

10.31653/smf48.2024.100-113

Сагін С.В., Куропятник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Постановка проблеми в загальному вигляді. Судна морського транспорту забезпечують перевезення вантажів між країнами та континентами, які розділені морями та океанами. Практично на всіх судах, незалежно від їх характеристик та призначення, як головний двигун використовуються двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Крім того, ДВЗ на судах морського та внутрішнього водного транспорту виконують функцію допоміжних двигунів – забезпечуючи необхідною потужністю судову електростанцію [1-3].

Функціонування суднових ДВЗ неможливе без використання палива, основним видом якого є рідке паливо нафтового походження. Газові дизелі, а також двохпаливні ДВЗ в даний час встановлюються тільки на деяких типах спеціалізованих суден, тому за своєю кількістю та загальною потужністю не можуть конкурувати з ДВЗ, які працюють на рідкому паливі [4-6].

Одночасно з цим всі провідні дизелебудівні фірми займаються питаннями використання в дизелях альтернативних видів палива, до одного з яких відноситься паливо біологічного походження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними складовими, що використовуються під час виробництві палива біологічного походження, є рослинні та тваринні жири, хімічний склад яких незначно відрізняється один від одного. Рослинні олії як моторні палива можна використовувати як у чистому вигляді, так і в суміші з дизельним та іншими нафтовими паливами, а також із газовими конденсатами, спиртами, ефірами та іншими альтернативними паливами. Джерелом рослинних олій служать олійні культури, в насінні або плодах яких містяться рослинні жири. До олійних відноситься більше 150 видів рослин, з яких виробляють рослинні олії. Залежно від кліматичних умов та доступності вирощування, сировиною для виробництва біодизелю можуть бути різні рослинні олії – від оливкової олії до тваринного жиру [7-9].

Близько 87,4 % світового виробництва рослинних олій припадає на пальмову, соєву, рапсову та соняшникову олії, решту 12,6 % – на

арахісову, бавовняну, оливкову, кокосову та пальмоядрову. Безумовно, більша частина цього обсягу використовується у харчовій промисловості. Однак, частина олії використовується як сировина для виробництва біопалива. Ріпакова олія займає третє місце за обсягом виробництва у світі після пальмової та соєвої. При цьому, для виробництва біодизельного палива, найактивніше використовується саме ріпакова олія. У різних рослинних оліях міститься різна кількість жирних кислот, що призводить до певної відмінності в їх характеристиках. Усі рослинні палива мають схожі один з одним основні характеристики – густину, температуру спалаху, нижчу теплотворну здатність. При згорянні вони виділяють приблизно на 10...12 % менше тепла, ніж дизельне паливо на нафтовій основі. Стандартів для теплоти згорання палива з олії не існує, проте більш висока теплотворна здатність палива є важливою властивістю, що використовується під час визначенні їх якості [10-12].

American society of testing and materials (ASTM) як основну характеристику якості палива на основі рослинних олій визначає цетанове число. Специфікація ASTM D6751 вказує на мінімальне цетанове число 47 для рослинного палива. Усі палива на основі рослинних олій, приготовані з сировини, що найчастіше використовується, перевищують це значення.

Відмінною особливістю палив з олії є мінімальний рівень вмісту сірки. Це дозволяє використовувати їх у спеціальних екологічних районах – SECAs).

Екологічна ефективність використання біопалива також характеризується меншою кількістю вуглекислого газу, що утворюється за його згорання. При спалюванні традиційне паливо виробляє велику кількість вуглекислого газу, який вважається парниковим газом та причиною утримання сонячного тепла на планеті. Спалювання вугілля та нафти підвищує температуру та викликає глобальне потепління. Використання біопалива зменшує вплив парникових газів на довкілля [13-15].

У різних наукових дослідженнях містяться суперечливі дані щодо кількості викидів оксидів азоту NO_x при використанні 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).

