

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ

В.В. Мадей¹, Ю.В. Заблоцький², А.С. Сагін³

¹к. т. н., судновий механік I-го розряду,

Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-8692-9077

²к. т. н., доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-6207-8802

³д-р філософії, доцент кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,

ORCID ID: 0009-0000-4965-6121

Анотація

Вступ. Одним із негативних факторів, що впливають на довкілля під час використання в суднових дизелях палива нафтового походження, є емісія шкідливих речовин, які входять до складу випускних газів. Саме через це в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту все більше застосування отримують альтернативні палива, в тому числі паливо біологічного походження. Водночас рекомендації щодо використання палива біологічного походження не вказують на його оптимальні концентрації в суміші з паливом нафтового походження, а також не визначають найбільш ефективні режими роботи суднових дизелів під час їх експлуатації на подібних сумішах. Це є стимулом для проведення досліджень щодо визначення впливу палива біологічного походження на екологічність судноплавства та енергоефективність морських суден, а також вибору оптимальних режимів експлуатації суднових дизелів під час використання сумішей, до яких входять палива біологічного походження. **Мета** дослідження – визначення впливу палива біологічного походження на експлуатаційні показники роботи суднових дизелів та розробка рекомендацій щодо визначення його раціональної концентрації в суміші з паливом нафтового походження. **Результати.** Визначено, що судові дизелі є не лише основними тепловими двигунами, які використовуються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, але й джерелами викидів шкідливих речовин з випускними газами. Зазначено, що зменшення емісії оксидів азоту та діоксиду вуглецю можливе шляхом використання в суднових дизелях паливних сумішей, до складу яких входять палива біологічного походження. Під час досліджень, що виконувались на суднових дизелях Wartsila 6L32, використовувались палива нафтового походження RMG500 та DMA10, а також їх суміші з паливом біологічного походження FAME. Було встановлено, що під час використання сумішей, до складу яких входить 10–30 % палива біологічного походження FAME, емісія оксидів азоту знижується на 11,20–27,10 %, за тих же умов емісія діоксиду вуглецю знижується на 5,31–19,47 %. **Висновки.** Встановлено, що використання в суднових дизелях паливних

сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, є одним зі способів, що підвищують рівень екологічної стійкості морських суден та сприяють екологічному судноплавству.

Ключові слова: екологічні показники, емісія шкідливих компонентів, морський транспорт, паливна суміш, паливо біологічного походження, паливна економічність, паливо нафтового походження, судновий дизель.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING FUELS OF BIOLOGICAL ORIGIN IN MARINE DIESEL ENGINES

V.V. Madey¹, Yu.V. Zablotskyi², A.S. Sagin³

¹PhD (Engineering), I class marine engineer,
Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-8692-9077

²PhD (Engineering), Associate Professor,
Senior Lecturer at the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6207-8802

³PhD, Senior Lecturer at the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0000-4965-6121

Summary

Introduction. One of the negative factors affecting the environment when using petroleum-based fuels in marine diesel engines is the emission of harmful substances that are part of the exhaust gases. It is because of this that alternative fuels, including fuels of biological origin, are increasingly being used in the power plants of marine and inland waterway transport vessels. At the same time, recommendations for the use of fuels of biological origin do not indicate its optimal concentrations in a mixture with petroleum-based fuels, and do not determine the most effective operating modes of marine diesel engines during their operation on such mixtures. This is an incentive for conducting research to determine the impact of fuels of biological origin on the environmental friendliness of shipping and the energy efficiency of seagoing vessels, as well as the selection of optimal operating modes of marine diesel engines when using mixtures that include fuels of biological origin. **The purpose** of the study is to determine the impact of bio-fuel on the operational performance of marine diesel engines and to develop recommendations for determining its rational concentration in a mixture with petroleum-based fuel. **Results.** It was determined that marine diesel engines are not only the main heat engines used on ships of maritime and inland waterway transport, but also sources of emissions of harmful substances with exhaust gases. It is noted that reducing emissions of nitrogen oxides and carbon dioxide is possible by using fuel mixtures in marine diesel engines that include bio-based fuel. During the studies carried out on Wartsila 6L32 marine diesel engines, RMG500 and DMA10 petroleum-based fuels were used, as well as their mixtures with FAME bio-based fuel. It was found that when using mixtures containing 10–30 % of biological FAME fuel, nitrogen oxide emissions are reduced by 11.20–27.10 %, under the same conditions, carbon dioxide emissions are reduced by 5.31–19.47 %. **Conclusions.** It was found that the use of

fuel mixtures containing biological fuel in marine diesel engines is one of the ways to increase the level of environmental sustainability of seagoing vessels and promote ecological shipping.

