

© Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРГАНІЧНИХ НАНОПОКРИТЬ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАЩЕННЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Надані результати досліджень, щодо визначення впливу органічних нанопокриттів на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів судових дизелів. Експериментальні дослідження складались зі трьох етапів. На першому та другому, які проводились в науково-дослідницької лабораторії, визначались товщина адсорбованого шару різних епіламів на металевій поверхні, а також товщина та крайові кути змочування граничного шару мастила, що утворюється на металевій поверхні за таких умов. Товщина адсорбованого шару епіламу, а також характеристики структурованого граничного шару мастила визначались за допомогою еліпсометричної установки. При цьому було встановлено, що за тривалістю процесу епіламування до 10 хвилин на металевій поверхні утворюється адсорбований шар епіламу завтовшки 10,9...17,7 нм. Це (для різних епіламів) сприяє збільшенню товщини граничного шару мастила зі значень 12,0...12,7 мкм до 14,8... 18,0 мкм та підвищенню крайового кута змочування зі значень 9,7...10,7 град до 15,4... 17,8 град, що свідчить про збільшення структурної впорядкованості мастила біля металевій поверхні. Третій етап досліджень виконувався на двох однотипних судових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo, що входили до складу енергетичної установки судна класу Container Ship призначеного для перевезення 3780 TEU контейнерів. V-подібна конструкція дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла нанести покриття епіламу на вкладиші шості підшипників одного ряду циліндрів. Вкладиші шості підшипників іншого ряду циліндрів залишити без нанесення покриття епіламу. Наявність на судні двох дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла одночасно використовувати під час досліджень два різних епіламу. За такі обирались епілами, які (за результатами етапів 1 та 2) забезпечували утворення біля металевій поверхні більш структурованих граничних шарів мастила. Експерименти виконувались на протязі 3200 годин. У цей час дизелі 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo працювали в широкому діапазоні навантажень – 35...85 % від номінальної потужності. Експериментально підтверджено, що епіламування вкладишів підшипників сприяє зниженню зносу вкладишів підшипників на 6,1...27,6 % та покращує їх технічний стан.

Ключові слова: вкладиш підшипника, граничний шар мастила, експлуатація судових дизелів, крайовий кут змочування, морський транспорт, моторне мастило, органічні покриття, процес мащення, система мащення, судовий дизель, технічний стан

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Суднові двигуни внутрішнього згоряння відносяться до найпоширенішого типу теплових двигунів, що використовуються в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту [1-3]. Вони використовуються для перетворення кінетичної енергії газів, які утворюються в їхньому циліндрі під час згоряння палива, в крутний момент на валу та далі в корисну роботу [4-6]. Функціонування та експлуатаційну надійність двигунів внутрішнього згоряння забезпечують різні системи. Основними є паливна, мащення, охолодження, пускового повітря, випуску газів. Дані системи забезпечують процес згоряння палива та випуску продуктів згоряння, а також режими мащення та охолодження основних деталей дизеля [7-9].

Система мащення, яка для судових дизелів може бути лубрикаторною або циркуляційною, забезпечує подачу мастильного матеріалу до основних контактних пар дизеля: поршневе кільце – циліндрова втулка, а також вкладиш підшипника – колінчастий вал [10, 12]. Малообертові судові дизелі, які працюють за двотактним циклом, комплектуються двома системами мащення. При цьому лубрикаторна система забезпечує подачу мастила на дзеркало циліндрової втулки дизеля; циркуляційна – мащення рамового, мотильового та крейцкопфного підшипників, шестерної або ланцюгової передачі,

а також охолодження поршня. У кожній із систем використовується свій сорт мастила, який відрізняється один від одного експлуатаційними характеристиками (насамперед лужним числом, в'язкістю та температурою спалаху) [13-15].

Суднові дизелі, робота яких відбувається за чотиритактним циклом, мають одну загальну систему мащення і використовують один сорт мастила. Подача мастильного матеріалу до підшипників цих дизелів забезпечується циркуляційною системою мащення. При цьому мастило за спеціальним свердлінням у колінчастому валу надходить на мащення рамового та мотильового підшипників, а за свердлінням у шатуні – на мащення головного підшипника [14, 15]. Мащення циліндрової втулки у такому разі забезпечується за допомогою розбризкування мастила з картера дизеля (рис. 1).

