

ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА АНАЛІЗОМ МОТОРНОЇ ОЛИВИ

Р.О. Разінкін

старший викладач кафедри інженерних дисциплін,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5817-7445

Анотація

Вступ. Експлуатаційна надійність та функціонування двигунів внутрішнього згоряння неможливі без суднових систем, однією з яких є система мащення. Ефективність та надійність систем мащення визначаються характеристиками моторної оливи, які змінюються під час експлуатації дизеля. Дисперсний стан та наявність органічних або неорганічних домішок у оливі також характеризують стан його контактних вузлів – циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипника. Контроль та аналіз моторної оливи систем мащення (як циркуляційних, так і циліндрових) є одними з компонентів діагностування технічного стану суднових дизелів.

Мета дослідження – визначення можливості діагностування технічного стану суднових дизелів за аналізом експлуатаційних характеристик моторної оливи.

Результати. Дослідження виконувались на двох чотиритактних суднових дизелях 6R26 Wartsila, мащення циліндрової групи та колінчатого вала яких забезпечувалось загальною циркуляційною системою, в якій використовувалась моторна олива Castrol 15W20.

Під час експлуатації суднових дизелів поступово погіршуються характеристики моторної оливи, що використовується у системі циркуляційного мащення. Підтвердженням цього є зменшення загального лужного числа оливи (Total Base Number – TBN). Протягом експерименту загальне лужне число судової моторної оливи Castrol 15W20 з початковим значенням $TBN = 14,0$ мгКОН/г за 1000 годин експлуатації знизилось до $TBN = 10,3...11,2$ мгКОН/г. При цьому під час відбору проб (які виконувались кожні 200 годин експлуатації дизеля) спостерігались його як поступові, так і стрибкоподібні зміни.

Більш інформаційним параметром діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів є швидкість зміни загального лужного числа V_{TBN} за певний проміжок часу.

Найбільш інформативним способом діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів є спектральний аналіз моторної оливи, який дозволяє визначити вміст у оливі елементів, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля – Wear Elements та елементів, що характеризують забруднення оливи – Contaminant Elements. Обмеженням цього методу є необхідність його проведення виключно у берегових дослідницьких лабораторіях, що збільшує інтервал інформативності та пропорційно цьому підвищує час прийняття рішень щодо зміни умов експлуатації дизеля.

Висновки. Через збіг динаміки зміни *Wear Elements / Contaminant Elements* та швидкості зміни загального лужного числа V_{TBN} саме швидкість зміни загального лужного рекомендується як параметр, за яким доцільно виконувати експрес-діагностику технічного стану трибосполучень дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Ключові слова: діагностування технічного стану, загальне лужне число, морський транспорт, моторна олива, судновий дизель, трибосполучення суднових дизелів, циркуляційна система мащення.

DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF MARINE DIESEL ENGINES BY ANALYSIS OF ENGINE OIL

R.O. Razinkin

Senior Lecturer of the Department of Engineering Disciplines,
Danube Institute of National University Odesa Maritime Academy, Izmail, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5817-7445

Summary

Introduction. Operational reliability and functioning of internal combustion engines is impossible without ship systems, one of which is the lubrication system. The effectiveness and reliability of lubrication systems is determined by the characteristics of engine oil, which change during the operation of the diesel engine. The dispersed state and the presence of organic or inorganic impurities in the oil also characterize the condition of its contact nodes – cylinder liners, piston rings, bearing inserts. Control and analysis of engine oil of lubrication systems (both circulating and cylinder) is one of the components of diagnosing the technical condition of ship diesel engines.

The purpose of the study – determining the possibility of diagnosing the technical condition of marine diesel engines by analyzing the operational characteristics of motor oil.

Results. The research was carried out on two four-stroke marine diesel engines 6R26 Wartsila, the lubrication of the cylinder group and crankshaft of which was provided by a general circulation system in which Castrol 15W20 engine oil was used.