Key words: *environmental indicators, emission of harmful components, maritime transport, fuel mixture, biological fuel, fuel efficiency, petroleum fuel, marine diesel.*

Вступ. Основним негативним фактором, що супроводжує використання в суднових дизелях палива нафтового походження, є його шкідливий вплив на довкілля. Насамперед це пов'язано з емісією оксидів та діоксиду вуглецю CO та CO₂, оксидів сірки SO_x, а також оксидів азоту NO_x. У зв'язку з цим саме ці екологічні показники роботи суднових дизелів регламентуються та контролюються міжнародними організаціями та класифікаційними товариствами [1–3].

Викиди оксидів азоту NO_x, а також вміст сірки S у судновому паливі (яка є джерелом утворення оксидів сірки SO_x) регламентуються вимогами Annex VI MARPOL [4; 5].

Викиди оксиду вуглецю CO та діоксиду вуглецю CO₂ нині не регламентуються вимогами міжнародних морських конвенцій. При цьому величина CO₂ є визначальною у розрахунку коефіцієнтів Energy Efficiency Design Index (EEDI) та Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI). За вимогами Marine Environment Protection Committee of International Maritime Organization (IMO) величини EEDI і EEXI для існуючих суден та суден, що будуються, повинні мати мінімально можливі значення [6–8].

Постановка проблеми. Одним зі способів забезпечення екологічного судноплавства, зниження негативного впливу на довкілля, скорочення викидів, а також підвищення енергоефективності є використання альтернативних видів палива, зокрема палива біологічного походження – біодизельного палива. Біодизельне паливо застосовуються як у стаціонарній, так і в судновій енергетиці. При цьому немає системного підходу до його використання. Водночас рекомендації щодо використання палива біологічного походження не вказують на його оптимальні концентрації в суміші з паливом нафтового походження, а також не визначають найбільш ефективні режими роботи суднових дизелів під час їх експлуатації на подібних сумішах [9–11]. Це є стимулом для проведення досліджень щодо визначення впливу біодизельного палива на екологічність судноплавства та енергоефективність морських суден, а також вибору оптимальних режимів експлуатації суднових дизелів під час використання сумішей, до яких входить біодизельне паливо [12–14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання використання палива біологічного походження розглядаються з точки зору зменшення негативного впливу випускних газів суднових дизелів на довкілля. При цьому різноманіття типів суднових дизелів, їх експлуатаційних режимів, а також сортів палива нафтового та біологічного походження призводить до отримання широкого спектру результатів [15–17].

Як окреме джерело енергії біодизельне паливо не використовується. Перш за все це пов'язане з його більш високою (порівняно з дизельним паливом) густиною та в'язкістю. Це негативно впливає на параметри процесу паливоподачі,

впорскування та розпилювання палива, що погіршує якість перебігу цих процесів. Зниження в'язкості біодизельного палива шляхом його додаткового нагріву призводить до підвищеного утворення парафіну та подальшого коксування паливної апаратури високого тиску [18–20]. Ще однією причиною, яка обмежує використання біодизельного палива як окремого джерела енергії, є його нижча порівняно з нафтовими паливами теплотворна здатність [21–23]. Як правило, ця величина не перевищує 37500–38000 кДж/кг, що менше майже на 10 % за теплотворну здатність важкого палива класу RM та майже на 15 % за теплотворну здатність дизельного палива класу DM. У зв'язку з цим біодизельне паливо змішується в різних пропорціях з моторним (дизельним / легким або важким) паливом [24–26]. Собівартість виробництва біодизельного палива в більшості країн світу вища, ніж собівартість палива нафтового походження, а рентабельність біопаливного бізнесу поступається рентабельності переробки нафти. Однак використання біодизельного палива суттєво покращує екологічні характеристики суднових дизелів, зокрема знижує емісію оксидів азоту, оксидів вуглецю та оксидів азоту. Це стає важливою перевагою використання біодизельного палива під час знаходження суден морського та внутрішнього водного транспорту в спеціальних екологічних районах [27–29].