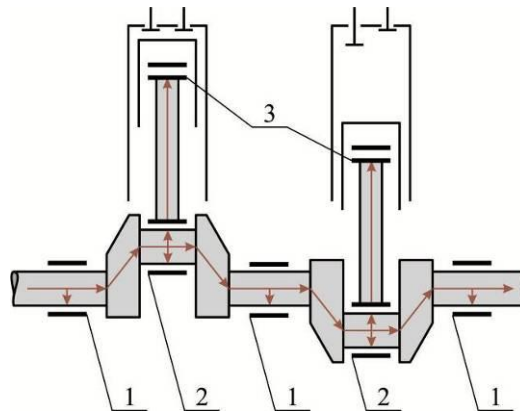


Рисунок 1 – Забезпечення подачі мастильного матеріалу до підшипників суднового чотиритактного дизеля за допомогою циркуляційної системи мащення:
1, 2, 3 – рамовий, мотильовий, головний підшипники відповідно

Мастило, яке знаходиться у поєднанні вкладиш підшипника – вал дизеля, забезпечує гідравлічну щільність та запобігає безпосередньому контакту цієї пари тертя. Збільшенню гідравлічної щільності сприяють сили поверхневого натягу, що виникають на поверхні мастильної плівки при контакті з повітряною фазою [16, 17]. Розмір цих сил пропорційна значенню крайових кутів змочування θ (рис. 2).

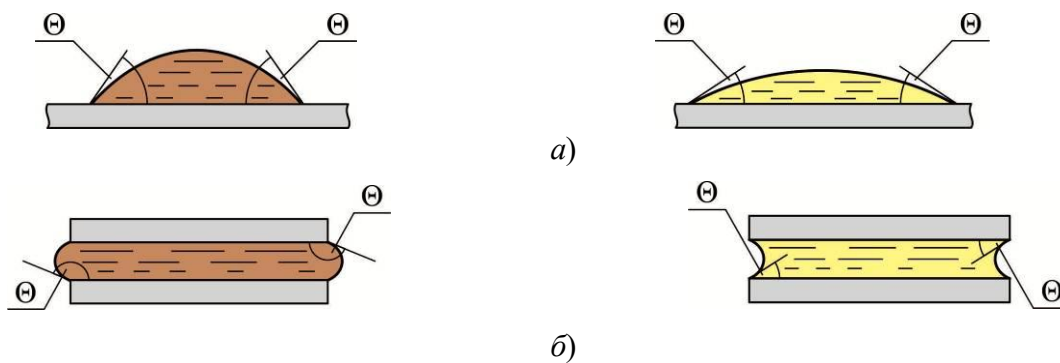


Рисунок 2 – Вплив крайових кутів змочування θ на формування мастильного шару:
а – на відкритій поверхні; б – всередині пари тертя

Збільшення крайових кутів змочування як на відкритій поверхні (на межі фаз метал-мастило-повітря), так і всередині пари тертя (на межі фаз метал-мастило-метал) сприяє підвищенню сили поверхневого натягу, зменшенню витоків мастила, підвищенню несучої здатності мастильного шару [18, 19]. Все це позитивно впливає на технічний стан вкладишів підшипників. Підвищення витоків у поєднанні вкладиш-вал зменшує демпфуючі властивості мастила, що може призвести до підвищеного зносу вкладишів підшипників і збільшення витрати мастила на вигар [20, 21]. Крім того, при цьому (через збільшення сили тертя між поверхнями, що вступають у безпосередній контакт), збільшуються механічні втрати, а також знижується ефективна потужність дизеля. Поступово це сприяє погіршенню

технічного стану поверхонь підшипників, що може стати однією з причин виникнення аварійної ситуації [22-25].

Таким чином, підтримка технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів (який може бути забезпечений за рахунок збільшення крайових кутів змочування масляної плівки) є актуальним науково-прикладним завданням. Її рішення сприяє зниженню механічних втрат, а також динамічних та теплових навантажень на основні деталі дизеля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підтримка технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів [26-28] (як і ряду контактних поверхонь інших машин і механізмів [29-31]) можливе шляхом спеціальної механічної або фізичної обробки поверхонь [32-34], додаванням поверхнево активних речовин у мастило них покриттів [35-37].

