

17. Н.Н. Tomchakovskiy, L.E. Oberto Santana, and P.V. Mushchenko, «Funktsiia nakladennia radar-noho zobrazhennia na ekrani ECDIS» [«Radar image overlay function on the ECDIS screen»], in Proceedings of the II Int. Sci. and Pract. Conf. «Modern education using the latest technologies», Lisbon, Portugal, 2023, pp. 490-497. (Ukr.)

Стаття надійшла 01.05.2024

Стаття прийнята 03.06.2024

УДК 62-723.82

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310707

© Погорлецький Д.С.<sup>1</sup>, Грицук І.В.<sup>2</sup>, Худяков І.В.<sup>3</sup>, Самарін О.Є.<sup>4</sup>

### ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛУБРИКАТОРНОЇ СИСТЕМИ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ

В статті розглядаються питання оптимізації витрати високолузжого циліндрового масла в лубрикаторних системах мащення суднових малооберткових двигунів (МОД) та особливості експлуатації системи циліндрового мащення з огляду на сучасні тенденції розвитку МОД. Проведено огляд систем лубрикаторного мащення циліндрів суднових головних двигунів та розглянуто можливі перспективи вдосконалення систем лубрикаторного мащення циліндрів суднових дизельних двигунів. Приділено увагу причинам виникнення та способам боротьби з цілою гамою проблем, які представляють собою можливість збільшення зносу втулок циліндрів, поршнів, поршневих кілець, це пов'язано з типом та сортом палива і вмістом сірки в ньому. Сірка в паливі нейтралізується з допомогою циліндрових масел з високою лужністю, проблеми виникають під час зміни сорту палива, це вимагає зміни марки циліндрового масла (CLO BN). Запропоновано та розглянуто можливість використання системи змішування циліндрових масел (АСОМ) для нейтралізації сірки в паливі та покращення захисту від низькотемпературної корозії циліндрових втулок МОД. Дана система змішує та дозує циліндрове масло в залежності від навантаження суднового двигуна і типу палива. АСОМ дозволяє дозувати масло на суднових двигунах, які працюють у режимах споживання подвійного виду палива (SDF), де визначається співвідношення між пілотним (запальним) та газовим паливом, система змішує два різних типи циліндрового масла в одне з потрібним лужним числом BN, його можна визначити як здатність масла нейтралізувати кислоти, що утворюються під час використання. Наведено результати оптимальної витрати циліндрового масла, що забезпечує мінімальне зношування циліндрових втулок дизельного двигуна. Описано особливості режимів мащення та контролю технічного стану циліндрової групи суднових малооберткових дизельних двигунів при їх роботі на зниженій частоті обертання.

**Ключові слова:** енергетична установка, лубрикаторна система мащення, циліндрове масло, лужне число, малообертковий двигун.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, [dimon150582@gmail.com](mailto:dimon150582@gmail.com)

<sup>2</sup> д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7065-6820, [gritsuk\\_iv@ukr.net](mailto:gritsuk_iv@ukr.net)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-8900-7879, [khudiakov.ihor@ksma.ks.ua](mailto:khudiakov.ihor@ksma.ks.ua)

<sup>4</sup> канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-2690-7298, [samarin162@gmail.com](mailto:samarin162@gmail.com)

*D.S. Pohorletskiy, I.V. Gritsuk, I.V. Khudiakov, O.E. Samarin. Features of the operation of the lubrication system for lubricating ships' low-speed engines. The article examines the optimization of high-alkaline cylinder oil consumption in lubrication systems of marine low-speed engines (MODs), as well as the peculiarities of operation of the cylinder lubrication system in view of modern trends in the development of low-speed marine engines. An overview of the lubricator lubrication systems of the cylinders of marine main engines was carried out and possible prospects for improving the lubricator lubrication systems of the cylinders of marine diesel engines were considered. Attention is paid to the causes of occurrence and methods of combating a whole range of problems, which represent the possibility of increased wear of cylinder sleeves, pistons, piston rings, this is related to the type and grade of fuel and its sulfur content. Sulfur in the fuel is neutralized with the help of cylinder oils with high alkalinity, problems arise when changing the grade of fuel, this requires changing the brand of cylinder oil (CLO BN). The possibility of using a cylinder oil mixing system (ACOM) to neutralize sulfur in the fuel and improve protection against low-temperature corrosion of MOD cylinder liners is proposed and considered. This system mixes and doses cylinder oil depending on the load of the ship's engine and the type of fuel. ACOM allows the dosing of oil on marine engines operating in dual fuel consumption (SDF) modes, where the ratio between pilot (ignition) and gas fuel is defined, the system mixes two different types of cylinder oil into one with the required BN base number, it can be determined as the oil's ability to neutralize acids produced during use. The results of optimal consumption of cylinder oil, which ensures minimal wear of cylinder liners of a diesel engine, are given. Features of lubrication regimes and control of the technical condition of the cylinder group of marine low-speed diesel engines during their operation at reduced rotation frequency are described.*

**Key words:** power plant, lubricator lubrication system, cylinder oil, alkaline number, low-speed engine.

**Постановка проблеми.** Під час експлуатації суднових малооборотних двигунів (МОД) виникають різні суперечливі положення, до яких відносять застосування важких палив з високим вмістом сірки в них. Вони мають низьку вартість, за рахунок чого їх використання в судновій енергетиці розпочалося з котельних установок та поширилося на судові малооборотні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Використання важких сортів палива на даний час відбувається у крейцкопфних та тронкових судових дизельних двигунах [1-8]. Поглиблення переробки нафти дозволяє вийти на велику кількість синтетичних продуктів, що супроводжується погіршенням якості багатьох видів палив та викликає погіршення надійності і ресурсних показників судових МОД. Також збільшується інтенсивність старіння моторного масла, забруднення внутрішніх поверхонь двигуна вуглецевими відкладеннями і швидкість зношування деталей кривошипно-шатунного механізму та циліндро-поршневої групи (ЦПГ).

Серед розробників нових марок моторних масел лідируючими є міжнародні компанії (Shell, Mobil, Castrol, BP), особлива увага приділяється питанням економії витрати моторних масел в процесі їх використання на судових дизельних МОД і можливості регенерації експлуатаційних властивостей масел. За цієї мети двигунобудівні фірми разом з виробниками мастильних матеріалів досліджують і удосконалюють режими та способи мащення для забезпечення мінімальної подачі масла до зон контакту і розробляють спеціальні установки для відновлювання експлуатаційних властивостей масел [2-8]. Основні властивості та функції масел зводяться до підтримання надійної роботи вузлів тертя, зменшення та запобігання зносу у всіх його формах, видалення та відведення з зони тертя забруднюючих матеріалів, часткового охолодження за рахунок відведення тепла від поверхонь тертя, підтримання щільності кільцевих ущільнень поршнів, утворюючи плівку між поршневими кільцями і стінками циліндрів, запобігання корозії та утворенню іржі на металевих поверхнях, створюючи бар'єр для захисту внутрішніх компонентів двигуна від вологи і наслідків окислення [1-8]. Необхідність розробки нових сортів циліндрових масел, виникла на початку 60-х років і була пов'язана з появою судових енергетичних установок, обладнаних малооборотними дизельними двигунами з можливістю їх роботи на важких сортах судових палив збільшеної в'язкості.