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним, метою дослідження було визначення ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили на спеціалізованому морському судні, призначеному для транспортування 8600 TEU. До складу допоміжної енергетичної установки судна входили чотири однотипні суднові середньооборотні дизелі Wartsila 6L32.

Експлуатація дизелів проводилася на двох видах палива – DMA10 (під час плавання судна в районах SECAs) та RMG500 (під час плавання судна поза районами SECAs). Крім того, була передбачена можливість експлуатації дизелів на паливній суміші, до складу якої як основне входило паливо RMG500 або DMA10, як додаткове – біодизельне паливо FAME. Основні характеристики палив DMA10, RMG500, FAME наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики моторних палив

Характеристика	Марка палива		
	DMA10	RMG500	FAME
Густина при 20°	884	962	926
В'язкість при 40°	9,4	496	314
Вміст сірки, %	0,057	0,48	0,022
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	43280	39070	37720

Принципова схема паливної системи дизелів Wartsila 6L32 показана на рис. 1.

Експлуатація дизелів виконувалась у такій спосіб. Під час перебування судна поза екологічними районами експлуатація дизелів здійснювалась на паливі RMG500, яке знаходилося у витратному танку 1. Стан палива RMG500

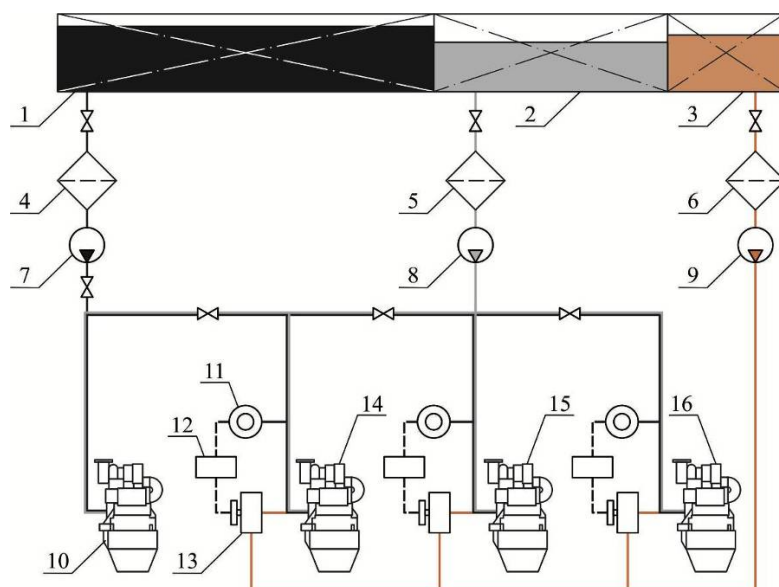


Рис. 1. Принципова паливна схема суднових дизелів Wartsila 6L32:
1 – паливо RMG500; 2 – паливо DMA10; 3 – паливо FAME; 4, 5, 6 – паливні
фільтри для палив RMG500, DMA10, FAME відповідно; 7, 8, 9 – паливні насоси
для палив RMG500, DMA10, FAME відповідно; 10, 14, 15, 16 – дизелі;
11 – витратомір; 12 – мікроконтролер; 13 – дозатор

(насамперед його густина, в'язкість та температура) дозволяв його подачу до паливної апаратури дизелів 10, 14, 15, 16. Це забезпечувалось паливним насосом 7 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 4. Кількість одночасно працюючих дизелів визначалась залежно від загального навантаження на судову електростанцію, при цьому у будь-якому разі не перевищувала трьох.