During the operation of marine diesel engines, the characteristics of the engine oil used in the circulation lubrication system gradually deteriorate. This is confirmed by the decrease in the total base number TBN. The total base number of the Castrol 15W20 marine engine oil with an initial value of $TBN = 14.0$ mgKOH/g decreased to $TBN = 10.3–11.2$ mgKOH/g after 1000 hours of operation. At the same time, during sampling (which was carried out every 200 hours of diesel engine operation), both gradual and abrupt changes were observed.

A more informative parameter for diagnosing the technical condition of tribocompounds of marine diesel engines is the rate of change of the total alkaline number V_{TBN} over a certain period of time.

The most informative method for diagnosing the technical condition of tribocompounds of marine diesel engines is spectral analysis of motor oil, which allows determining the content of elements in the oil that characterize the wear of the contact surfaces of the diesel engine – *Wear Elements*, and elements that characterize

the contamination of the oil – Contaminant Elements. The limitation of this method is the need to carry it out exclusively in shore research laboratories, which increases the interval of informativeness and proportionally increases the time for making decisions on changing the operating conditions of the diesel engine.

Conclusions. *Due to the coincidence of the dynamics of change of Wear Elements / Contaminant Elements and the rate of change of the total alkaline number V_{TBN} it is the rate of change of the total alkaline number that is recommended as a parameter by which to perform express diagnostics of the technical condition of diesel engine tribo-combinations of marine and inland waterway transport vessels.*

Key words: *circulating lubrication system, diagnostics of technical condition, marine diesel, marine transport, motor oil, total alkaline number, tribocoupling of marine diesel engines.*

Вступ. Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) є найбільш поширеним типом теплових двигунів, що використовуються на суднах морського транспорту. ДВЗ/дизелі встановлюються на суднах усіх класів та призначення та виконують функції як головних, так і допоміжних двигунів. При цьому їх ефективна потужність перетворюється на механічну енергію та використовується для забезпечення руху судна, а також трансформується в електричну енергію, яка необхідна для забезпечення функціонування судових систем, механізмів та обладнання [1; 2]. Водночас з цим експлуатаційна надійність та функціонування ДВЗ неможливі без судових систем, які забезпечують мащення та охолодження його основних вузлів, подачу палива та повітря, відведення випускних газів, автоматичне регулювання та підтримання швидкісних режимів [3; 4]. Однією із систем, що забезпечує перелічені функції, є система мащення, яка забезпечує подачу оливи до деталей циліндропоршневої групи (циліндрової втулки та поршневих кілець), а також колінчатого валу та поєднаних з ним деталей руху (підшипників, шатуна та крейцкопфу) [5; 6].

Залежно від конструкційних особливостей ДВЗ мащення їх контактних вузлів та поверхонь забезпечується двома – циркуляційною та циліндровою (лубрикаторною), або однією – лише циркуляційною системами мащення. Перша схема (з двома системами мащення) реалізується у судових двотактних дизелях. У цих дизелях циліндрова (лубрикаторна) система забезпечує подачу оливи на дзеркало циліндрової втулки шляхом його впорскування лубрикатором, циркуляційна – за допомогою циркуляційного насоса подає оливу до колінчатого валу та його підшипників ковзання. Мащення чотиритактних дизелів забезпечується однією загальною системою, в якій циркуляційний насос нагнітає оливу до трибосполучень колінчатий вал – вкладиш підшипника, а мащення деталей циліндрової групи здійснюється через розбризкування та аеродинамічний рух оливи [7; 8]. Ефективність та надійність систем мащення визначається характеристиками моторної оливи, які змінюються під час експлуатації дизеля. Дисперсний стан та наявність органічних або неорганічних домішок у оливі також характеризує стан його контактних вузлів – циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипника. Контроль та аналіз моторної оливи систем мащення (як циркуляційних, так і циліндрових) є одним з компонентів діагностування технічного стану судових дизелів [9; 10].