Одним з поширених типів антифрикційних покриттів є епілами – полімерні речовини, що містять фтор, які наносяться на металеві поверхні. Під час нанесення епіламів на поверхні метала утворюється плівка завтовшки до 30 нм, яка не впливає на дислокаційну структуру та твердість металу. Її поверхнева енергія залежить від виду епіламу і залежить від металу, який вона наноситься [38-40].

Адгезійні сили сприяють утримання шару антифрикційного покриття на металевій поверхні [41-43]. Саме цей шар забезпечує зменшення контактних взаємодій у трибологічних системах. Визначення адгезійних сил нанопокриттів можливе у різний спосіб: дряпанням, нормального відриву, ультразвукової вібрації [44-46]. Основна функція епіламованого шару полягає в утриманні мастильного матеріалу в зоні тертя енергетичним бар'єром на межі «метал – епілам» [47-49]. Це досягається за рахунок збільшення крайових кутів змочування мастила θ , яка знаходиться біля поверхні металу, покритого шаром епіламу (рис. 3), а також за рахунок переспрямованості вектора дії сили поверхневого натягу мастила.

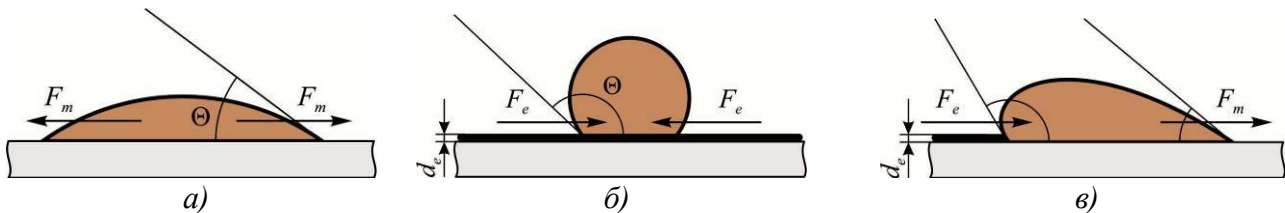


Рисунок 3 – Крайовий кут змочування та напрям дії вектора сили поверхневого натягу рідини: а – мастило на поверхні металу; б – мастило на поверхні епіламу; в – мастило на межі метал – епілам; θ – крайовий кут змочування; F_m , F_e – сили поверхневого натягу на металі та епіламі, відповідно; d_e – товщина адсорбованого шару епіламу

Нанесення епіламів сприяє утворенню на металевій поверхні граничних мастильних шарів підвищеної (порівняно з поверхнею, на яку не наноситься шар епіламу) товщини. Схема утворення граничних шарів в разі нанесення на металеву поверхню епіламів показано на рис. 4.

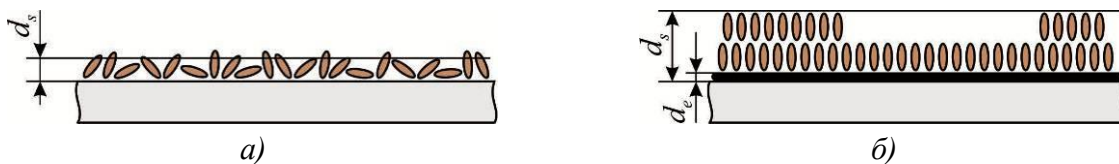


Рисунок 4 – Зміна товщини граничного шару мастила для різного стану металевій поверхні: а – без нанесення на поверхню шару епіламу; б – з нанесенням на поверхню шару епіламу; d_s – товщина граничного шару мастила; d_e – товщина адсорбованого шару епіламу

Формулювання цілей статті. З огляду на викладене метою дослідження було визначення впливу антифрикційних покриттів на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались в науковій лабораторії та під час експлуатації суднових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo. В науковій лабораторії визначались структурні характеристики тонких нанопокриттів епіламів, що наносились на металеву поверхню, а також структурні характеристики граничних шарів мастила, що утворювались на цих поверхнях.

Завданням досліджень, що виконувались на суднових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo, було визначення технічного стану вкладишів їхніх підшипників ковзання, на несучу поверхню частини з яких було попередньо нанесене покриття шару епіламу.