Біодизельне паливо (або FAME – Fatty Acid Methyl Ester, метилові ефіри жирних кислот) на відміну від дизельного палива на нафтовій основі, виробляється з відновлюваних органічних джерел. Основні експлуатаційні характеристики FAME (густина, в'язкість, температура спалаху, теплотворна здатність) збігаються з аналогічними показниками дизельного палива – це дозволяє використовувати його у більшості сучасних ДВЗ. Як правило, у чистому вигляді біодизельне паливо FAME не використовується. Найбільш доцільний варіант його використання – паливні суміші із паливом нафтового походження. У таких сумішах нафтове паливо є основним компонентом та його кількість становить 70...95 % за масою. Біодизельне паливо використовується як добавка, його кількість становить 5...30 % за масою. Такі палива класифікуються як B5, B10...B25, B30 [16-18].

Палива біологічного походження характеризуються меншою теплотворною здатністю порівняно з паливами нафтового походження. При цьому зменшується кількість енергії, що виділяється під час його згоряння в циліндрі дизеля. Це є причиною зниження крутного моменту та потужності дизеля під його роботі тільки на біопаливі. Саме тому в чистому вигляді (тільки паливо FAME) біодизельне паливо не застосовується, крім того, склад біодизельного палива в його суміші з паливом нафтового походження не перевищує 30 % (що відповідає біодизельному паливу B30). При цьому забезпечення необхідного крутного моменту (і відповідно потужності дизеля) забезпечується шляхом підтримки необхідної частоти обертання колінчастого валу дизеля. Це змушує збільшувати циклову подачу палива у разі використання біодизельного палива.

Використання біопалива змінює перебіг робочого циклу в циліндрі дизеля, насамперед процес згоряння [19, 20]. Це призводить до зміни експлуатаційних показників дизелів, при цьому виникає завдання визначення фаз паливоподачі (насамперед кута випередження подачі палива), за якими зміна цих показників підвищує ефективність роботи дизеля та покращує його екологічні показники [21, 22]. Вирішення цієї задачі можливе шляхом проведення експериментів на основних експлуатаційних режимах роботи дизеля.

Постановка завдання. В зв'язку з вищевикладеним завданням досліджень було визначення оптимальних режимів експлуатації суднових ДВЗ під час використання біодизельного палива.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на судновому дизелі 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group

та трьох судових дизелях 6DL-16 Daihatsu Diesel, які виконували функції головного та допоміжного двигунів в складі судової енергетичної установки балкера водотоннажністю 68340 тонн.

Експлуатація дизелів здійснювалася з використанням палив нафтового походження DMA та RMG380, а також біодизельного палива B10. Паливо B10 включає 90 % дизельного палива, а також 10 % палива біологічного походження FAME [23, 24].

Дослідження виконувались для рекомендованого фірмами виробниками діапазону кутів випередження подачі палива θ , які вимірювалися у градусах повороту колінчастого валу – grad ARC та складали:

для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W – $-1 \dots -7$ grad ARC;

для дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel – $-20 \dots -8$ grad ARC.

При цьому як найбільш раціональний для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W рекомендований кут -4° grad ARC, для дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel -14 grad ARC. Саме з такими кутами випередження упорскування експлуатувалися дизелі під час використання дизельного палива. Саме ці кути були обрані як «базові» при випробуваннях з використанням біопалива B10.

Як контрольні параметри, за якими оцінювалися експлуатаційні показники судових дизелів, вибиралися максимальний тиск згоряння p_z , температура випускних газів t_g , питома ефективна витрата палива b_e та концентрація оксидів азоту у випускних газах NO_x . Їхнє визначення виконувалося за допомогою судової системи моніторингу та діагностики ProPower. Вибір цих показників було обґрунтовано з урахуванням наступного. Максимальний тиск згоряння характеризує енергетичну ефективність робочого циклу дизеля, з його збільшенням підвищуються всі основні показники роботи дизеля, насамперед середній індикаторний тиск та індикаторна / ефективна потужність. Температура випускних газів характеризує ефективність згоряння палива. Збільшення температури випускних газів свідчить про зміщення процесу згоряння на лінію розширення та догорання палива у випускному ресивері. Максимальний тиск згоряння та температура випускних газів є обов'язковими показниками, що контролюються під час експлуатації дизеля. При цьому їх значення визначають для кожного окремого циліндра, середнє для всіх циліндрів дизеля, а також розраховується відхилення значень для окремих циліндрів від середнього. Питома ефективна витрата палива характеризує паливну економічність роботи дизеля та характеризує економічну