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Забезпечення якісного мащення трибосполучень суднових дизелів є однією з важливих та актуальних проблем, яка вимагає свого розв'язання під час експлуатації дизелів суден морського транспорту [11; 12]. Навіть короткочасна відсутність плівки оливи між поверхнями тертя або її пошкодження чи руйнування призводить до стрибкоподібного зростання контактних взаємодій, що може стати причиною підвищеного зносу, поломки деталей та аварійної зупинки дизеля. Подібні негативні явища можуть виникати під час мащення як колінчатого валу та підшипників ковзання, так і під час мащення циліндрової втулки та поршневих кілець [13; 14]. Через це виникає практичне завдання, яке полягає у забезпеченні якісного процесу мащення контактних вузлів суднових дизелів. При цьому під поняттям «якісне мащення» розуміють таке, за яким забезпечується мінімальний знос контактних поверхонь та найбільш тривалий час підтримання експлуатаційних показників оливи. Визначення цих показників можливе шляхом контролю стану оливи, яка потрапляє до підпоршневого простору дизелю (для циліндрових систем мащення двотактних дизелів) або до картеру дизелю (для циркуляційних систем мащення чотиритактних дизелів) [15; 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забезпечення якісного мащення деталей суднових дизелів розв'язується з моменту їх широкого розповсюдження та використання на судах морського та внутрішнього водного транспорту. Найбільш гострою вона ставала під час впровадження у суднових ДВЗ палива з підвищеним вмістом сірки (до 3,5 % за масою) та збільшення ступеня наддуву (більш за 3,0...3,5) [17; 18]. Саме за цих умов у циліндрових системах мащення суднових двотактних дизелів використовувалась лубрикаторна олива з підвищеним вмістом лужних речовин, а саме гідроксиду калію КОН. Загальне лужне число (Total Base Number – TBN) цих олив досягало 70...100, що відповідало вмісту КОН в оливі на рівні 70...100 мг КОН/г оливи [19; 20]. Поступове зниження вмісту сірки в паливі до 0,5 % та 0,1 % за масою (відповідно до вимог Annex VI MARPOL) сприяло зниженню TBN для моторних олив, що використовуються у системах циліндрового/лубрикаторного мащення суднових дизелів [21–23]. Одночасно з цим у суднових чотиритактних дизелях почали використовуватися палива з підвищеною в'язкістю – такі, що відповідають значенням IFO180 та згодом IFO350. Це призвело до необхідності використання в циркуляційних системах мащення цих дизелів моторних олив класу TBN30 та TBN40 з відповідним вмістом КОН в оливі – 30 КОН/г оливи та 40 мг КОН/г оливи [24; 25]. При цьому у всіх випадках основним критерієм, що характеризує перебіг процесу мащення, визнавалися вміст механічних домішок та зміна TBN оливи протягом часу. Одночасно з цим слід визначити, що перебіг процесу мащення може бути оцінений за інтенсивністю (швидкістю) зміни цих величин. При цьому швидкість зміни вмісту механічних домішок у оливі та зміна TBN оливи протягом часу як показники, за якими можна виконувати діагностування технічного стану суднових дизелів та їх контактних вузлів, не є поширеним методом, тому вимагає уваги та дослідження.

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним метою дослідження є визначення можливості діагностування технічного стану суднових дизелів за аналізом експлуатаційних характеристик моторної оливи, а саме швидкості зміни його загального лужного числа – TBN.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на двох чотиритактних судових дизелях 6R26 Wartsila, мащення циліндрової групи та колінчатого вала яких забезпечувалось загальною циркуляційною системою, в якій використовувалась моторна олива Castrol 15W20. Серед основних функціональних характеристик якої визначимо: кінематичну в'язкість за 100°C – 15,2 сСт, Total Base Number – 14,0 мгКОН/г.

