НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна
saginsergii@gmail.com¹, v.madey@gmail.com²,
saginarseniy@gmail.com³

Робота суднового дизеля на біодизельному паливі

Sagin Sergii¹, Madey Volodymyr², Sagin Arsenii¹
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
saginsergii@gmail.com¹, v.madey@gmail.com²,
saginarseniy@gmail.com³

Operation of marine diesel on biodiesel fuel

Анотація – Розглянутий вплив біодизельного палива на економічні та екологічні показники роботи суднового середньообертового дизеля. Експериментально встановлено, що використання паливної суміші, яку складають дизельне паливо та 5 ... 20 % біопалива, в діапазоні навантажень на судновий дизель 55 ... 75 % призводить до 4,4 ... 24,3 % зниження емісії оксидів азоту та 4,1 ... 25,4 % зниження об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах, при одночасному збільшенні питомої витрати палива до 8,2 %.

Abstract – The influence of biodiesel on the economic and environmental performance of marine diesel engines is considered. It is experimentally established that the use of a fuel mixture consisting of diesel fuel and 5 ... 20 % biofuel in the range of loads on marine diesel 55 ... 75 % leads to 4.4 ... 24.3% reduction of nitrogen oxides and 4.1 ... 25.4 % reduction in the volumetric content of carbon monoxide in the exhaust gases, while increasing the specific fuel consumption to 8.2 %.

DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107

Морський і річковий транспорт є невід'ємною складовою інфраструктури багатьох країн, пов'язаних між собою морськими і

внутрішніми водними шляхами. Рух суден, а також функціонування суднової електростанції забезпечується дизелями – найпоширенішими тепловими двигунами, застосовуваними в суднових енергетичних установках. Специфіка роботи морських і річкових суден не дозволяє використовувати на них як джерела енергії акумуляторних або сонячних батарей, а також вітрогенераторів, які в даний час активно розробляються та впроваджуються в автомобільному транспорті, а також в стаціонарній енергетиці. Отримання ефективної потужності суднових дизелів неможливо без використання палива нафтового походження, природні запаси якого щорічно знижуються [1, 2]. Одночасно з цим посилюються вимоги, що висуваються до екологічних показників роботи енергетичних установок суден морського і річкового транспорту [3, 4]. Це обумовлює впровадження в суднову енергетику альтернативних видів палива, інтенсивні дослідження можливості застосування якого ведуться в даний час [5, 6].

Використання альтернативного палива на морських судах обмежується наступними причинами:

- автономністю плавання та неможливістю безперешкодного відновлення запасів палива (у тому числі альтернативного) [7, 8];

- високою потужністю суднової енергетичної установки та відповідно високими витратами палива [9, 10];

- необхідністю в узгодженні всіх робіт із удосконалення паливної системи з кваліфікаційними товариствами, що здійснюють технічний контроль над судном та енергетичною установкою [11, 12].

Також необхідно визначити, що використання тільки біопалива для забезпечення робочого циклу суднового дизеля неможливе (передусім через його низьку теплотворну здатність), проте паливні суміші, що складаються з дизельного палива (як основного компонента) і біопалива з концентрацією до 20 ... 25 % (як домішки) отримали впровадження в судновій енергетиці [13, 14].

З урахуванням викладеного, дослідження виконувались на спеціалізованому судні дедвейтом 10820 т, що здійснювало короткочасні (протягом 4 ... 6 днів) переходи між портами, в яких була передбачена можливість поповнення запасів альтернативного палива. Як таке використовувалось біопаливо B99.9 FAME, що складається з 99,9 % біодизельного палива та 0,1 % дизельного палива класу Ultra-Low Sulfur Diesel fuel (з наднизьким вмістом сірки $S=0,03\%$). Як «базове» використовувалось паливо DMB, що рекомендовано для середньообертових дизелів, які виконують функції

допоміжних двигунів. Вміст біопалива в паливній суміші змінювався в межах 5 ... 15 % від загального об'єму.