Під час перебування судна в особливих екологічних районах експлуатація дизелів здійснювалась на паливі DMA10, яке знаходилося у витратному танку 2. Вміст сірки в паливі не перевищував 0,1 %, що забезпечувало вимоги Annex VI MARPOL. подача палива DMA10 до дизелів здійснювалась паливним насосом 8 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 5.

Крім вказаних варіантів, експлуатацію дизелів також можливо було виконувати з використанням паливної суміші, до складу якої входило біодизельне паливо FAME. подача палива FAME до дизелів здійснювалась паливним насосом 9 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 6. Вміст палива FAME в складі суміші змінювався в діапазоні 10–30 % за масою. Паливна суміш, що складалась з палива RMG500 або DMA10 та біодизельного палива FAME, утворювалась шляхом дозування палива FAME в загальний потік палива RMG500 або DMA10. Дозування біодизельного палива FAME забезпечувалось дозатором 13, якій встановлювався на магістралі його подачі до кожного з дизелів. Кількість біодизельного палива FAME в суміші залежала від витрати палива RMG500 або DMA10, що контролювалась витратоміром 11. Управління роботою дозатора 13

біодизельного палива FAME забезпечувалось мікроконтролером 12. Використання суміші палива RMG500 або DMA10 та біодизельного палива FAME було можливе для дизелів 14, 15, 16. При цьому:

- у дизелі 14 використовувалась паливна суміш, яка складалася з 90 % палива нафтового походження (RMG500 або DMA10) та 10 % біодизельного палива FAME;
- у дизелі 15 – паливна суміш із 80 % RMG500 або DMA10 та 20 % FAME;
- у дизелі 16 – паливна суміш із 70 % RMG500 або DMA10 та 30 % FAME.

Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання біодизельного палива FAME. Дизель 10 експлуатувався виключно на паливі RMG500 або DMA10, без використання паливної суміші, до складу якої входило біодизельне паливо FAME.

Основні параметри роботи паливної системи (тиск, витрата, температура, в'язкість палива) контролювалися та підтримувалися автоматично. Також автоматично підтримувалася частота обертання та навантаження допоміжних двигунів Wartsila 6L32. Крім того, автоматично підтримувався розподіл навантаження між кількома допоміжними двигунами (двома або трьома) у разі їхньої паралельної роботи. Дизелі були обладнані системою діагностики ProPower, яка забезпечувала контроль основних показників робочого процесу – тиску згоряння p_z , ефективної потужності N_e , питомої ефективної витрати палива b_e , температури випускних газів t_g . Система ProPower також здійснювала контроль та аналіз випускних газів дизелів, у тому числі визначення концентрації оксидів азоту NO_x . Система ProPower належить до сучасних систем діагностики робочого процесу суднових дизелів та використовується на великій кількості морських суден [30; 31].

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

Альтернативні палива (в тому числі палива біологічного походження, до яких належить FAME) порівняно з паливами нафтового походження відрізняються іншим структурним складом, іншою теплотворною здатністю та іншим стехіометричним відношенням. Це призводить до певних відмін під час перебігу процесів його згоряння та розширення. У сукупності це є причиною зміни економічних, екологічних, а також температурних показників роботи суднових дизелів під час використання палива біологічного походження або паливних сумішей, до складу яких воно входить. Як такі показники під час досліджень приймалися:

- концентрація оксидів азоту у випускних газах – NO_x , г/(кВт·год);
- концентрація діоксиду азоту у випускних газах CO_2 , %;
- питома витрата палива, b_e , г/(кВт·год);
- середня температура газів на виході з циліндрів, t_g , °C.