Дослідження складались з двох етапів. Перший виконувався безпосередньо на судні на полягав у визначенні значення TBN моторної оливи після кожних 100 годин експлуатації дизелів. Другий етап полягав у надсиланні проб моторної оливи, що були відібрані за такі самі проміжки часу, як і на першому етапі, до берегової дослідницької лабораторії. Надалі саме у ній виконувався спектральний аналіз моторної оливи з метою визначення вмісту металевих та інших домішок. Усі технологічні процедури, що пов'язані з виконанням першого етапу, а також статистична обробка та аналіз отриманих результатів як першого, так і другого етапу виконувались автором дослідження самостійно.

Спектральний аналіз моторної оливи, що виконується у берегових дослідницьких лабораторіях та є обов'язковою технологічною процедурою під час експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, забезпечує визначення багатьох компонентів, що потрапляють у моторну оливу у результаті згоряння палива та контактної взаємодії трибосполучень дизеля. Недоліком спектрального аналізу є певна затримка в отриманні його результатів, що пов'язана з логістичним ланцюжком судно – дослідницька лабораторія (яким моторна олива відправляється із судна на дослідження), немиттєвим проведенням аналізу (через великий обсяг подібних досліджень) та можливістю порушення зворотного зв'язку між дослідницькою лабораторією та морським судном (що, наприклад, може бути зумовлене особливостями навігаційного переходу). На жаль, це може бути причиною несвоєчасного прийняття рішення з управління режимами мащення судових дизелів та оцінки технічного стану його трибосполучень (насамперед поршневі кільця – втулка циліндра та вкладиш підшипника – колінчатий вал).

Через це як додатковий критерій, за яким можна виконувати діагностику технічного стану судових дизелів, була запропонована швидкість зміни загального лужного числа оливи VTBN, яка визначалась за виразом

$$V_{\text{TBN}} = \frac{\text{TBN}_{n-1} - \text{TBN}_n}{t_n - t_{n-1}} \cdot 100;$$

де: TBN_n , TBN_{n-1} – значення TBN у будь-який та у попередній до нього час вимірювання;

t_n , t_{n-1} – поточний (в який виконується вимірювання) та попередній час визначення TBN. Через невелике значення V_{TBN} з метою кращої візуалізації цієї величини до наведеного виразу додатково введено співмножник 100.

Результати досліджень наведені на рис. 1–3 (додатково визначимо, що їх обробка та аналіз виконувались автором дослідження). При цьому на рис. 1 разом зі значеннями TBN (яке вимірювалось для обох дизелів) наведені значення швидкості його зміни V_{TBN} .

На наш погляд, саме швидкості зміни загального лужного оливи є показником, за яким можна виконувати діагностику стрибкоподібної зміни технічного стану трибосполучень суднового дизеля. Значення загального лужного числа характеризує лише можливість подальшого використання певного об'єму моторної оливи, що знаходиться у системі мащення, та не надає додаткової інформації щодо процесу його окислення чи забруднення сторонніми компонентами. Підтвердженням цього припущення є аналіз відповідності зміни V_{TBN} (яка розраховувалася за результатами аналізу моторної оливи у судновій лабораторії) та спектральний аналіз забруднень, що входять до складу оливи (який виконувався у береговій дослідницькій лабораторії).

На рис. 2, 3 як основні результати спектрального аналізу моторної оливи, що виконувався у береговій дослідницькій лабораторії, наведені значення вмісту в оливі таких речовин: Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb, які характеризують знос контактних поверхонь дизеля та належать до категорії Wear Elements; а також B, Na, Si, V, Mo, Ni, які характеризують забруднення моторної оливи та належать до категорії Contaminant Elements. Зазначимо, що компоненти Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb є складниками, що входять до матеріалів, з яких виготовляються поршневі кільця, втулки, та до антифрикційних багат шарових покриттів вкладишів підшипників. Через це за їх зміною можна діагностувати технічний стан цих поверхонь.