У зв'язку з погіршенням умов роботи мастил на судових МОД та з необхідністю надання

відповідних хімічних та фізичних властивостей, нафтовими компаніями було розроблено та створено сорти спеціальних циліндрових масел, до складу яких вводили спеціальні з'єднання лугу. Вміст в мг гідроксиду калію КОН на 1 грам масла досягав 100 мг КОН/г. Циліндрові масла другого покоління (Mobilgard 570, Castrol S, Shell «Alexia 50») з рівнем лужності 60...70 мг КОН/г, використовувались у форсованих суднових МОД в різних умовах експлуатації та сортах палива з в'язкістю 120...320 сСт, і місткістю сірки 3...4%. Експлуатація суднових дизельних двигунів на таких сортах палива і масла відбувалася до нинішнього століття, далі флот поповнився суднами з енергетичними установками, обладнаними моделями довгоходових двотактних дизельних двигунів, та посилилися вимоги до дотримання екологічних параметрів роботи суднових енергетичних установок (СЕУ). Економічність двигунів досягалась за рахунок підвищення максимального тиску згоряння, ці зміни стосуються до формування товщини масляної плівки на поверхнях деталей ЦПГ. Збільшення максимальної температури та тиску у верхній частині циліндрової втулки вимагає покращення вимог до якості масла, запобігання утворенню вуглецевих відкладень та зносу [5-8]. Матеріали, які будуть приведені та розглянуті в даній статті, відносяться до класу малооборотних суднових двигунів, додатково обладнаних морськими судновими скруберами (marine scrubber), призначення якого полягає в ефективній нейтралізації вихлопних газів від дизельного палива або мазуту. Судна, які обладнані даними типами двигунів та системами нейтралізації відпрацьованих газів, на даний час використовуються у морських перевезеннях та займають своє місце серед багатьох інших типів суднових енергетичних установок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Традиційний спосіб подачі циліндрового масла на дзеркало циліндрової втулки це спеціальні пристрої, які отримали назву механічні лубрикатори. Двигунобудівні компанії використовували системи різних виробників: MAN B&W – Hans Jensen, Sulzer – Bosh, конструкції даних систем суттєво не відрізняються [1-8]. Лубрикаторні системи фірми Hans Jensen використовувались на двигунах фірми MAN B&W аж до 2000 р. Тиск масла в лубрикаторах фірми Hans Jensen створюється за допомогою плунжерів, а на поверхню циліндрової втулки масло подається за допомогою штуцерів (незворотних клапанів) на канавки особливої форми. Витрата циліндрового масла в лубрикаторах Hans Jensen становить 0,7...1,2 г/(кВт·год). Лубрикатори Bosh застосовували переважно на двигунах Sulzer, витрата циліндрового масла в лубрикаторах Bosh становить 0,72...1,1 г/(кВт·год) для двигунів RD та 0,67...0,94 г/(кВт·год) – двигуни RND. Суднове двигунобудування за останні 20 років внесло свої корективи в організацію проходження процесів лубрикаторного мащення циліндрової втулки [2-8]. Першою з відомих компаній, яка змінила свій підхід до розгляду даного питання, стала Hans Jensen, у розробці систем лубрикаторного мащення циліндрів було змінено спосіб подачі масла на стінки циліндрової втулки. Традиційні штуцери змінили на спеціальні пристрої, а саме Swirl Injection Principle (SIP). У системі циліндрового мащення SIP застосовують форсунки, які розпилюють циліндрове масло по всій циліндровій втулці у верхній її частині [1-8]. Покращення ефекту розпилювання і рівномірного розподілу циліндрового масла по всій поверхні циліндрової втулки дозволило під час кожного циклу розпилю покращити стан третєвих поверхонь, подаючи зменшену кількість циліндрового масла, в порівнянні зі звичайною системою циліндрового мащення. Багато суднових МОД було обладнано або модернізовано шляхом встановлення системи циліндрового мащення SIP.

У цей проміжок часу провідні корпорації з виготовлення та розроблення лубрикаторних систем мащення працювали над створенням власних систем мащення ЦПГ суднових крейцкопфних малооборотних дизельних двигунів. Найпершою з них у цьому питанні досягла успіху в розробці та використанні даних систем компанія MAN Diesel, яка провела випробування та застосувала на своїх базових марках суднових МОД двигунів систему циліндрового мащення «Альфа-лубрикатор».

Компанія MAN Diesel, з 2000 років використовує альфалубрикатори на всіх моделях МОД серії MC. Застосування альфалубрикаторів і безпосереднього упорскування масла на поверхню циліндрової втулки дозволило знизити витрату циліндрового масла, а також вміст шкідливих викидів у відпрацьованих газах в атмосферу, у порівнянні з використанням механічних лубрикаторів. Слідуючи тим же напрямком, що і компанія MAN Diesel, світовій спільноті суднобудівних компаній було презентовано свою розробку і компанією WARTSILA NSD, нею було розроблено та впроваджено на МОД серії RTA свою оригінальну систему циліндрового мащення циліндрів «Petrofit Pulse Lubricating System» (PPLS) – (PLS). Принцип її роботи полягає у впорскуванні

заданого об'єму циліндрового масла у певний момент часу під тиском до пакету поршневих кілець та спідницю самого поршня, а звідти масло рівномірно розподіляється по всій поверхні циліндрової втулки [1-5]. Однак такий бурхливий розвиток лубрикаторних систем мащення циліндрів крейцкопфних малооборотних дизелів одночасно поставив серйозні питання, пов'язані з безпечною, ефективною та економічною експлуатацією деталей ЦПГ. Аналізуючи тенденції розвитку судових дизельних МОД, можливо зробити висновок, що для забезпечення кращої надійності та довговічності сучасних судових дизельних двигунів до лубрикаторних систем циліндрового мащення та самого масла пред'являються значно жорсткіші вимоги ніж ті, які висувалися для попередніх моделей судових МОД. У довгоходових судових малооборотних дизельних двигунів, працюючих на важких сортах палива, зі зменшенням частоти обертання (економ хід) потрібно збільшити час утримання масляної плівки на поверхні циліндрової втулки до її оновлення (слідкуючої подачі), масло повинно витримувати термічні навантаження, підтримуючи та виконуючи свої функції. Найважливішим завданням є забезпечення та підтримання товщини і міцності мастильної плівки під час низьких швидкостей руху поршня (рух судна на економ ході), на умови роботи циліндрового масла також дуже сильно впливає якість використовуваного палива [3-8].