доцільність вибору тих чи інших параметрів паливоподачі. Також питома витрата палива прямо пропорційно пов'язана із загальною витратою палива (годинною або добовою) та впливає на суднові запаси палива – показник, який є актуальним саме для суден морського транспорту, які здійснюють тривалі морські чи океанські переходи без можливості бункерування. Концентрація оксидів азоту у випускних газах є основним показником, що характеризує екологічні показники роботи суднових дизелів. Її значення регламентується відповідно до вимог Annex VI MARPOL і залежить від швидкісного режиму роботи дизеля та року будівництва судна [25-27].

Результати експериментів наведені у табл. 1, 2.

Таблиця 1. Результати експериментів (дизель 5S60ME-C8 MAN-B&W)

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC							DF
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
p_z , МПа	14,6	15,3	15,3	15,1	14,9	14,5	14,2	15,3
t_g , °C	291	284	284	288	291	293	298	284
b_e , г/(кВт·год)	183	176	177	179	184	188	193	176
NO_x , г/(кВт·год)	11,88	13,42	10,55	10,75	11,05	11,35	12,42	13,42

DF – експлуатація на дизельному паливі

Таблиця 2. Результати експериментів (дизель дизель 6DL-16 Daihatsu Diesel)

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC							DF
	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	
p_z , МПа	15,8	16,45	16,7	16,45	16,25	15,95	15,7	16,7
t_g , °C	334	326	324	328	330	332	339	324
b_e , г/(кВт·год)	198	195	195	194	199	203	207	191
NO_x , г/(кВт·год)	6,68	6,21	6,08	6,16	6,37	6,72	7,04	7,84

DF – експлуатація на дизельному паливі

Для кращої візуалізації результати досліджень, що наведені в табл. 1, 2, подані як діаграми (рис. 1, 2).

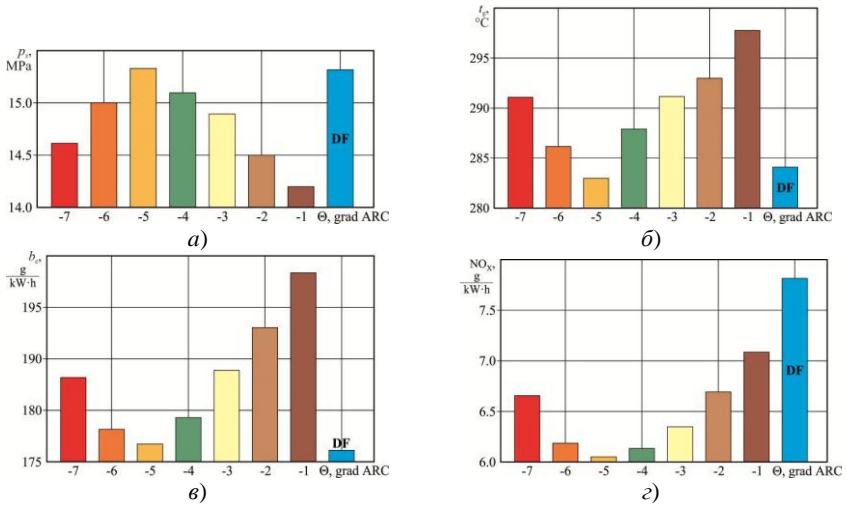


Рис. 1. Зміна експлуатаційних показників роботи дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10: *a* – максимальний тиск згоряння; *б* – температура випускних газів; *в* – питома ефективна витрата палива; *г* – концентрація оксидів азоту у випускних газах; DF – дизельне паливо