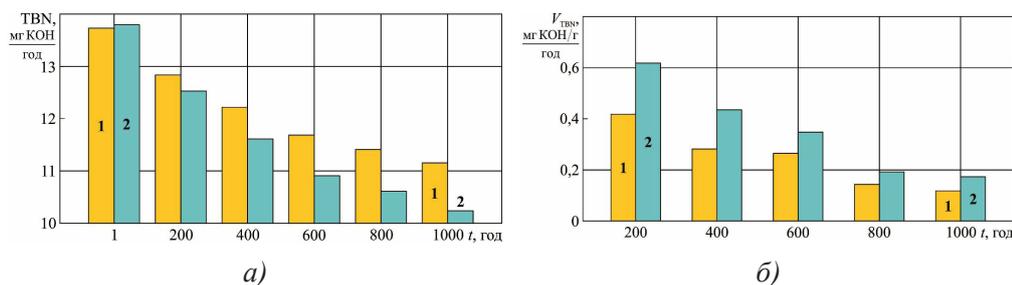


Рис. 1. Зміна характеристик моторної оливи Castrol 15W20 під час експлуатації суднових дизелів 6R26 Wartsila: 1 – дизель № 1; 2 – дизель № 2; а – TBN; б – VTBN

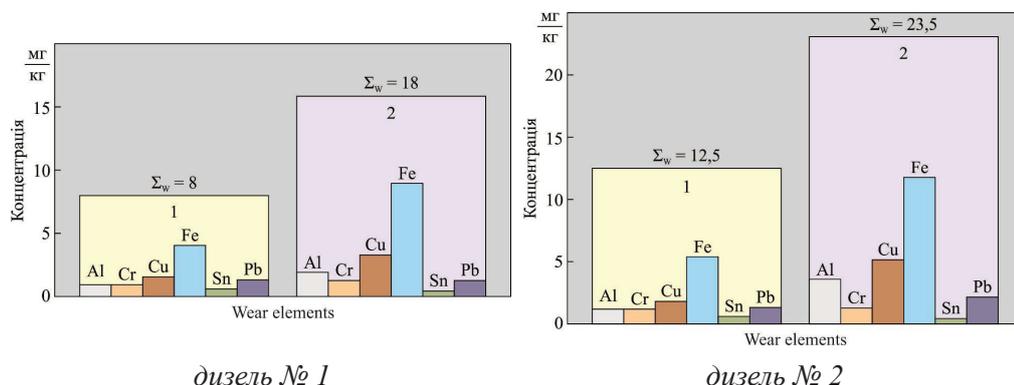
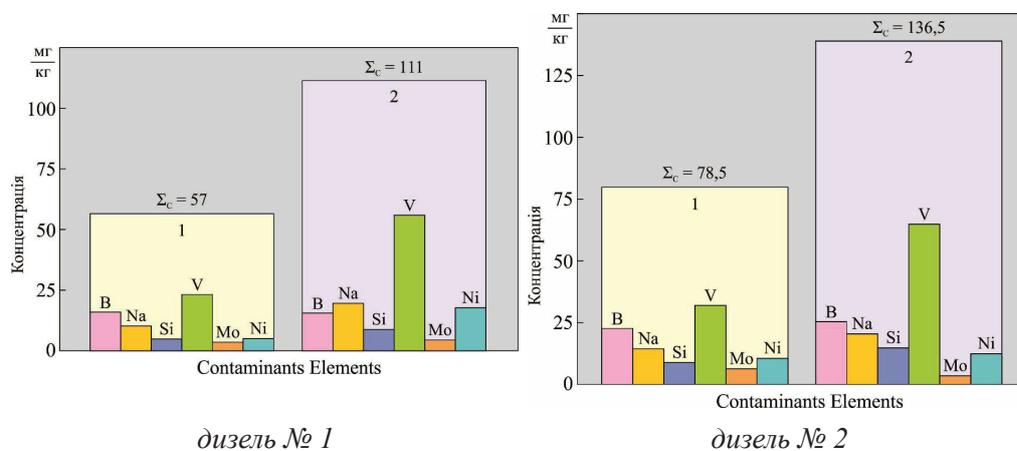