Експериментальні дослідження виконувались виключно на сталих режимах роботи судових дизелів. При цьому шляхом перерозподілу споживачів енергії (кількості рефрижераторних контейнерів та судового допоміжного обладнання) підтримувалося однакове навантаження на дизелях, що були задіяні в експериментах. Тривалість випробувань на кожному з експериментальних режимів становила не менше двох годин. Під час проведення досліджень дизелі використовували однакові сорти палива (або RMG500, або DMA10 та їх суміші з паливом біологічного походження FAME). Мащення дизелів виконувались на одному і тому ж сорті циркуляційного мастила [32; 33]. У системах мащення та охолодження дизелів підтримувались однакові значення температури та тиску. Це забезпечувало коректність проведення експерименту та достовірність отриманих результатів. Під час досліджень також контролювались та підтримувались у необхідному діапазоні основні показники робочого циклу дизеля (тиск наприкінці стиснення, максимальний тиск згоряння, середній індикаторний тиск) та їх відхилення від середнього значення за всіх циліндрів [34; 35].

Результати досліджень подані у вигляді рис. 2–5.

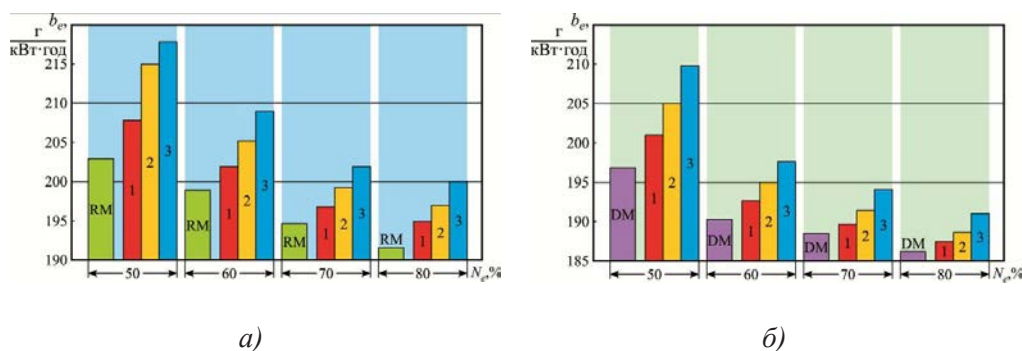


Рис. 2. Питома витрата палива під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміші палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

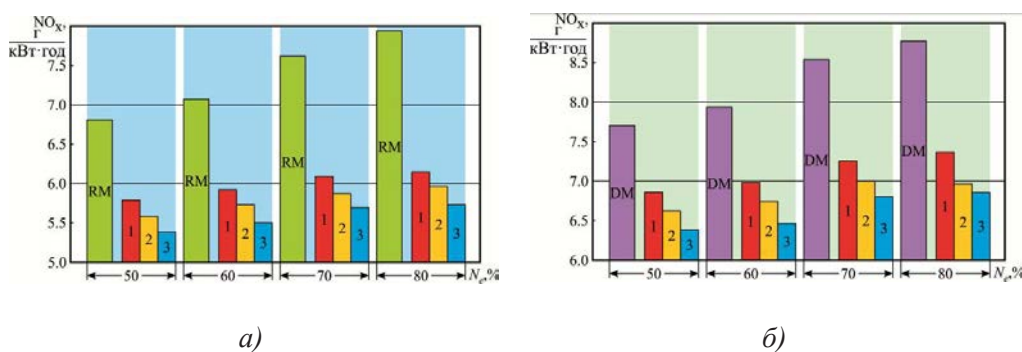


Рис. 3. Емісія оксидів азоту під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміші палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

Технологія проведення досліджень була погоджена з технічним відділом судноплавної компанії, що забезпечує менеджмент судна та його суднової енергетичної установки. Усі випробування виконувались із суворим дотриманням рекомендації з технічної експлуатації дизелів, а також із виконанням вимог Міжнародних конвенцій MARPOL та SOLAS.