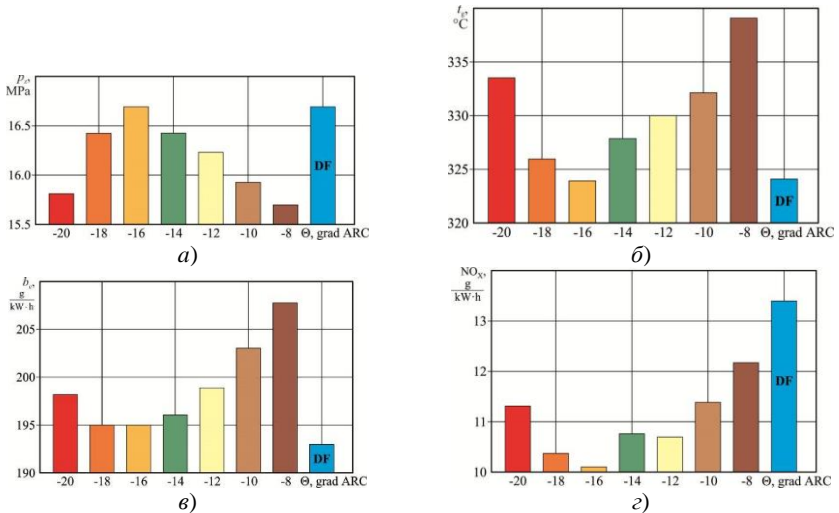


Рис. 2. Зміна експлуатаційних показників роботи дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10: *a* – максимальний тиск згоряння; *б* – температура випускних газів; *в* – питома ефективна витрата палива; *г* – концентрація оксидів азоту у випускних газах; DF – дизельне паливо

Відносна зміна експлуатаційних параметрів дизелів за різних кутів випередження подачі біодизельного палива B10 виконувалась за формулами:

відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах

$$\Delta \text{NO}_X = \frac{\text{NO}_X^{\text{DF}} - \text{NO}_X^{\text{B10(i)}}}{\text{NO}_X^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

відносне збільшення питомої ефективної витрати палива

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{B10(i)}} - b_e^{\text{DF}}}{b_e^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

відносне зниження максимального тиску згоряння

$$\Delta p_z = \frac{p_z^{\text{DF}} - p_z^{\text{B10(i)}}}{p_z^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (3)$$

відносне збільшення температури випускних газів:

$$\Delta t_g = \frac{t_g^{\text{B10(i)}} - t_g^{\text{DF}}}{t_g^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (4)$$

де NO_X^{DF} , b_e^{DF} , p_z^{DF} , t_g^{DF} – концентрація оксидів азоту у випускних газах, питома ефективна витрата палива, максимальний тиск згоряння, температура випускних газів при використанні дизельного палива;

$\text{NO}_X^{\text{B10(i)}}$, $b_e^{\text{B10(i)}}$, $p_z^{\text{B10(i)}}$, $t_g^{\text{B10(i)}}$ – концентрація оксидів азоту у випускних газах, питома ефективна витрата палива, максимальний тиск згоряння, температура випускних газів при різних кутах випередження подачі біодизельного палива B10.

Значення, що отримані за формулами (1)-(4), представлені у табл. 3, 4.

Таблиця 3. Відносна зміна експлуатаційних параметрів дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W за різних кутів випередження подачі біодизельного палива B10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
p_z , МПа	4,58	1,96	0	1,31	2,61	5,23	7,19
t_g , °C	2,46	0,70	0	1,41	2,46	3,17	4,93
b_e , г/(кВт·год)	3,98	1,14	0,57	1,70	1,55	6,82	9,66
NO_X , г/(кВт·год)	11,48	16,39	21,39	19,90	17,66	15,43	7,45

Таблиця 4. Відносна зміна експлуатаційних параметрів дизеля 6DL-16 Daihatsu за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8
p_{zz} , МПа	5,39	1,50	0	1,50	2,70	4,49	5,99
t_g , °C	3,09	0,62	0	1,23	1,85	2,47	4,63
b_e , г/(кВт·год)	3,66	2,09	2,09	1,57	4,19	6,29	8,38
NO_x , г/(кВт·год)	14,80	20,79	22,45	21,43	18,75	14,29	10,20

Для комплексної оцінки відносної зміни експлуатаційних показників роботи дизелів за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10 побудовано діаграми, які показані на рис. 3.