Рис. 2. Вміст механічних домішок у моторній оливі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: 1 – після 500 годин; 2 – після 1000 годин



дизель № 1
дизель № 2
Рис. 3. Вміст забруднюючих домішок у моторній оливі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: 1 – після 500 годин; 2 – після 1000 годин

Зіставлення результатів з визначення швидкості зміни загального лужного числа оливи V_{TBN} та концентрації в оливі компонентів, що характеризують знос основних трибосполучень дизеля та потрапляння в оливу забруднюючих компонентів, дозволяє зробити висновок щодо їх взаємозв'язку та можливості діагностування стану судового дизеля за аналізом моторної оливи.

Інструкції та рекомендації фірм-виробників дизелів регламентують лише гранично допустимий вміст у моторній оливі показників, що характеризують знос його елементів. Саме за цими значеннями оцінюється технічний стан дизеля. Проте через аналіз швидкості зміни загального лужного числа оливи V_{TBN} можна діагностувати виникнення несправностей, пов'язаних зі зміною технічного стану елементів дизеля, наприклад, підвищеного зносу поршневих кілець (що може призвести до їх поломки), видаленню антифрикційного матеріалу з поверхонь вкладишів підшипників (що може призвести до збільшення механічних напружень та зайвих механічних втрат).

Під час дослідження контролювались та підтримувались у рекомендованому фірмою-виробником діапазоні всі основні показники роботи дизелів 6R26 Wartsila та систем, що забезпечують їх функціонування.

Висновки. Експлуатація судових дизелів нерозривно пов'язана зі зміною технічного стану їх основних трибосполучень, до яких належать циліндрові втулки та поршневі кільця, а також колінчатий вал та вкладиші підшипників ковзання. Діагностика технічного стану цих елементів може бути виконана за аналізом моторної оливи, що використовується в їхніх системах циркуляційного мащення. Експериментальні дослідження, що були виконані на судових чотиритактних дизелях 6R26 Wartsila, дозволяють зробити такі висновки.

1. Аналіз зміни одного з основних експлуатаційних показників моторної оливи Castrol 15W20 (яким є загальне лужне число TBN) підтвердив правильність експлуатації системи циркуляційного мащення дизеля. Значення TBN за 1000 годин експлуатації дизеля знизилось від початкової величини 14,0 мгКОН/г до рівня 10,3...11,2 мгКОН/г, що відповідає рекомендаціям, які висуваються

з боку фірми-виробника. При цьому під час відбору проб (які виконувались кожні 200 годин експлуатації дизеля) спостерігались як поступові, також і стрибкоподібні зміни TBN.

2. Як додатковий параметр діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів може бути прийнята швидкість зміни загального лужного числа оливи V_{TBN} за певний проміжок часу. Для різних проміжків часу (200, 400, ... 1000 годин) її зміна становить $(0,41 \dots 0,61) - (0,17 \dots 0,19) \frac{\text{мгКОН/г}}{\text{год}}$.

3. Найбільш інформативним способом діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів є спектральний аналіз моторної оливи, який дозволяє визначити вміст в оливі елементів, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля, – Wear Elements, та елементів, що характеризують забруднення оливи, – Contaminant Elements. Обмеженням цього методу є необхідність його проведення виключно у берегових дослідницьких лабораторіях, що збільшує інтервал інформативності та підвищує час прийняття рішень зі зміни умов експлуатації дизеля.