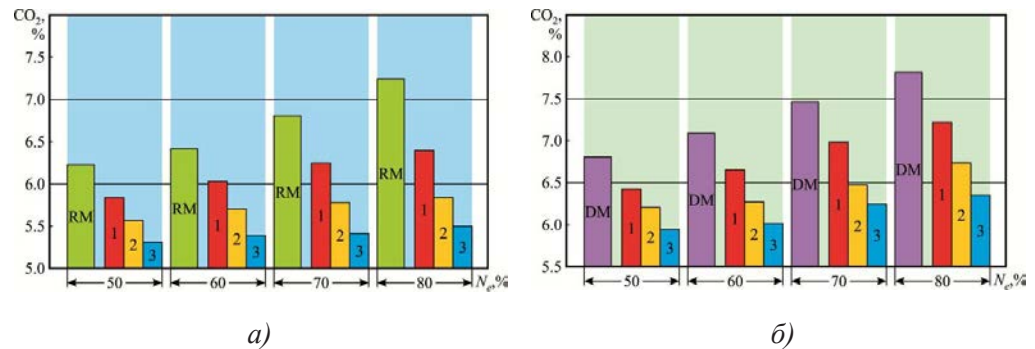


Рис. 4. Емісія діоксиду вуглецю під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміш палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

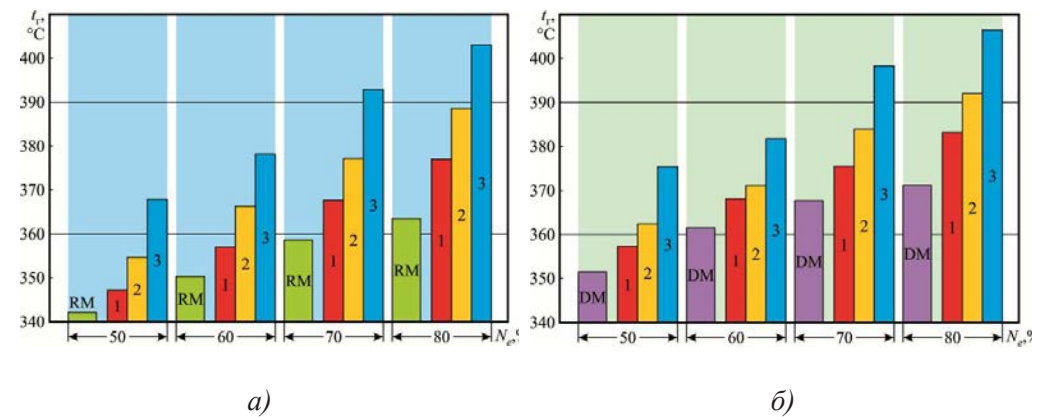


Рис. 5. Середня температура газів на виході з циліндрів під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміш палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

Висновки. Використання під час експлуатації суднових енергетичних установок палив нафтового походження (дизельних або дистилатних) призводить до забруднення довкілля шкідливими домішками, що входять до складу випускних газів, та зумовлює пошук шляхів підвищення екологічності судноплавства. Це, а також тенденція до виснажування природних запасів рідких вуглеводів, які є основною сировиною під час виготовлення палив нафтового походження, сприяють поширенню використання на морських судах палив біологічного походження.

У результаті досліджень, що були виконані на суднових середньообертових дизелях Wartsila 6L32, було встановлено таке.

1. Утворення паливних сумішей, до складу яких входить паливо нафтового та біологічного походження, з різним вмістом в цих сумішах палива біологічного походження сприяє поліпшенню екологічності судноплавства. При цьому під час використання сумішей, до складу яких входить 10–30 % біодизельного палива FAME, емісія оксидів азоту знижується на 11,20–27,10 %, за тих же умов емісія діоксиду вуглецю знижується на 5,31–19,47 %.

2. Паливні суміші, до складу яких входить паливо біологічного походження, порівняно з паливом нафтового походження характеризуються меншою теплотворною здатністю. Це призводить до збільшення на 1,7–7,4 % (залежно від складу паливної суміші та навантаження на дизель) питомої витрати подібних паливних сумішей. Також негативним фактором використання паливних сумішей, до складу яких входить біодизельне паливо, є підвищення температурного навантаження на циліндрову групу та газовипускную систему дизелів. Це відображається в збільшенні температури газів на виході з циліндрів, яке на деяких експлуатаційних режимах (а саме під час використання паливних сумішей з максимально можливим вмістом палива біологічного походження) може досягати 22–36°C.