**Метою дослідження** є огляд особливостей експлуатації та обґрунтування способів модернізації системи циліндрового мащення (лубрикаторної системи мащення) МОД для забезпечення нижчої швидкості подачі циліндрового масла в циліндр та таким чином знизити витрату і оптимізувати мащення поршневих кілець та гільз циліндрів; показати результат впливу якісної організації технічної експлуатації системи циліндрового мащення на покращення техніко-економічних показників головного судового двигуна. Також враховуючи не дуже точні рекомендації щодо дозування циліндрового масла, що зумовлено зміною конструкції лубрикаторних систем мащення, а також різними сортами циліндрових масел і вмістом сірки в паливі, стає очевидним, що ступінь невизначеності з вибором питомої ефективної витрати циліндрового масла суттєво зростає, а це збільшує інтерес до використання способів та систем регулювання подачі циліндрового масла в залежності від вмісту сірки в паливі.

**Виклад основного матеріалу.** Робота судових МОД енергетичних установок відбувається на сортах палив, які поділяють на важкі і легкі (дизельні). Дана класифікація основана на питомій вазі, густині палива, дизельних палив при 20°C у межах 840...860 кг/м<sup>3</sup>, важких палив 980 кг/м<sup>3</sup>. До складу палива входить велика кількість різних компонентів, але найбільший негативний вплив на екологічні параметри і технічний стан судових МОД енергетичних установок має сірка [1-8], для нейтралізації впливу якої на деталі ЦПГ судових дизельних двигунів у системах циліндрового мащення використовують масла, які мають вміст лугів до 70...100 мгКОН/г. Суднові дизельні МОД енергетичних установок та системи подачі, підготовки, очищення та обробки палива модифіковані та обладнані спеціальними пристроями для використання важких палив, в'язкість яких становить 750 сСт при 50°C та щільність до 1010 кг/м<sup>3</sup>. Під час роботи у МОД циліндрові масла на поверхні ЦПГ при застосуванні в'язких сортів палив повинні витримувати тривале згоряння палива на лінії розширення, високий температурний вплив на масляну плівку, попадання великої кількості сажі у результаті неповного згоряння палива, можливе потрапляння остатків незгорілого палива на масляну плівку зі збільшенням довжини розпилу палив з великою густиною. Даний процес змішування частинок палива, які знаходяться на поверхні циліндрової втулки, має негативний вплив на змащувальні властивості циліндрового масла, а також сприяє зменшенню термічної і термоокислювальної стабільності, інтенсифікує сірчистий знос деталей ЦПГ, проточної частини газотурбонагнітача та випускного тракту МОД [1-4]. Застосування важких сортів палив у крейцкопфних МОД посилює ряд вимог до фізичних та хімічних властивостей циліндрового масла, це пов'язано з забезпеченням нейтралізуючої здатності відносно сірки, термоокислювальної стабільності і антинагарних властивостей. Доступнішим методом в умовах роботи енергетичної установки морського судна для визначення лужного числа масла і кількості металевих домішок в ньому є відбір проб масла з підпоршневих просторів дизельного двигуна, це виконується з допомогою переносних судових комплексів, лабораторій (Digi TBN Test Kit; Cylinder Scrape-Down Oil Analysis; Signum onboard test kit of ExxonMobil). За допомогою різних систем та методів діагностування, аналізуючи рівень корозійної стійкості втулок циліндрів судових дизельних МОД, визначається залишкове лужне число циліндрового масла (BN), відібране

з підпоршневого простору двигуна, згідно остаточної величини BN можливо оцінити загальний стан ЦПГ [1-8].

Стан корозії циліндрових втулок поділяється на три основні групи:

- 1)  $BN = 17 \dots 45$  – циліндрові втулки експлуатуються у допустимому режимі, їх знос у допустимому значенні;
- 2)  $BN = 10 \dots 16$  – циліндрові втулки піддаються збільшеному корозійному зносу, що сприяє інтенсифікації процесу зношування;
- 3)  $BN$  менше 10 – в циліндрах дизельного малообертового двигуна проходить сірчиста корозія, що збільшує знос ЦПГ.

Під час експлуатації МОД в умовах 1-го режиму ( $BN = 17 \dots 45$ ) циліндрова масляна система не регулюється, питома витрата циліндрового масла є оптимальною в даному режимі роботи. При умовах 2-го режиму ( $BN = 10 \dots 16$ ) недостатня кількість масла, яка подається на поверхню циліндрової втулки, для відновлення BN необхідно провести регулювання подачі масла. Роботу МОД на 3-му режимі ( $BN < 10$ ) відносять до аварійних умов експлуатації, що свідчить про підвищений знос ЦПГ і вважають неприпустимим. У цьому випадку необхідно провести регулювання подачі циліндрового масла та регулювання терморегуляційних клапанів системи охолодження циліндрових втулок, і переведення двигуна на режим роботи зі зменшенням навантаження. Показником кількості поданого циліндрового масла на втулку циліндру є АСС-фактор (adaptive cylinder oil control) та витрата FR (feed rate), АСС фактор приймають згідно експериментальних даних, в залежності від значення PQI (Particle Quantity Index), а саме кількості металевих домішок і BN масла, взятого з підпоршневого простору двигуна. Для суднових малообертових двигунів АСС-фактор становить  $0,2 \dots 0,35$ . Сучасні судові енергетичні установки з МОД обладнані системами автоматичного керування (LUBECES), вони призначені для підтримання постійної мінімальної витрати циліндрового масла  $0,6 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$  на всіх режимах роботи двигуна [1-8]. Для перевірки технічного стану ЦПГ двигуна відбиралися проби масла та виконувався аналіз з підпоршневих просторів малообертового двигуна MAN-B&W типу 5S70ME-C. Під час проведення досліджень, двигун працював на паливі RMK 700, густина якого  $15^\circ\text{C}$ ,  $990 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; в'язкість сСт,  $50^\circ\text{C}$  – 700; температура спалаху (min)  $60^\circ\text{C}$ ; сірки  $2,5 \dots 2,7\%$ . Для мащення циліндрових втулок, у системі лубрикаторного мащення двигуна використовували масло марки Mobilgard 570: густиною  $15^\circ\text{C}$ ,  $820 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; температурою спалаху  $256^\circ\text{C}$ ; в'язкість у сСт, при  $40^\circ\text{C}$  – 229; в'язкість у сСт,  $100^\circ\text{C}$  – 21; лужне число масла (total base number – TBN) становить  $70 \text{ мг КОН}/\text{г}$ . Завданням дослідження було визначення оптимальної витрати циліндрового масла разом з діагностикою технічного стану циліндро-поршневої групи двигуна. Дослідження щодо визначення оптимальної подачі циліндрового масла виконувались тільки на режимах роботи дизеля, що встановилися. Постійність навантаження на дизель визначалося незмінними частотою обертання колінчастого валу дизельного двигуна, а також підтриманням циклової подачі палива. Кожен окремий циліндр двигуна мав свої встановлені значення подачі масла, відхилення величини подачі допускалося не більше 5% від середнього. Постійно виконувався відбір масла з підпоршневого простору циліндрів, для визначення значень BN і PQI за допомогою судової переносної лабораторії, експерименти були виконані протягом десяти циклів та мали інтервал відбору 24 год. Згідно отриманих даних обчислено оптимальне значення АСС-фактора (згідно наявної кількості сірки у важкому паливі), за рахунок цього було визначено рекомендовану витрату масла FR. Було доведено, що витрата циліндрового масла (оптимальна) для малообертового дизельного двигуна, який працює на важкому паливі з високим вмістом сірки, досягається за рахунок визначення оптимального АСС-фактора, дане значення визначається для двигунів різних моделей та марок окремо, має залежність від технічного стану, конструкційних особливостей та налаштувань системи циліндрового мащення двигуна. АСС-фактор є постійним, витрата циліндрового масла (Feed Rate) під час роботи двигуна на різних сортах палив має залежність від наявності сірки в паливі (Min Feed Rate) – це мінімальна розрахункова витрата масла, яке йде на змащування циліндрів. Під час роботи судового дизельного МОД на малих навантаженнях (обертах - 61, 66, 68  $\text{хв}^{-1}$ ) до циліндрів двигуна подається обмежений об'єм циліндрового масла за одне впорскування, на цих режимах роботи значення FR –  $0,462 \dots 0,554 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$ , виконується примусова подача циліндрового масла на 5-му ході поршня, аж до досягнення величини об'єму подачі  $0,6 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$ . Для контролю, у зв'язку з перевірками стану ЦПГ МОД, виконували пробовідбір відпрацьованого масла та здавання проб для проведення аналізу береговою незалежною