Дослідження виконувалися на суднових середньо-обертових дизелях 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel з наступними основними характеристиками:

діаметр циліндра – $d=0,17$ м;

хід поршня – $s=0,27$ м;

частота обертання – $n=1000$ хв⁻¹;

номінальна потужність – $N_{\text{еном}}=490$ кВт;

кількість циліндрів – $i_{\text{ц}}=5$, –

що у кількості трьох штук входили до складу суднової допоміжної енергетичної установки. Принципова схема паливної системи дизелів показана на рис. 1.

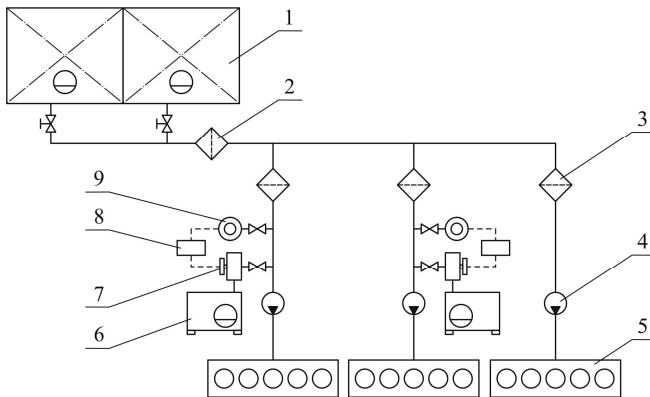


Рис. 1. Принципова схема паливної системи суднових дизелів 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel: 1 – витратна паливна цистерна; 2 – паливний фільтр грубого очищення; 3 – паливний фільтр тонкого очищення; 4 – паливний насос; 5 – дизель; 6 – цистерна біопалива; 7 – дозатор; 8 – мікроконтролер; 9 – витратомір

Паливна цистерна одного з дизелів не змінювалась та цей дизель експлуатувався на паливі ДМВ (з в'язкістю 8 сСт і вмістом сірки 0,08 %) та вважався «контрольним». До паливних систем двох інших дизелів додатково встановлювалось обладнання, що дозволяло використовувати в них біопаливо [15, 16].

З витратної цистерни 1 паливо ДМВ через фільтр грубого очищення 2 прямувало до паливних насосів 4 дизелів 5. Додатково очищення палива забезпечувалось за допомогою фільтра 3. Контур

подачі палива до першого дизеля не змінювався та дизель експлуатувався на паливі ДМВ. В'язкість палива дозволяє додавати в нього біопаливо (з в'язкістю 10 сСт). Вміст біопалива в паливній суміші змінювався в інтервалі 5 ... 20 %, паливна суміш подавалася до двох інших дизелів, в контур яких додатково встановлювалися цистерна біопалива 6, дозатор 7 і витратомір 9. Необхідна кількість біопалива в паливній суміші забезпечувалась за допомогою мікроконтролера 8, використання яких день від дня поширюється в суднових енергетичних установках [17, 18].

Метою дослідження є визначення впливу альтернативного палива на економічні та екологічні показники роботи суднового дизеля.

Критерієм економічності роботи дизеля була обрана питома ефективна витрата палива b_e [19]. Як екологічні показники роботи суднових дизелів приймалися концентрація оксидів азоту C_{NO_x} та об'ємний вміст оксиду вуглецю C_{CO_2} в випускних газах [20, 21].

Питома ефективна витрата палива b_e визначалась за допомогою суднових вимірювальних засобів – витратоміра, встановленого на магістралі підведення палива до паливного насосу високого тиску, а також таймера, та розраховувалась за залежністю

$$b_e = \frac{G_r}{N_{\text{ереж}}^{\text{д}}},$$

де G_r – годинна витрата палива, кг/год, що визначається за виразом

$$G_r = \frac{V_{\text{т}} \rho}{t},$$

$V_{\text{т}}$ – обсяг палива, що пройшло через витратомір, м^3 ;

ρ – густина палива при відповідній температурі, $\text{кг}/\text{м}^3$;

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

$N_{\text{ереж}}^{\text{д}}$ – потужність дизеля, на різних режимах роботи, кВт, яка визначалась за допомогою електронного обладнання, розташованого в центральному посту управління машинного відділення [22, 23].