4. Через збіг динаміки зміни вмісту в оливі компонентів, що характеризують знос його трибосполучень та потрапляння до оливи забруднюючих речовин (Wear Elements / Contaminant Elements), та швидкості зміни загального лужного числа оливи V_{TBN} саме швидкість зміни загального лужного рекомендується як параметр, за яким доцільно виконувати експрес-діагностику технічного стану трибосполучень дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. До таких трибосполучень насамперед належать поршневі кільця та втулка циліндра, а також вкладиш підшипника та колінчатий вал. Збільшення швидкості зміни загального лужного відповідає збільшенню концентрації у оливі компонентів, що характеризують знос саме цих елементів дизеля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Varbanets R., Fomin O., Pištěk 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
2. Petrychenko O., Levynskyi 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.
3. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2 (2 (110)). P. 54–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033>.
4. Zablotskiy Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 43. С. 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021.5-17.
5. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

6. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10 (10). P. 1373. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
7. Сагін С.В., Бондар С.А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації суднових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. С. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
8. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету* : збірник наукових праць. 2020. № 2 (62). С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
9. 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. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
10. Budashko V., Sandler A., Shevchenko V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022. Vol. 16 (1). P. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.16.01.11>.
11. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. № 5 (2 (61)). P. 26–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
12. 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. С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
13. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 2025. V. 17. P. 2141. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. 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.
15. 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>.
16. 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.
17. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

18. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація суднових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
19. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. № 7–8. P. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
20. Sagin A.S., Zablotskyi 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. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 4(1 (84)). P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
22. 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.
23. 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. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
24. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. *Technology Audit and Production Reserves*. 2022. Vol. 5(1 (67)). P. 22–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.
25. 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.

REFERENCES

1. Varbanets, R., Fomin, O., Píšťek, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9 (3). 321. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
2. 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.
3. Budashko, V., Shevchenko, V. (2021). Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load.

- Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2 (2 (110)). P. 54–70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033>.
4. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Ship power plants*. 43. 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021.5-17.
 5. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
 6. Sagin, S., Madey, V., Sagin, A., Stoliaryk, T., Fomin, O., Kučera, P. (2022). Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 10 (10). P. 1373. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
 7. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod popередzhenya avariinih situacii pid chas ekspluatatsii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Ship power plants*. 46. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
 8. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi economichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universytetu*. 2. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
 9. 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. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
 10. Budashko, V., Sandler, A., Shevchenko, V. (2022). Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 16 (1). P. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.16.01.11>.
 11. Sagin, S., Madey, V., Stoliaryk, T. (2021). Analysis of mechanical energy losses in marine diesels. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. № 5 (2 (61)). P. 26–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
 12. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta economichnosti dizeliv morskikh ta richkovih zasobiv transportu. *Ship power plants*. 46. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
 13. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 17. 2141. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
 14. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknenya avariinih podii pid chas eksplyatatsii dizeliv morskikh suden. *Ship power plants*. 47. 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
 15. 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>.
16. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z riznimi structurnimi harakteristikami. *Automation of ship technical facilities*. 27. 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
17. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalenyia procesu ochishenya sudnovih vazhkih paliv. *Ship power plants*. 41. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
18. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnomu palivi. *Automation of ship technical facilities*. 27. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
19. Sagin, S.V., Stoliaryk, T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. № 7–8. P. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
20. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. (2021). Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 7–8. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 4 (1 (84)). P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
22. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnykh pokaznikov dizeliv suden richkovogo ta morskogo transportu. *Ship power plants*. 41. 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
23. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetichnoi efektyvnosti vikoristanya scrubernogo ochishenya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Ship power plants*. 47. 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
24. Stoliaryk, T. (2022). Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. 5(1 (67)). P. 22–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.
25. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vznachennya dunamichnih navantazhen pid chas zmini rezhimiv mashchennya preciziiinich par palivnoi aparaturi sudnovih diziliv. *Ship power plants*. 44. 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.

Дата першого надходження статті до видання: 24.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025