лабораторією. Параметри, які враховувалися під час діагностики та перевірки стану циліндрових втулок МОД, це наявність та кількість металевих домішок – Fe, у відпрацьованому маслі, нікелю – Ni, ванадію – V, кремнію – Si, в мг/кг і величини BN і PQI.

У результаті отримані значення підтвердили коректність запропонованої методики та вірність налаштувань системи лубрикаторного мащення циліндрів (подачу масла). Згідно отриманих результатів аналізів відібраного масла, берегова лабораторія надала діаграми, на яких відображено значення характеристик вмісту окремих домішок у відпрацьованому маслі (рис. 1) [1-8]. Отримані результати берегової лабораторії констатували підвищення BN, зменшення PQI та Fe в аналізах масла і підтвердили вірність виконаних регулювань подачі циліндрового масла, зміни значень Ni та Si, і V характеризували погіршення якості використаного палива. Результати досліджень оптимізації витрати циліндрового масла дозволили визначити оптимальний АСС-фактор для конкретного двигуна і прийняти його рівним 0,27 для забезпечення безпечної експлуатації ЦПГ суднового дизельного МОД під час роботи на різних сортах палив з вмістом сірки до 3% та для визначення оптимальної подачі циліндрового масла. За рахунок цього було забезпечено економічно ефективний режим роботи суднового МОД та мінімальне корозійне зношування втулок циліндрів [1-8].

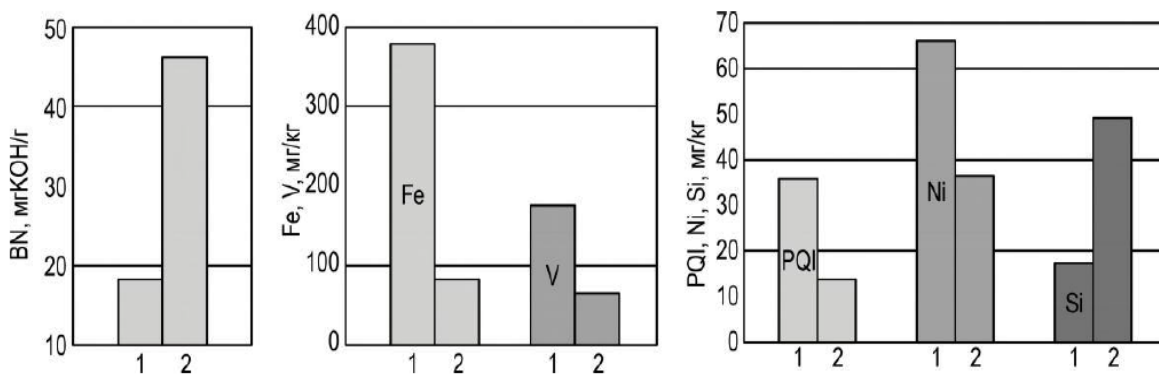


Рис. 1 – Вміст домішок і значення BN (base number) масла у пробах, взятого з суднового дизельного МОД: 1 – після 9500 годин напрацювань; 2 – після 11800 годин: V – Vanadium, Si – Silicon, Ni – Nickel, Fe – Iron, PQI – Particle Quantity Index

Зміна ліміту сірки внесена 1 січня 2020 року, максимальний вміст сірки в суднових важких сортах палив зменшено з 3,5% до 0,5% [1-8]. Пошкодження або збільшений знос гільзи циліндрів МОД є саме джерелом недостатнього чи навпаки надмірного змащування поверхні циліндрової втулки, дозування циліндрового масла бере залежність від саме кількості та наявності сірки в важких сортах палив і навантаження на двигун, що, у свою чергу, рекомендує необхідну кількість лужних присадок у циліндровому маслі. Лужне число масла – це саме показник здатності нейтралізувати сірчану кислоту, яка може виникнути на поверхні гільзи циліндра двигуна за сприятливих умов. За великого значення BN робоча поверхня гільзи циліндрів буде відполірована, це може призвести до порушення тертя і ризику пошкодженнь робочої поверхні гільзи циліндрів та кілець поршня, низьке значення BN призводить до поганої нейтралізації сірки та ризику виникнення низькотемпературної корозії втулки циліндрів [1-8]. Сірчана кислота виникає під час згоряння палива, яке містить сірку, розріджується на робочій поверхні гільзи циліндрів, що пов'язано з можливою наявністю води у повітрі та термодинамічним процесом горіння, це відбувається за температури та тиску, які створюють атмосферу, де температура нижче точки роси SO<sub>3</sub>, як це представлено на рис. 2.