Під час проведення експериментів концентрація оксидів азоту NO_x , а також об'ємний вміст CO_2 в випускних газах контролювались за допомогою газоаналізатора Testo350XL (виробництва Німеччини), що дозволяє визначати концентрації наступних речовин: CO_2 , O_2 , N_2 , NO_x , CH_4 , HC , SO_2 , H_2S , а також температуру, вологість, швидкість і диференціальний тиск вимірюваного середовища [8, 20]. Основні характеристики газоаналізатора Testo350XL під час визначення необхідних параметрів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики газоаналізатора Testo350XL

Параметр, що вимірюється	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання, %	Швидкодія, с
Температура	-40 ... 1200 °C	±0,5	2 ... 30
Вміст NO _x	0 ... 2000 млн ⁻¹ , 0 ... 3000 млн ⁻¹	±1,0	1 ... 30
Вміст CO ₂	0...50 об'ємних %	±1,0	1 ... 10

Для перерахунку виміряної за допомогою газоаналізатора Testo350XL концентрації NO_x, [ppm], (що визначалась в ppm або в млн⁻¹) в таку, що відповідно до вимог Annex VI MARPOL визначається в г/(кВт·год), за допомогою витратоміру вимірювалась витрата випускних газів, G_{вг}, кг/год, та далі виконувався розрахунок концентрації NO_{x,кг/год}:

$$NO_x[\text{кг/год}] = \frac{NO_x[\text{ppm}] \cdot G_{\text{вг}}}{\lim NO_x},$$

де $\lim NO_x$ – максимально можливе значення концентрації NO_x, що визначається за газоаналізатором Testo350XL (2000⁻¹ або 3000 млн⁻¹ в залежності від обраного діапазону вимірювань).

Після чого, з урахуванням значення ефективної потужності дизеля $N_{\text{ереж}}^{\text{д}}$, необхідна в розмірності кг/(кВт·год) концентрація NO_x визначалась як:

$$NO_x = \frac{NO_x[\text{кг/год}]}{N_{\text{ереж}}^{\text{д}}}.$$

Витрата випускних газів вимірювалась за допомогою витратоміра MT100S фірми «Siemens AG» (Німеччина). Витратоміри серії MT100 відносяться до багатоточкових (із кількістю вимірювальних зондів від 2 до 8) масових витратомірів повітря і газів, які працюють за принципом теплового розсіювання. Чутливість витратомірів MT100 становить 0,07 ... 0,2 м³/с, робоча температура – до 454° C, що забезпечує їх функціональність у всьому діапазоні експлуатаційних навантажень дизеля. Витратоміри MT100 та газоаналізатори Testo350XL відповідають вимогам Системи безперервного моніторингу викидів (Continuous Emission Monitoring System – CEMS)

Агентства з охорони навколишнього середовища (Environmental Protection Agency – EPA).

Аналіз випускних газів виконувався в газовипускній магістралі на відстані 10 м від місця виходу газів з газотурбонагнетача, що відповідало вимогам Технічного кодексу за NO_x .

Похибка у вимірюванні витрати газів, що визначався витратоміром MT100S, не перевищувала $\pm 0,5\%$; похибка у вимірі емісії NO_x 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 DMB) та один, або два інших (в яких використовувалась суміш палива DMB та біопалива). Дизелі, на яких виконувалися експериментальні дослідження, забезпечували потужністю постійні групи споживачів. При цьому (залежно від досліджуваних режимів) їх потужність становила 270 кВт, 320 кВт, 365 кВт, 415 кВт, що відповідало навантаженню $0,55N_{\text{ном}}$, $0,65N_{\text{ном}}$, $0,75N_{\text{ном}}$, $0,85N_{\text{ном}}$. Похибка в навантаженні під час переходу дизеля з одного сталого режиму до іншого не перевищувала $\pm 1,5\%$ [24].