Завданням першого етапу дослідження було визначення впливу нанесення епіламів на утворення граничного шару мастила на металевій поверхні.

Під час дослідження використовувались епілами Aqualin, Efren-K, Polisam-20. Поверхнево-активним компонентом всіх епіламів був фторований вуглець. Відповідно до характеристик виробника, вказані епілами утворюють на металевій поверхні тонкий шар завтовшки 10...50 нм та характеризуються температурною стійкістю 250...300 °С з можливістю сприймати короточасні миттєві температурні навантаження до 600 °С.

Нанесення вказаних епіламів на металеву поверхню (характеристики якої збігались з характеристиками поверхні вкладишів підшипників дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo) виконувалось шляхом їхнього попереднього розчинення в хладону.

Визначення товщини шару епіламу d_e , адсорбованого на металевій поверхні, а також визначення структурних характеристик граничних мастильних шарів (товщини шару d_s та крайового кута змочування θ) виконувалось за допомогою спектроскопічного еліпсометра ES01 (виробник Elliptor, Китай). Еліпсометр ES01 призначений для вимірювання параметрів структури шарів (наприклад, товщини) одношарових та багатшарових наноплівочок, фізичних параметрів (таких, як показник заломлення n , коефіцієнт екстинкції k або діелектричні функції ϵ_1 та ϵ_2). Еліпсометр ES01 дозволяє проводити вимірювання товщини тонких адсорбованих наноплівочок у діапазоні 3...100 нм, з точністю 0,1 нм, а також виконувати визначення крайових кутів змочування в діапазоні 2...60 градусів з точністю 0,1 градуса. Крім того, він дозволяє визначити товщину шару рідини в діапазоні до 22...25 мкм з точністю 0,2 мкм.

Спочатку за допомогою еліпсометра ES01 визначалася товщина шару епіламового покриття, нанесеного на металеву поверхню. Для підвищення точності, виконувався п'ятиразовий вимір товщини адсорбованого на металевій поверхні шару епіламу для кожного часового проміжку для кожного з епіламів. Після цього визначалася середня від отриманих значень величина адсорбованої товщини шару епіламів. Значення середньої товщини шару епіламів Aqualin, Efren-K, Polisam-20, а також діапазон отриманих при вимірюванні значень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати визначення адсорбованої товщини шару епіламів
Aqualin, Efren-K, Polisam-20

Тривалість процесу нанесення епіламу, t , хв	Середня товщина шару епіламу, h , та діапазон її зміни, нм		
	Епілам № 1	Епілам № 2	Епілам № 3
2	4,78 (4,0...5,4)	7,72 (7,0...8,4)	9,1 (8,3...9,8)
4	9,28 (8,6...9,9)	12,28 (11,6...12,9)	13,2 (12,6...13,8)
6	10,30 (9,8...10,8)	16,62 (16,0...17,3)	14,68 (14,1...15,3)
8	10,70 (10,3...11,0)	17,18 (16,7...17,6)	14,90 (14,4...15,4)
10	11,22 (10,9...11,4)	17,38 (17,0...17,7)	15,20 (14,8...15,6)

Примітка: нумерація епіламів виконана в довільній формі

За результатами таблиці 1 побудовані залежності, що надані на рис. 5.