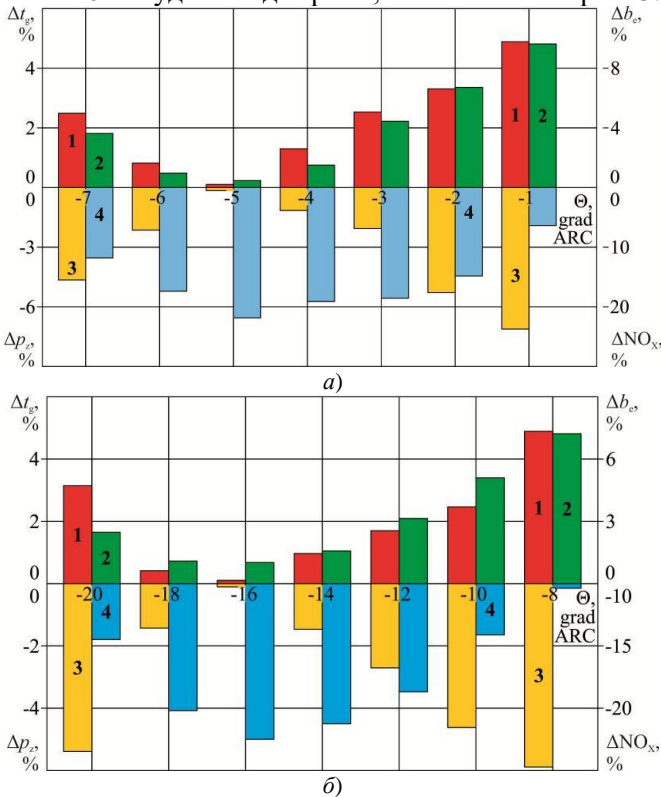


Рис. 3. Відносна зміна експлуатаційних показників роботи суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W (а) та 6DL-16 Daihatsu Diesel (б) за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10: 1 – температура випускних газів; 2 – питома ефективна витрата палива; 3 – максимальний тиск згоряння; 4 – концентрація оксидів азоту у випускних газах

Екологічна ефективність використання біопалива В10 оцінювалася за значенням екологічної стійкості суднових дизелів за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10. Значення екологічної стійкості ΔNO_x^+ визначалося за формулою

$$\Delta\text{NO}_x^+ = \frac{\text{NO}_x^{\max} - \text{NO}_x^{\text{B10(i)}}}{\text{NO}_x^{\max}} \cdot 100\%; \quad (5)$$

де NO_x^{\max} – максимально можлива концентрація оксидів азоту у випускних газах відповідно до вимог Annex VI MARPOL.

Для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W $\text{NO}_x^{\max} = 14,4$ г/(кВт·год), для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel визначається за формулою

$$\text{NO}_x^{\max} = 44n^{-0,23}; \quad (6)$$

де n – частота обертання, хв^{-1} .

С урахуванням характеристик дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel

$$\text{NO}_x^{\max} = 44 \cdot 1200^{-0,23} = 8,61 \text{ г/(кВт·год)}.$$

Значення екологічної стійкості ΔNO_x^+ суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W та 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10 наведені у табл. 5, 6.

Таблиця 5. Екологічна стійкість дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
p_z , МПа	17,5	22,08	26,74	25,35	23,26	21,18	13,75

Таблиця 6. Екологічна стійкість дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8
p_z , МПа	22,46	27,91	29,42	28,49	26,06	21,99	18,28

Чим більше значення екологічної стійкості ΔNO_x^+ – тим далі від регламентованого Annex VI MARPOL NO_x^{\max} значення концентрації оксидів азоту у випускних газах.

Для кращої візуалізації за значеннями, наведеними в табл. 3, 4, побудовані діаграми (рис. 4).

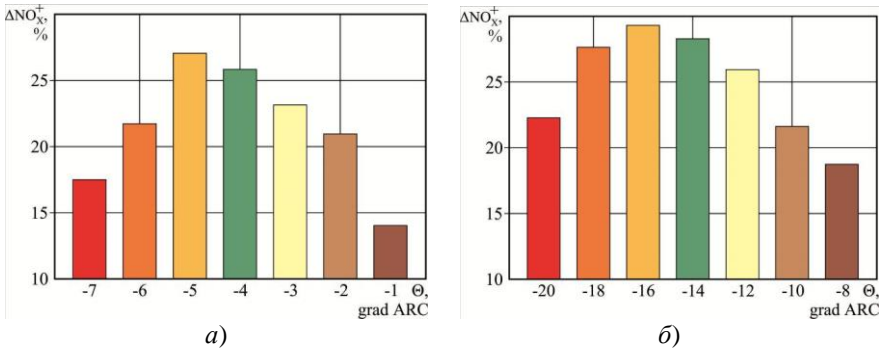


Рис. 4. Екологічна стійкість судових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W (а) та 6DL-16 Daihatsu Diesel (б) за різних кутах випередження подачі біодизельного палива B10