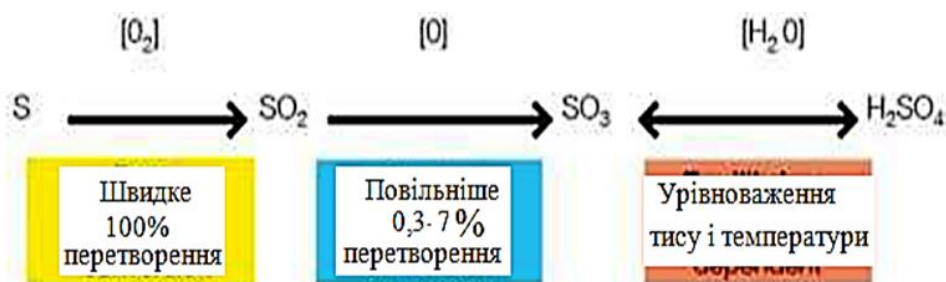


Рис. 2 – Процес перетворення S в H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Під час поганої нейтралізації сірки, кількість заліза в циліндровому маслі може збільшитися. Згідно інформації від компанії MAN Diesel&Turbo, рівень 200 мг/кг повинен відповідати номінальному зносу циліндрової втулки МОД і дорівнювати 0,1 мм/1000 напрацювань РН, згідно чого високі значення свідчать про підвищений знос циліндрової втулки, кілець та поршнів [1-8]. Компанія MAN Diesel&Turbo встановила мінімальну подачу CLO – 0,6 г/(кВт·год), яка досягається за рахунок використання палива з вмістом сірки 1,15%, CLO BN 100, це встановило теоретичну межу застосування BN 100 CLO – 1,15 % S. Під час застосування CLO BN 40 (робота з метаном) лімітовано 0,6 г/(кВт·год), це не дозволяє досягти BN – S, що показано на рис. 3.

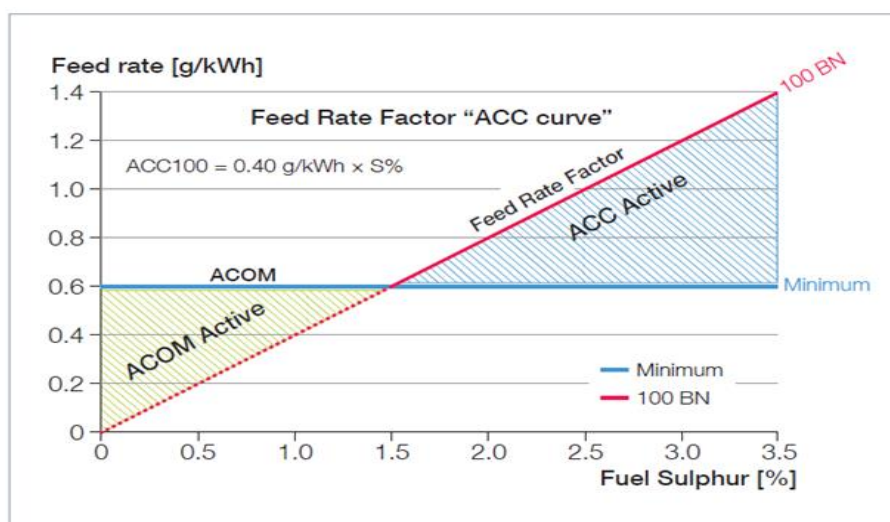


Рис. 3 – Коефіцієнт швидкості подачі циліндрового масла типу BN100

Проведення вимірювань вмісту заліза, а також залишкового числа BN у маслі, дозволяє зробити оцінку стану циліндрової втулки та потребу регулювання швидкості та кількості подачі масла для повернення в зону безпечної роботи. Недостатнє або погане змащування є причиною зносу та пошкодження робочої поверхні гільзи циліндра, поршневих кілець, поршня через підвищену корозію і зменшені мийні властивості циліндрового масла. Судновому дизельному МОД погрожує погане змащення у діапазоні великих навантажень, що пов'язано з активацією РК-дисплея при навантаженнях нижче 25% MCR. Поява занадто багатої кількості масла в циліндрах двигуна призводить до надмірного змащування та з часом до заповнення робочої поверхні циліндрової втулки [1-8]. На роботу системи EGR МОД двигуна, оснащеного газотурбонагнітачем, впливає потреба у видаленні твердих часток лугу і відсутність рівноваги РН в контурі охолоджувача повітря (інтеркулера) [1-8]. Стає очевидним існування потреби у використанні двох марок різних циліндрових масел, які розрізняються базовим числом BN, а місце зміни базується тільки на отриманому досвіді (рис. 4).

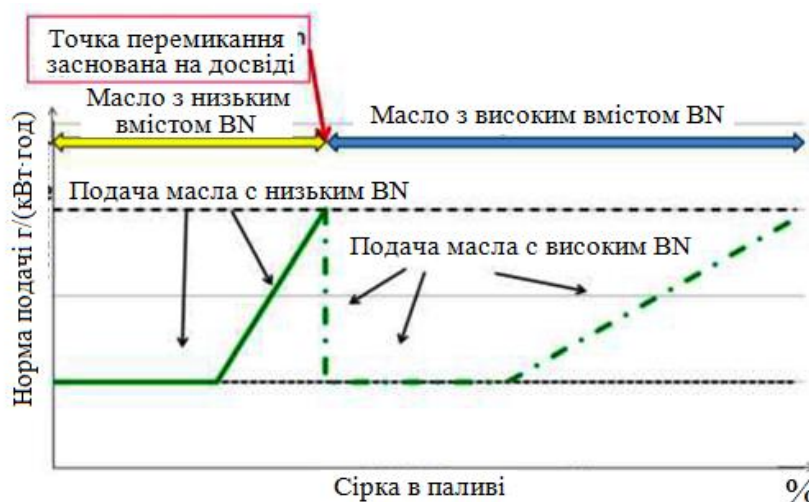


Рис. 4 – Рекомендована зміна подачі різних циліндрових масел за BN

Беручи до уваги розглянуті особливості роботи системи лубрикаторного мащення циліндрів суднового двигуна MAN-B&W типу 5S70ME-C, для покращення його техніко-економічних показників, при роботі на паливі з різним вмістом сірки, пропонуємо можливість застосування системи змішування різних типів циліндрових масел – АСОМ (автоматична система для змішування циліндрових масел різних марок), яка застосовується для покращення нейтралізації сірки в паливі і захисту від низькотемпературної корозії циліндрової втулки, система АСОМ є однією з сучасних рішень, яке на даний час застосовується для суднових МОД, працюючих на різних сортах важких палив та з різним вмістом сірки в них, загальна схема продемонстрована на рис. 5.