Перед початком проведення експерименту всі дизелі мали порівняний моторесурс паливної апаратури, деталей циліндрової групи, підшипників руху, а також однаковий технічний стан. У випадку зміні 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. У зв'язку з великим часом проведення експерименту інерційність вимірювання витрати газів (характерний недолік витратомірів теплових витратомірів, до класу яких відноситься витратомір MT100S) повністю нівелювалася і не впливала на результати. За таких умов також постійною можливо вважати концентрації CO_2 та NO_x в випускних газах.

Результати дослідження наведені в табл. 2 - 4.

Таблиця 2

Питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год), для палива різного складу

Режим роботи дизеля	DMB	DMB+ 5 % біопалива	DMB+ 10 % біопалива	DMB+ 15 % біопалива	DMB+ 20 % біопалива
$0,55N_{\text{енорм}}$	208	212	215	218	225
$0,65N_{\text{енорм}}$	203	206	209	211	218
$0,75N_{\text{енорм}}$	198	201	203	206	212
$0,85N_{\text{енорм}}$	192	194	196	199	205

Таблиця 3

Концентрація оксидів азоту у випускних газах, г/(кВт·год), для палива різного складу

Режим роботи дизеля	DMB	DMB+ 5 % біопалива	DMB+ 10 % біопалива	DMB+ 15 % біопалива	DMB+ 20 % біопалива
$0,55N_{\text{енорм}}$	7,42	7,09	6,52	6,03	6,67
$0,65N_{\text{енорм}}$	7,83	7,35	6,78	6,18	6,84
$0,75N_{\text{енорм}}$	8,17	7,67	6,54	6,28	6,93
$0,85N_{\text{енорм}}$	8,35	7,82	6,36	6,32	7,08

Таблиця 4

Об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах, %, для палива різного складу

Режим роботи дизеля	DMB	DMB+ 5 % біопалива	DMB+ 10 % біопалива	DMB+ 15 % біопалива	DMB+ 20 % біопалива
$0,55N_{\text{енорм}}$	6,28	6,02	5,68	5,31	4,82
$0,65N_{\text{енорм}}$	6,42	6,11	5,73	5,41	4,87
$0,75N_{\text{енорм}}$	6,72	6,32	5,88	5,58	5,02
$0,85N_{\text{енорм}}$	6,85	6,44	5,95	5,63	5,11

За результатами експериментів побудовані діаграми, що відображають зміни питомої ефективної витрати палива (рис. 2, а), емісії NO_x (рис. 2, б) та об'ємної концентрації CO_2 в випускних газах (рис. 2, в) для різних умов експлуатації суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel.