3. Використання в суднових дизелях альтернативних палив (одним із яких є біодизельне паливо та паливні суміші, до складу яких воно входить) є одним зі способів, що підвищують рівень екологічної стійкості морських суден та сприяють екологічному судноплавству.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin A.S., Zablotyski Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. № 7–8. P. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
2. 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>.
3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. С. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
4. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. праць*. 2020. № 2(62). С. 106 –119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
5. 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*. 2021. № 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
6. Сагін С.В., Суворов П.С., Бондар С.А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 122 - 130. doi: 10.31653/smf47.2023.122-130.

7. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.
8. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
9. Zablotskyi, Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”, Beijing, PRC. August 31, 2019. Part 1. P. 131–138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
10. Goolak S., Riabov I., Petrychenko O., Kyrychenko M., Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel. Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17(2). doi:10.1177/16878132251320236.
11. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. Technology Audit and Production Reserves. 2022. № 2(1(64)). С. 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
12. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. J. Mar. Sci. Eng. 2025. Vol. 13(3). 589 p. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.
13. Neumann S., Varbanets R., Minchev D., Malchevsky V., Zalozh V. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. Ships and Offshore Structures. 2022. № 18(11). P. 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота судового дизеля на біодизельному паливі. Автоматизація судових технічних засобів : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
15. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. Journal of Marine Science and Engineering. 2024. № 12. 1440 p. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
16. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 157–171.
17. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 40. С. 49–54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

18. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 38. С. 132 –142.
19. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. Автоматизація суднових технічних засобів : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 108–119.
20. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. Polish maritime research. 2022. № 29(4). P. 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
21. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях. Матеріали VI міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025». URL: <https://2025.depas.od.ua>.
22. Petrychenko O. Migration and evolutionary analysis of trends in the transformation of maritime education in wartime conditions. Transport Systems and Technologies. 2024. № 44. P. 66–79. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-44-5.
23. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. Одеса : НУ«ОМА». С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
24. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.
25. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів. Водний транспорт : збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 166–179. DOI: 10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
26. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. Одеса : НУ «ОМА». С. 100–113. DOI: 10.31653/smf48.2024.100-113.
27. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. Transport Systems and Technologies. 2024. Vol. 43. P. 21–36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2
28. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

29. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 132–141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.
30. Varbanets R., Fomin O., Píštěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. № 3. P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
31. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. Одеса : НУ «ОМА». С. 17–30. DOI: 10.31653/smf45.2022.17-30.
32. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišteck V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings. *Lubricants*. 2025. Vol. 13(4). 146 p. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
33. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення впливу антифрикційних покриттів на технічний стан підшипників ковзання дизелів морських суден. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 49. Одеса : НУ «ОМА». С. 110–123. DOI: 10.31653/smf49.2024.110-123.
34. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Дослідження впливу органічних нанопокриттів на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів суднових дизелів. *Водний транспорт : збірник наукових праць*. 2025. Вип. 2(43). С. 177–195. DOI: 10.33298/2226-8553.2025.2.43.15.
35. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів. *Водний транспорт : збірник наукових праць*. 2024. Вип. 1(39). С. 206–215. DOI: 10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

REFERENCES

1. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. (2021). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 7–8. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
2. Sagin, S., Sagin, A. (2023). 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*, 5 (1(73)), 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
3. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. (2022). Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Ship power plants*, 45, 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
4. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi ekonomichnosti sudnovih

- dizelnih ustanovok. Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitety, 2, 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
5. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. (2021). Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 7-8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
 6. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vinekneniya avariinih podii pid chas eksplyatacii dizeliv morskikh suden. Sudnovi energetichni ustanovki, 47, 122–130. doi: 10.31653/smf47.2023.122-130.
 7. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. Zabezpechenya ekologichnykh pokaznikov dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. (2020). Sudnovi energetichni ustanovki, 41, 5–9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.
 8. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mechanichnykh vtrat u sudnovich dizelyach. Sudnovi energetichni ustanovki, 41, 20–25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
 9. Zablotskyi, Yu.V. (2019). The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”, Beijing, PRC. August 31, 2019. Part 1. P. 131–138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
 10. Goolak, S., Riabov, I., Petrychenko, O., Kyrychenko, M., Pohosov, O. (2025). The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel. Advances in Mechanical Engineering, 17(2). doi:10.1177/16878132251320236
 11. Madey, V. (2022). Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. Technology Audit and Production Reserves, 2(1(64)), 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
 12. Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A., Volkov, O. (2025). Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. J. Mar. Sci. Eng, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.
 13. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., Zalozh, V. (2022). Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. Ships and Offshore Structures, 18(11), 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
 14. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. Avtomatizaciya sudnovih tehnicnykh zasobiv, 27, 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
 15. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. Journal of Marine Science and Engineering, 12, 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

16. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chinshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetuchnoi efektyvnosti vicoristanya scrubernogo ochishenya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 157–171.
17. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 49–54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.
18. Sagin, S.V. (2018). Znizhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovich dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 38, 132–142.
19. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z riznimi structurnimi harakteristikami. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
20. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*, 29(4), 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
21. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2025). Otsinka efektyvnosti vykorystannia palyva biolohichnoho pokhodzhennia v sudnovykh dyzeliakh. *Materialy VI mizhnarodnoi mors'koi naukovo-praktychnoi konferentsii kafedry SEU i TE ONMU «Marine Power Plants & Operation MPP&O–2025»*. URL: <https://2025.depas.od.ua>.
22. Petrychenko, O. (2024). Migration and evolutionary analysis of trends in the transformation of maritime education in wartime conditions. *Transport Systems and Technologies*, 44, 66–79. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-44-5.
23. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Kontrol ta diahnostuvannia nadiinosti ta ekonomichnosti dyzeliv morskyykh ta richkovyykh zasobiv transportu. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 46, 118–131. <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131>.
24. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vyznachennia dynamichnykh navantazhen' pid chas zminy rezhymiv mashchennia pretsyzijnykh par palyvnoi aparatury sudnovykh dyzeliv. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 44, 121–131. <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131>.
25. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2025). Pidvyshchennia ekonomichnosti roboty sudnovykh serednoobertovykh dyzeliv. *Vodnyi transport*, 1(42), 166–179. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20>.
26. Sagin, S.V., Kuropiatnyk, O.A. (2024). Vyznachennia optymalnykh rezhymiv ekspluatatsii sudnovykh dvhyuniv vnutrishnoho zghoriannia pid chas vykorystannia biodyzelnoho palyva. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 48, 100–113. <https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113>.
27. Petrychenko, O., Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport.

- Transport Systems and Technologies, 43, 21–36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2
28. Petrychenko, O., Levynskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. Sustainability, 17, 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
29. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. (2022). Sudnovi energetichni ustanovki, 44, 132–141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.
30. Varbanets, R., Fomin, O., Pištěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalogh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. Journal of Marine Science and Engineering, 9(3), P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
31. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. (2022). Reheneratsiia zmashchuvalnykh vlastyvostei motornykh palyv i mastyl pid chas ekspluatatsii sudnovykh dyzeliv. Sudnovi enerhetychni ustanovky, 45, 17–30. <https://doi.org/10.31653/smf45.2022.17-30>.
32. Sagin, S., Sagin, A., Zablotskyi, Y., Fomin, O., Pišteck, V., Kučera, P. (2025). Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings. Lubricants, 13(4), 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
33. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2024). Vyznachennia vplyvu antyfriksiinykh pokryttiv na tekhnichniy stan pidshypnykiv kovzannia dyzeliv morskyykh suden. Sudnovi enerhetychni ustanovky, 49, 110–123. <https://doi.org/10.31653/smf49.2024.110-123>.
34. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2025). Doslidzhennia vplyvu orhanichnykh nanopokrytt na zabezpechennia protsesiv mashchennia pidshypnykovykh vuzliv sudnovykh dyzeliv. Vodnyi transport, 2(43), 177–195. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.15>.
35. Sagin, A.S., Sagin, S.V. (2024). Eksperymentalne vyznachennia optymalnykh faz podachi palyva v tsylindr sudnovykh dyzeliv. Vodnyi transport, 1(39), 206–215. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21>.