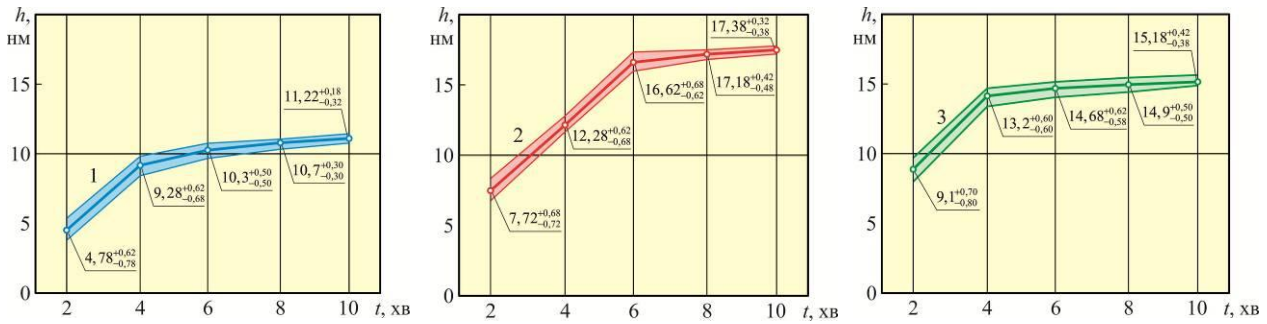


Рисунок 5 – Залежність середньої товщини адсорбованого шару епіламів *Aqualin*, *Efren-K*, *Polisam-20* від часу нанесення на металеву поверхню (нумерація епіламів виконана у довільній формі)

Результати, що наведені в таблиці 1 та на рис. 5, свідчать, що, після 6...10 хв нанесення товщина адсорбційного шару епіламу на металевій поверхні стабілізується. При цьому значення товщини адсорбційного шару епіламу для різних зразків коливається в діапазоні $h=10,9...17,7$ нм.

Завданням другого етапу досліджень було визначення впливу епіламів на структурні характеристики граничних мастильних шарів (товщину шару d_s та крайовий кут змочування θ). Як мастило було обрано *Castrol TLX PLUS 404*. Саме це мастило використовувалося в циркуляційній системі мащення суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo.

За допомогою еліпсометра ES01 спочатку визначалися товщина граничного шару d_s та крайовий кут змочування θ , утвореного на чистій металевій поверхні (без покриття епіламом). Після цього вказані характеристики визначалися для граничного мастильного шару, утвореного на поверхні з різним епіламовим покриттям. Для забезпечення необхідної точності проводилося п'ятиразове вимірювання цих показників. Після цього отримані значення усереднювалися. Середні значення товщини граничного шару d_s і крайового кута змочування θ , а також їх діапазон зміни наведені в таблиці 2. Для кращої візуалізації, зміна товщини граничного шару d_s та крайового кута змочування θ (а також відхилення значень від середньої величини) показані на рис. 6. При цьому під позначенням LO (lubrication oil) мається на увазі безпосередня товщина граничного шару мастила d_s , що утворюються на металевій поверхні, а також значення його крайових кутів змочування θ . Під позначенням 1, 2, 3 – товщина граничного шару мастила d_s , що утворюється на тій же поверхні за умовою її покритті шаром епіламу, а також значення крайових кутів змочування θ .

Таблиця 2 – Структурні характеристики граничного шару мастила в разі нанесення на металеву поверхню шару епіламів *Aqualin*, *Efren-K*, *Polisam-20*

Тип покриття поверхні	Структурна характеристика граничного шару мастила	
	товщина d_s , мкм	крайовий кут змочування θ , град
Без покриття	12,32 (12,0...12,7)	10,20 (9,7...10,7)
Епілам № 1	15,20 (14,8...15,5)	15,80 (15,4...16,2)
Епілам № 2	18,28 (18,0...18,5)	17,38 (17,0...17,8)
Епілам № 3	17,18 (16,9...17,4)	16,30 (16,0...16,7)

Примітка: нумерація епіламів виконана в довільній формі

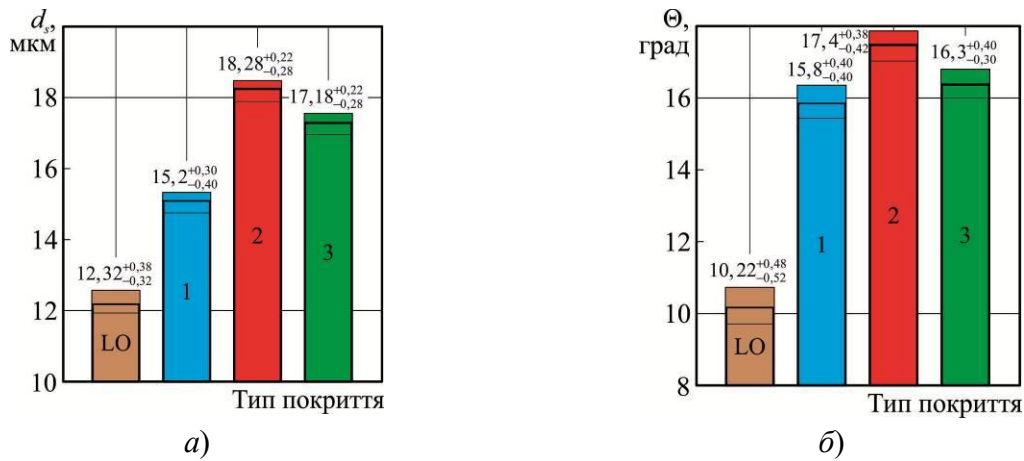


Рисунок 6 – Зміна товщини d_s та крайового кута змочування θ граничного шару мастила в разі нанесення на металеву поверхню різних епіламів:

LO – відсутність покриття (безпосередня товщина граничного шару мастила або крайовий кут змочування); 1, 2, 3 – покриття епілами Aqualin, Efren-K, Polisat-20 (нумерація епіламів виконана в довільній формі)

Як основний результат другого етапу досліджень було визначення епіламів, що забезпечують утворення біля металеві поверхні граничних шарів мастила з найбільшою товщиною та найбільшим кутом змочування. Як такі зразки були визначені епілами № 2 та № 3, нанесення яких на металеву поверхню сприяє утворенню граничних шарів мастила з товщиною 18,0...18,5 мкм та крайовими кутами змочування 17,0...17,8 град (для епіламу № 2) та товщиною 16,9...17,4 мкм та крайовими кутами змочування 16,0...16,7 град (для епіламу № 3).

Третій етап досліджень виконувався на суднових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo, які у кількості двох входили до складу енергетичної установки судна класу Container Ship призначеного для перевезення 3780 TEU контейнерів. Принципова схема системи циркуляційного мащення дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo надана на рис. 7.

Подача мастила до циркуляційної системи мащення здійснюється мастильним насосом 1, за допомогою якого забезпечується поповнення мастильної цистерни 2 та подальше потрапляння мастила до стічної цистерни 11. Подача мастила на мащення деталей дизеля 3 забезпечується циркуляційними насосами 7 або 8, при цьому мастило піддається попередньому очищенню у фільтрі грубого очищення 9 або 10. У разі необхідності охолодження мастила здійснюється в охолоджувачі 6. Перед потраплянням до дизеля мастило очищується у фільтрі грубого 5 та тонкого 4 очищення.

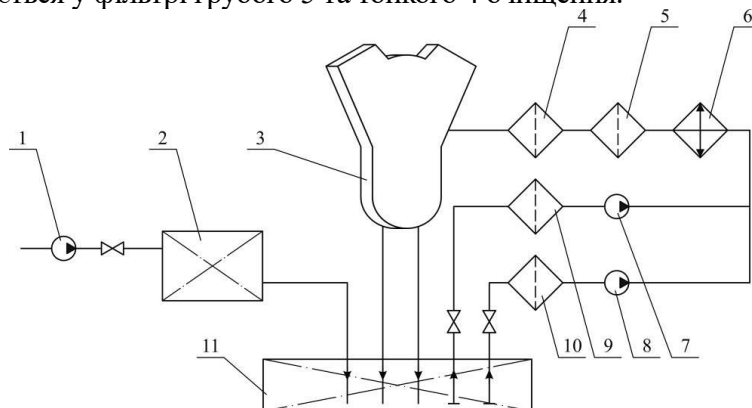


Рисунок 7 – Принципова схема системи циркуляційного мащення суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo:

1 – насос, що підкачує мастило до системи мащення; 2 – цистерна циркуляційного мастила Castrol TLX PLUS 404; 3 – судновий дизель; 4 – фільтр тонкого очищення; 5, 9, 10 – фільтр грубого очищення; 6 – охолоджувач мастила; 7, 8 – циркуляційні мастильні насоси; 11 – стічна цистерна

Час експлуатації дизелів (а відповідно і час проведення досліджень) становив близько 3200 годин. У цей час дизелі 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo працювали в широкому діапазоні навантажень – 35...85 % від номінальної потужності. При цьому підтримувалися всі необхідні параметри в системах охолодження та мащення, що запобігало температурним навантаженням [50-52]. По завершенні вказано часу виконувалась оцінка технічного стану вкладишів підшипників дизелів [53-56].