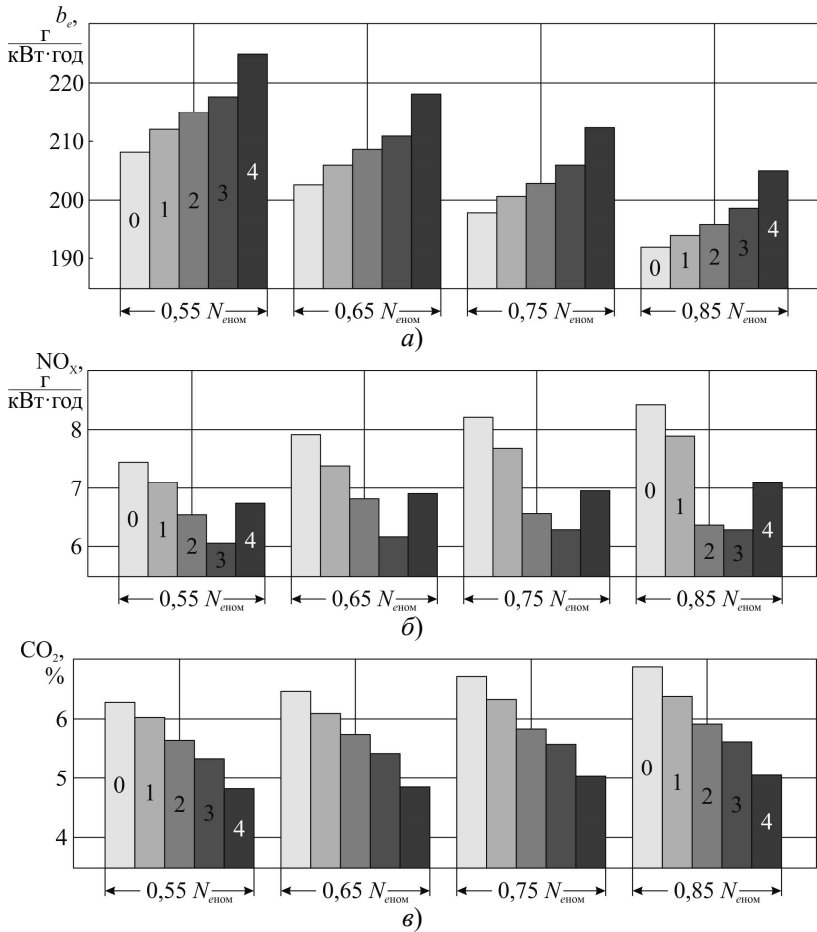


Рис. 2. Залежності показників роботи дизеля 5DC-17A від навантаження під час використання палива різного складу: 0 – DMB; 1 – DMB+5 % біопалива; 2 – DMB+10 % біопалива; 3 – DMB+15 % біопалива; 4 – DMB+20 % біопалива; а – питома витрата палива; б – емісія оксидів азоту; в – об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах

Концентрація оксидів азоту у випускних газах суднових дизелів регламентується вимогами Annex VI MARPOL. Згідно з цими вимогами концентрація NO_x у випускних газах для дизелів, що відносяться до рівню Tier II, не повинні перевищувати значення

$$C_{\text{NO}_x} \leq 44n^{-0,23}, \quad (1)$$

де n – частота обертання вала дизеля, хв^{-1} .

Для суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel

$$C_{\text{NO}_x} \leq 44 \cdot 1000^{-0,23} = 8,98 \text{ г/(\кВт} \cdot \text{год)}.$$

Зазначимо, що на всіх досліджуваних режимах і за будь-яких умов проведення експерименту концентрація оксидів азоту у випускних газах не перевищувала значення, визначеного за виразом (1), таким чином експлуатація дизелів проводилася із забезпеченням вимог Annex VI MARPOL [4, 9].

Відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO_2 в випускних газах, а також питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувались за виразами

$$\Delta\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^{\text{DMB}} - \text{NO}_x^{\text{біо}}}{\text{NO}_x^{\text{DMB}}} \cdot 100\%, \quad \Delta\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2^{\text{DMB}} - \text{CO}_2^{\text{біо}}}{\text{CO}_2^{\text{DMB}}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{біо}} - b_e^{\text{DMB}}}{b_e^{\text{біо}}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{DMB} , $\text{NO}_x^{\text{біо}}$, b_e^{DMB} , $b_e^{\text{біо}}$ – концентрація оксиду азоту в випускних газах та питома ефективна витрата палива під час експлуатації дизеля на паливі DMB та біопаливі, $\text{г/(\кВт} \cdot \text{год)}$;

CO_2^{DMB} , $\text{CO}_2^{\text{біо}}$ – об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах під час експлуатації дизеля на паливі DMB та біопаливі, %.

Отримані значення узагальнені у табл. 5 - 7, а також відображені на діаграмах, наведених на рис. 3.