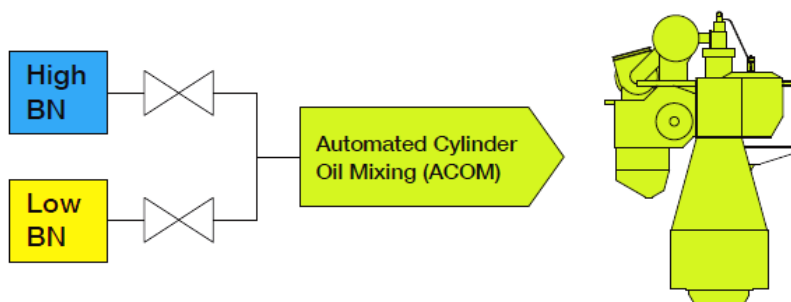


Рис. 5 – Система автоматизованого змішування циліндрового масла

Система АСОМ змішує та виконує дозування різних марок циліндрового масла, в залежності від навантаження на судновий МОД та типу палива, вона також дозує масло на МОД, які працюють у спеціальних режимах роботи подвійних сортах палив – SDF, де визначається загальне співвідношення між пілотним та основним газовим паливом, змішуються два різних сорти масла з різним BN у одне з потрібним BN, циліндрові масла з BN 100 та BN 16 застосовують, як початкові базові масла [1-8]. За рахунок чого створюється гнучке середовище, в якому доступні всі значення BN, система АСОМ управляється з допомогою системи ECS суднового двигуна, за рахунок цього здійснюється постійний моніторинг, налаштування виконуються з допомогою панелі керування MOP чи АСОМ. Сама апаратна частина має досить невелику площу і складається з відносно невеликої кількості деталей. Тому найбільшою проблемою, з якою зіткнеться оператор, буде забезпечити СЛО належну кількість присадок BN, коли двигун працює на паливі з низьким вмістом сірки.

Припустимо, що: Двигун працює в режимі HFO на рідкому паливі, що складається з 1,8% сірки. АСС Коефіцієнт швидкості подачі =  $0,25 \text{ г/(кВт·год)} \times S \%$  (встановлюється під час тесту розгортки). Мінімальна питома швидкість подачі СЛО рівна  $0,6 \text{ г/(кВт·год)}$ , отже:



розрахована мінімальна питома швидкість подачі  $CLO = 0,25 \times 1,8 = 0,45$  г/(кВт·год). Значення 0,45 г/(кВт·год) нижче мінімальної швидкості подачі. Тому ECS запитуватиме 0,6 г/(кВт·год). Тоді сірчана кислота може бути повністю нейтралізована, що збільшує ризик полірування і, таким чином, збільшення зносу [1-8]. На панель керування АСОМ виводяться показники та вносяться нові дані, а саме: високе значення BN – налаштування значення BN для палива з високим вмістом сірки; низьке значення BN – налаштування значення BN для палива з низьким вмістом сірки; коефіцієнт швидкості подачі – значення, отримане під час тесту; середній ефективний тиск двигуна, наведений у відсотках; мінімальна швидкість подачі – мінімальна доза CLO, що надходить до двигуна в діапазоні RPM алгоритму. Мінімальна швидкість подачі палива  $S \% = FRF$ ,  $0,6/1,8 = 0,33$  (оптимальний FRF), FRF для BN 100 = 0,25. Установка 76BN дозволить правильно дозувати при мінімальній швидкості подачі 0,6 г/(кВт·год). Коефіцієнт подачі був встановлений згідно розрахунків і документації двигуна MAN-B&W 5S70ME-C, що працює на HFO з вмістом сірки 2,97%. Тестування проводилося протягом п'яти днів, за умов, як зазначено в сервісному листі MAN SL2014-587: двигун завантажено вище контрольної точки РК; коефіцієнт коригування швидкості подачі = 1,00. Швидкість подачі встановлено на: 1,38 г/(кВт·год) для першого циліндра; 1,24 г/(кВт·год) для другого циліндра; 1,00 г/(кВт·год) для третього циліндра; 0,87 г/(кВт·год) для четвертого і 0,64 г/(кВт·год) для п'ятого. Встановлення системи змішування масла циліндрів (АСОМ) показано на рис. 6.

Система АСОМ змішує доступні на судні марки циліндрових масел до отримання необхідного значення BN, яке вона отримала від системи керування двигуном чи було внесено вручну членами машинної команди з огляду на вміст сірки у використовуваному паливі. У результаті BN циліндрового масла знаходиться в діапазоні значень, яке отримано з двох марок циліндрових масел, за допомогою їх змішування, загальний принцип є у змішуванні циліндрових масел для отримання потрібного BN масла. Змішування циліндрових масел ґрунтується на введенні кількості масла у залежності від наявності сірки у важкому судовому паливі, на якому працює МОД, а система ME-ECS контролює АСОМ, система автоматично вираховує еквівалент сірки Se у паливі та потрібне BN масла для нейтралізації.

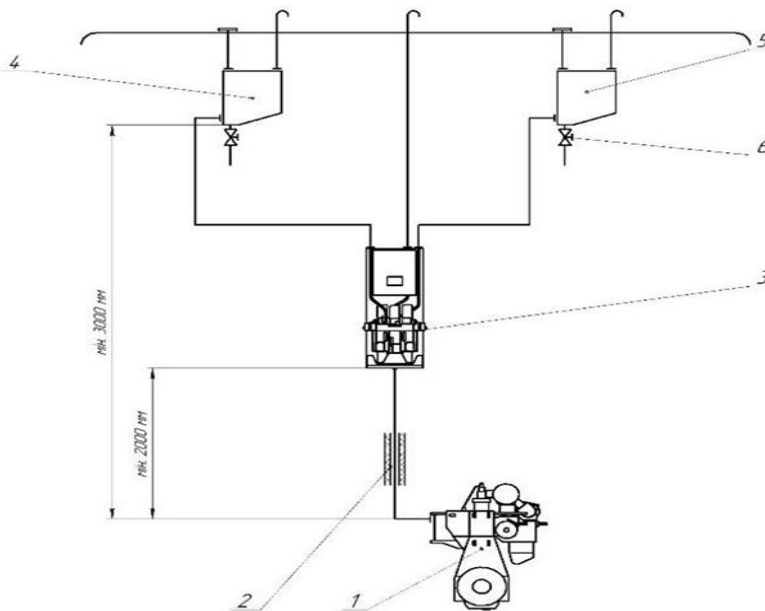


Рис. 6 – Встановлення системи автоматичного змішування АСОМ: 1 – головний двигун; 2 – теплоізолятор; 3 – АСОМ; 4 – витратна цистерна циліндрового масла BN 100; 5 – витратна цистерна циліндрового масла BN 25; 6 – зливний кран

Дана система має змогу працювати з відомими системами керування двигунами серії ME-C/-GI/ LGI і ME-B-GI/-LGI (рис. 7), показники вмісту сірки в судовому важкому паливі вносяться до системи АСОМ членами машинної команди, на двигунах фірми MAN-B&W серії ME-

В типу МС-С система АСОМ працює автономно та керується з панелі АСОМ або MES-ECS у співпраці та обміном даними з блоком керування судновим двигуном [1-8].