V-подібна конструкція дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла нанести покриття епіламу на вкладиші шості підшипників одного ряду циліндрів. Вкладиші шості підшипників іншого ряду циліндрів залишити без нанесення покриття епіламу. Наявність на судні двох дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла одночасно використовувати під час досліджень два різних епіламу. За такі приймалися епілам № 2 та епілам № 3 – такі, що забезпечували найкращі структурні характеристик граничного шару мастила на поверхні вкладиша.

Початковим візуальним оглядом вкладишів підшипників було встановлено покращення технічного стану вкладишів, які були попередньо покриті шаром епіламу. При цьому цей факт було встановлено як для одного дизеля (для якого використовувався епілам № 2), також і для другого дизеля (для якого використовувався епілам № 3). Це виявлялось в різній інтенсивності зношування їх поверхонь. Знос поверхонь вкладишів (а, відповідно, і погіршення їх технічного стану), які попередньо були оброблені епіламом, спостерігався тільки в центральній частині. Саме ця частина вкладиша підшипника є найбільш навантаженою і більше піддається контактам з валом дизеля. У зв'язку з цим, знос даної ділянки вкладиша підшипника вважається стандартним і у разі допустимих значень – не критичним. Знос поверхні вкладиша, на який не наносився шар епіламу поширювався по більшій площі, а також був більш глибокий. Це свідчить про те, що в даному випадку між поверхнею вкладиша підшипника та валом відбуваються сильніші контактні взаємодії. Причиною виникнення є зменшення товщини граничного мастильного шару, а також зменшення крайових кутів змочування. Саме ці ознаки характерні у разі відсутності на поверхні вкладиша адсорбційного шару антифрикційного покриття (епілама).

Головним завданням аналізу стану вкладишів підшипників є оцінка ефективності роботи системи мащення. При цьому робляться висновки про якість моторного мастила, що використовується, а також про коректність обраних режимів мащення, охолодження та навантаження дизеля [57, 58]. Одним із найбільш точних методів визначення зміни геометрії поверхні є їхнє сканування електронним мікроскопом. На жаль, застосування подібної вимірювальної техніки поки що важко безпосередньо на морських суднах [59-61]. Це пов'язано як із вартістю таких вимірювальних приладів, також і з необхідністю наявності на судні фахівців, які здатні виконати вимірювання та їх аналіз. З іншого боку, періодичність використання електронного мікроскопа на борту морського судна дуже мала. Надсилання вкладишів або інших вузлів дизеля для визначення їх зносу методом електронного сканування пов'язане з додатковими витратами (наприклад, для дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo необхідно виконати аналіз стану двадцяти чотирьох вкладишів підшипників). Крім того, відправка деталей дизеля до дослідницької лабораторії, а також отримання результатів дослідження займає певний час. Це віддаляє час ухвалення рішення щодо ефективності роботи системи мащення дизеля.

У зв'язку з цим оцінка стану поверхонь вкладишів підшипників виконувалася шляхом вимірювання їхнього зносу. Згідно з інструкцією з експлуатації судових дизелів вага вкладишів підшипників складала 2850 г, що повністю задовольняло умови використання електронних ваг Walcom LB3002. Вимірювання ваги вкладишів підшипників дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo до їх встановлення на дизель та після експлуатаційного періоду роботи, виконувалася шляхом їх одноразового зважування. В обох випадках перед проведенням зважування вкладиші підшипників очищалися від усіх забруднень та оброблялися цетиловим спиртом $C_{16}H_{33}OH$. Результати вимірювання маси підшипників наведені в таблицях 3, 4.

Таблиця 3 – Маса вкладишів підшипників дизеля № 1, г

№ циліндра	Без покриття поверхні		Покриття поверхні епіламом № 2	
	перед експлуатацією	після експлуатації	перед експлуатацією	після експлуатації
1	2275	2268,6	2278	2272,4
2	2282	2275,2	2281	2275,3
5	2280	2272,4	2283	2277,1
6	2276	2267,3	2277	2270,7

Таблиця 4 – Маса вкладишів підшипників дизеля № 2, г

№ циліндра	Без покриття поверхні		Покриття поверхні епіламом № 3	
	перед експлуатацією	після експлуатації	перед експлуатацією	після експлуатації
1	2281	2274,4	2277	2270,8
2	2286	2278,8	2283	2276,4
5	2281	2272,6	2281	2274,2
6	2278	2268,9	2277	2270,0