Таблиця 5

Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива, %, для палива різного складу

Режим роботи дизеля	DMB+5 % біопалива	DMB+10 % біопалива	DMB+15 % біопалива	DMB+20 % біопалива
$0,55N_{\text{еном}}$	1,92	3,37	4,81	8,17
$0,65N_{\text{еном}}$	1,48	2,96	3,94	7,39
$0,75N_{\text{еном}}$	1,52	2,53	4,04	7,07
$0,85N_{\text{еном}}$	1,04	2,08	3,65	6,77

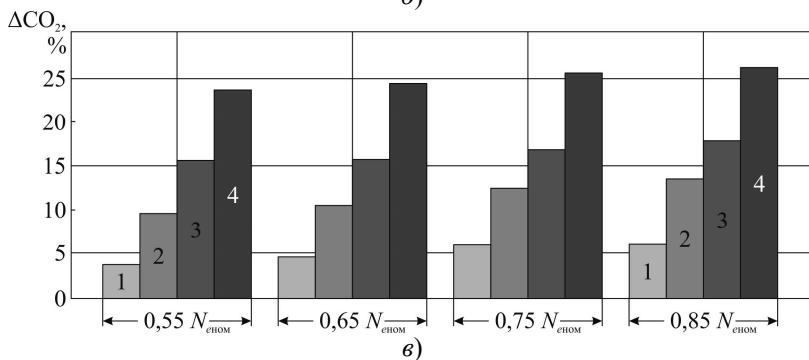
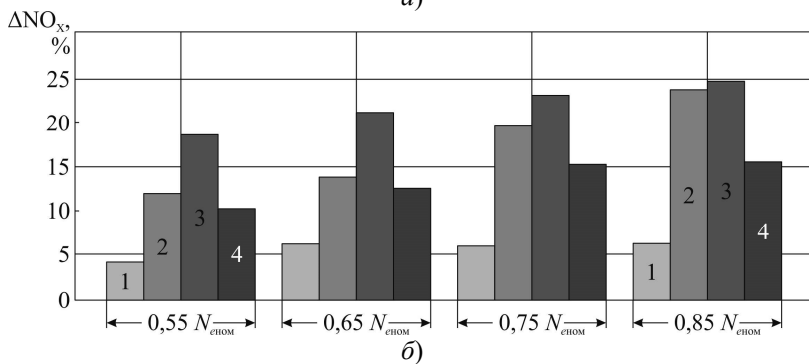
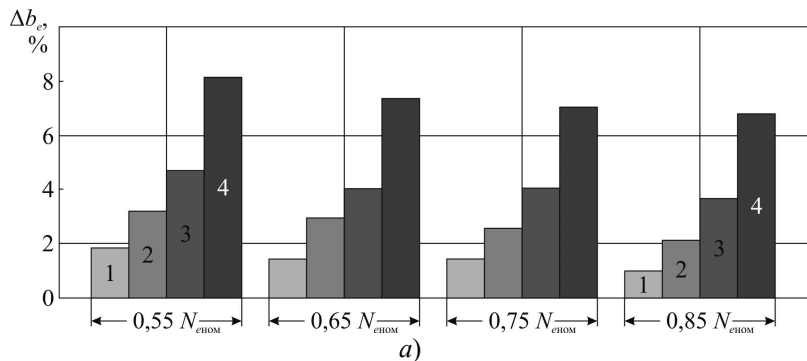


Рис. 3. Відносна зміна показників роботи дизеля 5DC-17A від навантаження під час використання палива різного складу: 1 – DMB+5 % біопалива; 2 – DMB+10 % біопалива; 3 – DMB+15 % біопалива; 4 – DMB+20 % біопалива; а – збільшення питомої витрати палива; б – зменшення емісії оксидів азоту; в – зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах

Таблиця 6

Відносне зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах, %, для палива різного складу