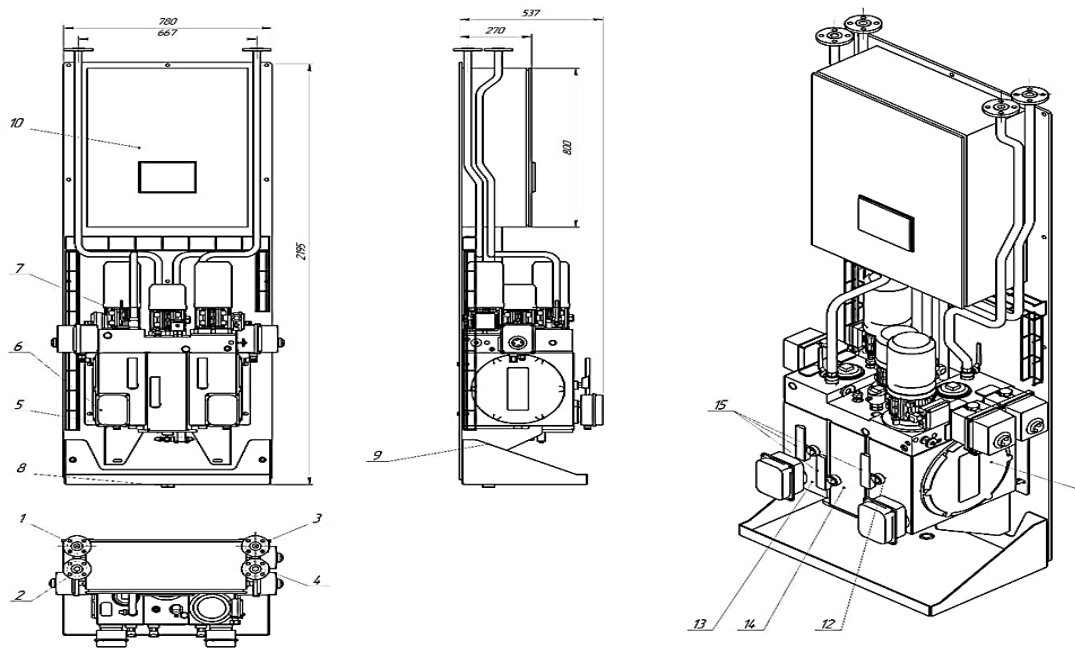


Рис. 7 – Компонування системи АСОМ: 1 – трубопровід повернення масла до двигуна; 2 – трубопровід підводу циліндрового масла марки BN 25; 3 – трубопровід деаерації масла; 4 – трубопровід підводу циліндрового масла марки BN 100; 5 – трубопровід подачі масла на лубрикатори; 6 – електронний блок; 7 – насос; 8 – пробка для зливу; 9 – остов; 10 – електронний блок керування системою; 11 – люк; 12 – ємність для циліндрового масла марки BN 100; 13 – ємність для циліндрового масла марки BN 25; 14 – ємність для змішаного циліндрового масла; 15 – показчик рівня масла

Загальний об'єм змішаного масла невеликий, що робить можливим швидкий перехід від одного числа BN до іншого, в залежності від вмісту сірки в паливі, система АСОМ вимірює та постійно проводить контроль щоденного споживання циліндрового масла, за рахунок цього не потрібен постійний контроль з боку машинної команди судна [2-8]. У порівнянні з традиційною системою циліндрового мащення, система АСОМ виключає два невеликих резервуари з підігрівниками масла, циліндрове масло подають від резервуарів до АСОМ за допомогою насосів або самопливом, система розташовується у машинному відділенні судна [1-8]. Стандарти, які прописані в системі АСОМ, EoD: 442171, для двигунів ME-C-GI і ME-B-GI, що працюють у режимі використання палива двох видів (SDF), для інших двигунів система АСОМ доступна як додаткова і встановлюється за бажанням судновласника. Циліндрове масло подається до лубрикаторної системи мащення Alpha від сервісного баку або системи АСОМ. Вся система контролюється блоком керування (БК), який контролює частоту впорскування на основі сигналу швидкості та навантаження двигуна, заданий тахометром та індексом палива. Перед пуском циліндри можна попередньо змастити і протягом експлуатації оператор може вибрати подачу масла до максимуму, встановленого на рівні 200% [1-8]. Відомо, що потреба в кількості циліндрового масла залежить від умов експлуатації судна та енергетичної установки. Alpha ACC (Adaptive Cylinder-Oil Control) – режим мащення для двотактних двигунів компанії MAN Diesel, дозування масла пропорційне навантаженню двигуна і вмісту сірки в паливі. Рекомендовані рівні лужного числа циліндрового масла для МОД фірми MAN B&W показано на рис. 8. Регулювання швидкості подачі слід виконувати відповідно до якості і обсягу палива в будь-який момент часу [1-8].