Під час проведення досліджень контролювались та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних дизелів, а також параметри у системах, що забезпечують їхнє функціонування. До них були віднесені:

тиск у циліндрі в кінці стиснення, температура випускних газів, середній індикаторний тиск, а також відхилення цих показників від середнього значення по всіх циліндрах;

частота обертання валу дизеля;

фази газорозподілу (кути відкриття та закриття продувних та випускних клапанів);

тиск і температура охолоджувальної води та циркуляційного мастила на вході та виході з дизелів;

температура та в'язкість палива, а також технічний стан паливної апаратури високого тиску.

У зв'язку з односпрямованим перебігом процесів та пропорційними значеннями результатів, у табл. 1-6 і на рис. 1-4 наведено лише дані, які відповідають максимальному навантаженню на дизелі, а саме 0,95 $N_{ном}$ для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W і 0,8 $N_{ном}$ для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Підвищення ефективності використання біопалива полягає не тільки у виборі його оптимального складу, але також у визначенні оптимальних кутів випередження подачі біопалива в циліндр дизеля. Зміна кутів випередження подачі біопалива (порівняно з варіантом роботи дизе-

ля на дизельному паливі) необхідна у зв'язку зі зміною складу паливної суміші, що згоряє в циліндрі дизеля.

Залежності основних експлуатаційних показників роботи як двотактних, так і чотиритактних дизелів від кута випередження подачі палива мають синусоїдальний вигляд та характеризуються наявністю оптимуму – мінімальних значень температури випускних газів, концентрації оксидів азоту у випускних газах, питомої ефективної витрати палива, а також максимального значення тиску згорання.

З метою підвищення ефективності використання біопалива необхідно зсувати процес подачі на лінію стиснення – збільшувати кут випередження подачі палива, при цьому діапазон цієї зміни має відповідати рекомендаціям заводів виробників щодо можливих кутів подачі палива.

Оптимальний кут випередження подачі біопалива визначається експериментальним шляхом та залежить від характеристик дизеля.

Використання біопалива (порівняно з експлуатацією дизеля на дизельному паливі) збільшує екологічну стійкість дизеля. Причому це відбувається у всьому діапазоні експлуатаційних режимів дизеля. Це збільшує запас екологічної стійкості – під яким можна розуміти відносну різницю між максимально допустимою та поточною концентрацією оксидів азоту у випускних газах.

Саме підвищення екологічної стійкості судових дизелів у разі використання біопалива є найбільш позитивним критерієм та сприяє інтенсивності використання біопалива в енергетичних установках морських суден.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtěk V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.

2. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V., Dovidenko Y. Basic aspects ensuring shipping safety // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2022. – № 117. – P. 139-149. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.10>.

3. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх по-

будови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

4. Petrychenko O., Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

5. 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](https://doi.org/10.34660/INF.2020.4.52991).

6. Sagin S., Куropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: [10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).

7. Sagin S.V., Куropyatnyk O.A., Zablotskiy 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](https://doi.org/10.17818/NM/2022/1.7).

8. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

9. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pīst'ek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.

10. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 23-31. doi: [10.31653/smf47.2023.23-31](https://doi.org/10.31653/smf47.2023.23-31).

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)). – Р. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

12. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

13. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових 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.

14. 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.

15. Побережний Р.В., Сагин С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

16. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – Р. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

18. 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.

19. 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.

20. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-101.

21. Сагин С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.

22. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.

23. Руснак Д.Ю., Сагин 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.

23. Сагин С.В., Сагин С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

24. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», – С. 76-87.

25. Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден. // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2022. – Вип. 2(36). – С. 1-13. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.06.

26. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунов 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.

27. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту*, 2020. – Вип. 2(59). – С. 88-98.