Режим роботи дизеля	DMB+5 % біопалива	DMB+10 % біопалива	DMB+15 % біопалива	DMB+20 % біопалива
$0,55N_{\text{енорм}}$	4,45	12,13	18,73	10,11
$0,65N_{\text{енорм}}$	6,13	13,41	21,07	12,64
$0,75N_{\text{енорм}}$	6,12	19,95	23,13	15,18
$0,85N_{\text{енорм}}$	6,35	23,83	24,31	15,21

Таблиця 7

Відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах, %, для палива різного складу

Режим роботи дизеля	DMB+5 % біопалива	DMB+10 % біопалива	DMB+15 % біопалива	DMB+20 % біопалива
$0,55N_{\text{енорм}}$	4,14	9,55	15,45	23,25
$0,65N_{\text{енорм}}$	4,83	10,75	15,73	24,14
$0,75N_{\text{енорм}}$	5,95	12,5	16,96	25,3
$0,85N_{\text{енорм}}$	5,99	13,14	17,81	25,4

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

В деяких теплових двигунах суднових енергетичних установок (насамперед дизелях, що виконують функції допоміжних двигунів) можливо використання паливних сумішей, основу яких (80 ... 95 %) складає дизельне паливо, решту – біопаливо.

Випробуваннями, що виконувались на суднових середньообертових дизелях 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel в діапазоні їх експлуатаційних навантажень 55 ... 85 % з паливної сумішшю, яка включала 80 ... 95 % дизельного палива DMB та 5 ... 20 % біопалива B99.9 FAME, встановлено:

на всьому діапазоні навантажень та для всього вмісту біопалива в паливної суміші здійснюється збільшення питомої ефективної витрати палива; на експлуатаційних режимах, що відповідають 55 ... 65 % номінального навантаження та 5 ... 10 % вмісту біопалива в суміші це збільшення складає 1,92 ... 2,96 %, на режимах 75 ... 85 % навантаження та під час використання суміші з вмістом 15 ... 20 % біопалива збільшення витрати палива досягає 4,04 ... 6,67 %;

найбільш за всього економічність роботи дизеля погіршується під час його експлуатації на навантаженнях 55 ... 65 % з 15 ... 20 % вмістом біопалива в суміші, за таких умов підвищення питомої ефективної витрати палива досягає 7,39 ... 8,17 %;

під час експлуатації дизеля на діапазоні навантаженні 55 ... 85 % спостерігається зменшення емісії оксидів азоту, при цьому найбільший ефект (до 23,8 ... 24,3 %) відповідає 10 ... 15 % вмісту біопалива в суміші; з зростанням вмісту біопалива в складі суміші до 20 % зниження емісії оксидів азоту знаходиться в діапазоні 10,1 ... 15,2 %;

використання біопалива сприяє зменшенню об'ємної концентрації оксиду вуглецю у випускних газах; найбільша ефективність при цьому відповідає навантаженню 75 ... 85 % та використання паливної суміші, що містить 20 % біопалива, за таких умов зниження концентрації оксиду вуглецю досягає 25,4 %; додатково визначимо, що це сприяє підвищенню енергетичної ефективності морських суден [26].

Оптимальний склад паливної суміші, що містить біопаливо, доцільно визначати для кожного навантаження дизеля з урахуванням його екологічних (насамперед емісії оксидів азоту та об'ємної концентрації оксиду вуглецю у випускних газах), а також економічних показників роботи суднового дизеля.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S.V., Solodovnikov V.G. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines // *Modern Applied Science*. – 2015. – Vol. 9. – №. 5. – P. 269 - 278.
2. Zablotsky Yu. V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353 - 362.
3. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208 - 216.
4. Kuropyatnyk O.A. The use of bypass exhaust gases to ensure the environmental performance of marine diesel engines // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 38. – С. 217 - 228.

5. Madey V. V. Usage of biodiesel in marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2021. – № 7 - 8. – P. 18 - 21.

6. Марков В.А., Нагорнов С.А., Романцова С.В., Неворова В.В., Са Бовэнь. Метилловый эфир рапсового масла как дизельное топливо // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 6(60). – С. 17 - 30.