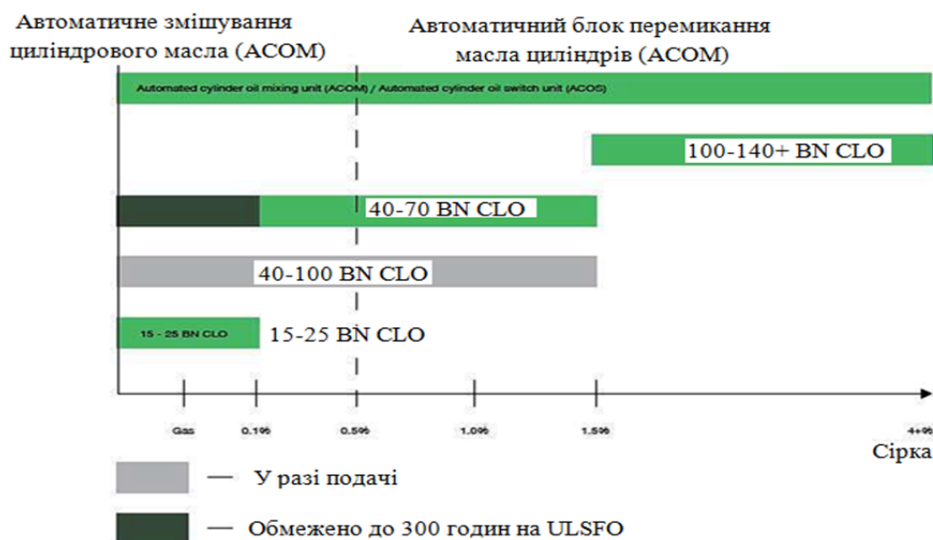


Рис. 8 – Рекомендовані рівні TBN для двигунів фірми MAN B&amp;W

### Висновки

На підставі огляду та врахування особливостей і умов експлуатації лубрикаторної системи мащення суднового МОД, констатуємо, що на даний період часу вимоги для забезпечення та підтримання надійності і довговічності сучасних суднових двигунів, а особливо вимоги до циліндрових масел, є жорсткішими, аніж для МОД попередніх моделей. За рахунок використання системи «АСОМ» у судновій енергетичній установці, можуть бути виготовлені з допомогою змішування різні циліндрові масла з різним лужним числом, з огляду на вимоги правил експлуатації суднового МОД, сорту важкого палива і вмісту сірки в ньому. Автоматично відбувається регулювання швидкості подачі циліндрового масла системою в залежності від умов експлуатації МОД та числа TBN використовуваного циліндрового масла. Перевагами АСОМ є її здатність забезпечувати своєчасне змішування різних марок циліндрових масел, враховуючи вміст сірки у паливі 0,1% до 3,5%, за рахунок цього нейтралізувати сполуки сірки, система «АСОМ» забезпечує точне дозування і безперервну подачу циліндрового масла до лубрикаторів, а це збільшує час напрацювання між капітальними ремонтами ЦПГ суднового двигуна.

### Перелік використаних джерел:

1. Alpha Adaptive Cylinder Oil Control (Alpha ACC). MAN Diesel, PrimeServ, 2007.
2. Богач В. М. Эффективность электронной системы смазывания цилиндров «PULS». *Судовые энергетические установки*. 2011. № 28. С. 13-20.
3. Богач В. М. Моделирование процессов смазывания сопряжений ЦПГ при эксплуатации судовых дизелей. *Судовые энергетические установки*. 2012. № 29. С. 55-64.
4. Sagin S. V., Semenov O. V. Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors. *American Journal of Applied Sciences*. 2016. Vol. 13. № 2. Pp. 200-208. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.200.208>.
5. The ME Engines Service Experience. 3rd ed. Copenhagen : MAN B&W DIESEL A/S, 2008. 13 p.
6. Sagin S. V., Solodovnikov V. G. Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines. *Modern Applied Science*. 2015. Vol. 9. № 5. Pp. 269-278. DOI: <https://doi.org/10.5539/mas.v9n5p269>.
7. Эксплуатационные показатели эффективности лубрикаторных систем судовых дизелей / Богач В. М., Шебанов О. М., Колієв І. Д., Журавльов Ю. І. *Судовые энергетические установки*. 2007. Вип. 19. С. 10-22.
8. Погорлецкий Д. С., Грицук І. В., Худяков І. В. Особливості експлуатації лубрикаторної системи мащення суднового двигуна MAN - B&W 5S70ME-C. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 16-18 березня 2023 р. С. 22-26.

## References:

1. *Alpha Adaptive Cylinder Oil Control (Alpha ACC)*. MAN Diesel, PrimeServ, 2007.
2. V. M. Bohach, «Effektivnost elektronnoi systemy smazivaniya tsylyndrov «PULS» [«Efficiency of the electronic cylinder lubrication system «PULS»], *Sudovie enerhetycheskye ustanovky – Marine power plants*, № 28, pp. 13-20, 2011. (Rus.)
3. V. M. Bohach, «Modelirovaniye protsessov smazivaniya sopriazhenyi TsPH pry ekspluatatsyy sudovikh dyzelei» [«Modeling of lubrication processes of CPG joints during operation of marine diesel engines»], *Sudovie enerhetycheskye ustanovky – Marine power plants*, № 29, pp. 55-64, 2012. (Rus.)
4. S.V. Sagin, and O.V. Semenov, «Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors», *American Journal of Applied Sciences*, vol. 13, № 2, pp. 200-208, 2016. doi: **10.3844/ajassp.2016.200.208**.
5. *The ME Engines Service Experience*, 3rd ed. Copenhagen : MAN B&W DIESEL A/S, 2008.
6. S.V. Sagin, and V. G. Solodovnikov, «Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines», *Modern Applied Science*, vol. 9, № 5, pp. 269-278, 2015. doi: **105539/mas.v9n5p269**.
7. V.M. Bohach, O.M. Shebanov, I.D. Koliiev, and Yu.I. Zhuravlov, «Ekspluatatsyonnie pokazately effektivnosti lubrykatornikh system sudovikh dyzelei» [«Performance indicators of the efficiency of lubricating systems of marine diesel engines»], *Sudovie enerhetycheskye ustanovky – Marine power plants*, vol. 19, pp. 10-22, 2007. (Rus.)
8. D.S. Pohorletskiy, I.V. Gritsuk, and I.V. Khudiakov, «Osoblyvosti ekspluatatsii lubrykatornoii systemy mashchennia sudnovoho dvyhuna MAN - B&W 5S70ME-C» [«Features of operation of the MAN - B&W 5S70ME-C marine engine lubrication system»], in Proceedings of 14-th Int. sci.-pract. conf. «Modern energy installations in transport, technologies and equipment for their maintenance», Kherson, 2023, pp. 22-26. (Ukr.)

Стаття надійшла 18.04.2024

Стаття прийнята 12.05.2024

УДК 656.61.052

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310709

© Калініченко Т.В.\*

### ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ ШЛЯХОМ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН

Стаття присвячена дослідженню основних напрямків підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнень суден. Сучасний розвиток світового судноплавства характеризується зростанням інтенсивності морських перевезень, що значно підвищує ризики виникнення аварійних ситуацій, зокрема, зіткнень суден. Ці інциденти є однією з основних причин аварій на морі, що призводить до значних економічних втрат, шкоди навколишньому середовищу та ризику для життя людей. У статті проаналізовано різноманітні аспекти підвищення безпеки судноводіння, зокрема, використання сучасних технологій, організаційних заходів, підвищення кваліфікації екіпажу та ефективного технічного обслуговування суден. Основну увагу приділено наступним напрямкам: технічному забезпеченню, організаційним заходам, навчанням і тренінгам для екіпажу, системам зв'язку та міжнародній координації, а також забезпеченню технічної справності суден. Радіолокаційні системи дозволяють виявляти і відстежувати судна на різних відстанях, що є критично важливим у складних погодних умовах. Важливим аспектом є підвищення кваліфікації

\* здобувачка ступеня доктора філософії, ст. викладач, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3531-8281, [tkatana1002@gmail.com](mailto:tkatana1002@gmail.com)