7. Sagin S.V., Semenov O.V. Marine Slow-Speed Diesel Engine Diagnosis with View to Cylinder Oil Specification // American Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 13. – Iss. 5. – P. 618 - 627.

8. Заблоцкий Ю.В., Куропятник А.А. Повышение топливной экономичности и экологических параметров работы судовых дизелей при использовании присадок к топливу // Austria-science. – 2017. – № 2. – С. 83 - 88.

9. 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.

10. Солодовников В.Г. Ультразвуковая обработка топлива для снижения сернистой коррозии в судовых среднеоборотных дизелях // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2015. – Вып. 20. – С. 84 - 91.

11. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 - 34.

12. Побережный Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – Вип. 41. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 - 9.

13. Марков В.А., Десянин С.Н., Зыков С.А., Са Бовэнь. Вязкостные характеристики многокомпонентных смесевых биотоплив на основе растительных масел // Транспорт на альтернативном топливе. – 2016. – № 6. – С. 33 - 49.

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

15. 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.

16. 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.

17. Горб С.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Шапо В.Ф. Методическое обеспечение технологий автоматизации на базе программируемых контроллеров // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2017. – Вып. 23. – С. 30 - 35.

18. Горб С.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Шапо В.Ф. Техническое обеспечение подготовки судовых инженеров по системам автоматизации с программируемыми контроллерами // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 39 - 46.

19. 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.

20. 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.

21. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84 - 103.

22. Поповский Ю.М., Сагин С.В., Ханмамедов С.А., Гребенюк М.Н., Терегеря В.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 7 - 11.

23. 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. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 79 - 89.

24. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 - 26.

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

26. Горб С.И. Мониторинг энергоэффективности судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 21. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 48 - 53.

Annotation – The influence of biodiesel fuel on the economic and ecological performance of the marine diesel engine is considered. The reasons limiting use of alternative fuels (including fuels based on biological origin) on vessels are indicated. The results are performed on a specialized vessel with a deadweight of 10,820 tons, which carried out short-term (within 4 ... 6 days) transitions between ports, where it was possible to replenish alternative fuel stocks. Studies performed on 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel marine diesels in the range of their operational loads 55 ... 85 %, from a fuel mixture consisting of 80 ... 95% of DMB diesel fuel and 5 ... 20% of B99.9 FAME biofuel, next conclusion have been done:

in all range of loads and for all content of biofuels in the fuel mixture there is an increase in the specific efficient fuel consumption; on the operating modes in range 55 ... 65% of nominal loading and 5 ... 10 % of the maintenance of biofuel in mix this increase makes 1.92 ... 2.96 %, on the modes 75 ... 85 % of loading and at use mixtures with a content of 15 ... 20 % biofuels increase in fuel consumption reaches 4.04 ... 6.67 %; most of all, the efficiency of the diesel engine detected during its operation at loads of 55 ... 65 % and 15 ... 20 % of the biofuel content in the mixture, in this conditions, the increase in specific fuel efficiency reaches 7.39 ... 8.17 %;

during the operation of the diesel engine in the load range of 55 ... 85 %, the emission of nitrogen oxides is observed, with best efficacies (up to 23.8 ... 24.3 %) corresponding to 10 ... 15 % of the biofuel content in mixtures; with an increase in the content of biofuels in the mixture up to 20 % reduction in emissions of nitrogen oxides is in the range of 10.1 ... 15.2 %;

the use of biofuels helps to reduce the volume concentration of carbon monoxide in the exhaust gases; the greatest efficiency is corresponding at load 75 ... 85 % and use of the fuel mix containing 20 % of biofuel, under such conditions decrease in concentration of carbon monoxide reaches 25.4%; which further enhances the energy efficiency of ships.

The optimal composition of the fuel mixture containing biofuel has been proposed, taking into account its environmental (before the emission of nitrogen oxides and the volume concentration of carbon monoxide in the exhaust gases), as well as economic performance of marine diesel.