Знос вкладишів підшипників (як показник, за яким виконувалася оцінка роботи системи мащення дизеля та ефективність використання епіламів) визначався як різниця їхньої маси перед експлуатацією і після експлуатації. Результати вимірювання зносу вкладишів підшипників наведені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Знос вкладишів підшипників суднових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації, г

№ циліндра	MAN-Diesel & Turbo № 1		MAN-Diesel & Turbo № 2	
	Без покриття поверхні	Покриття епіламом № 2	Без покриття поверхні	Покриття епіламом № 3
1	6,4	5,6	6,6	6,2
2	6,8	5,7	7,2	6,6
5	7,6	5,9	8,4	6,8
6	8,7	6,3	9,1	7,0

За результатами таблиці 5 побудовано діаграми, що показані на рис. 8.

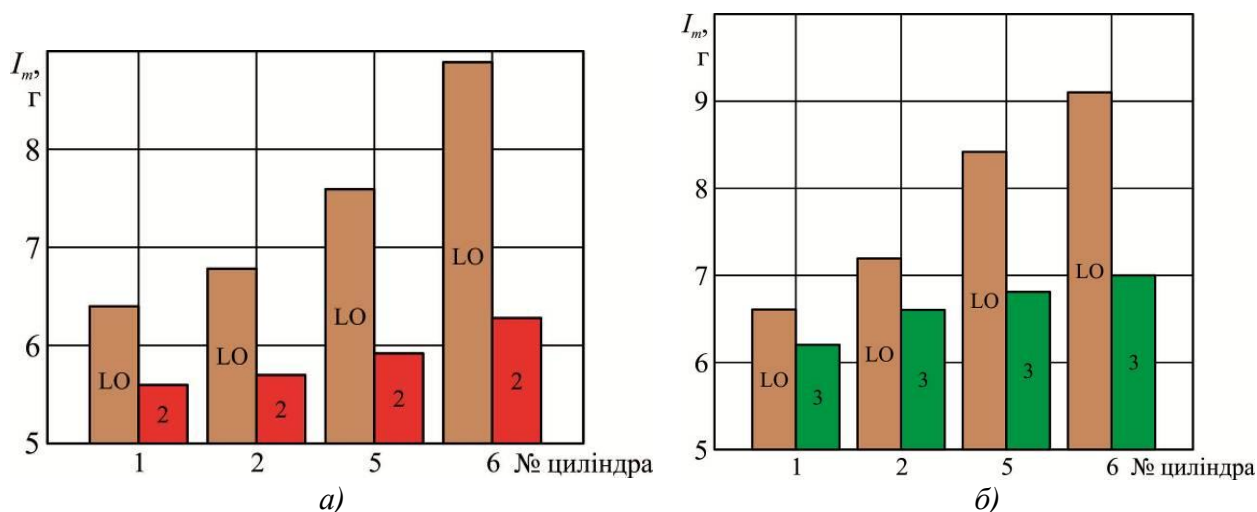


Рисунок 8 – Знос вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації: а – дизель № 1, епілам № 2; б – дизель № 2, епілам № 3

Відсоткове зниження зносу у разі покриття поверхонь вкладишів різними епілами може бути оцінено за виразом:

$$\Delta I_m^i = \frac{I_m^W - I_m^E}{I_m^W} \cdot 100\%; \quad (1)$$

де ΔI_m^i – зниження зносу вкладиша i -го підшипника, %;

I_m^W, I_m^E – знос вкладиша i -го підшипника без покриття поверхні і з покриттям поверхні шаром епіламу, г.

Значення, отримані відповідно до виразу (1), для різних умов експлуатації дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo наведено у таблиці 6.

Таблиця 6 – Зниження зносу вкладишів підшипників, %, судових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації

№ циліндра	Дизель № 1.	Лизель № 2.
	Покриття епіламом № 2	Покриття епіламом № 3
1	12,5	6,1
2	16,2	8,3
5	22,4	19,0
6	27,6	23,1

За результатами таблиці 6 побудовано діаграми, які відображають відсоткове зниження зносу вкладишів підшипників у разі покриття їх поверхні шаром епіламу (рис. 9).

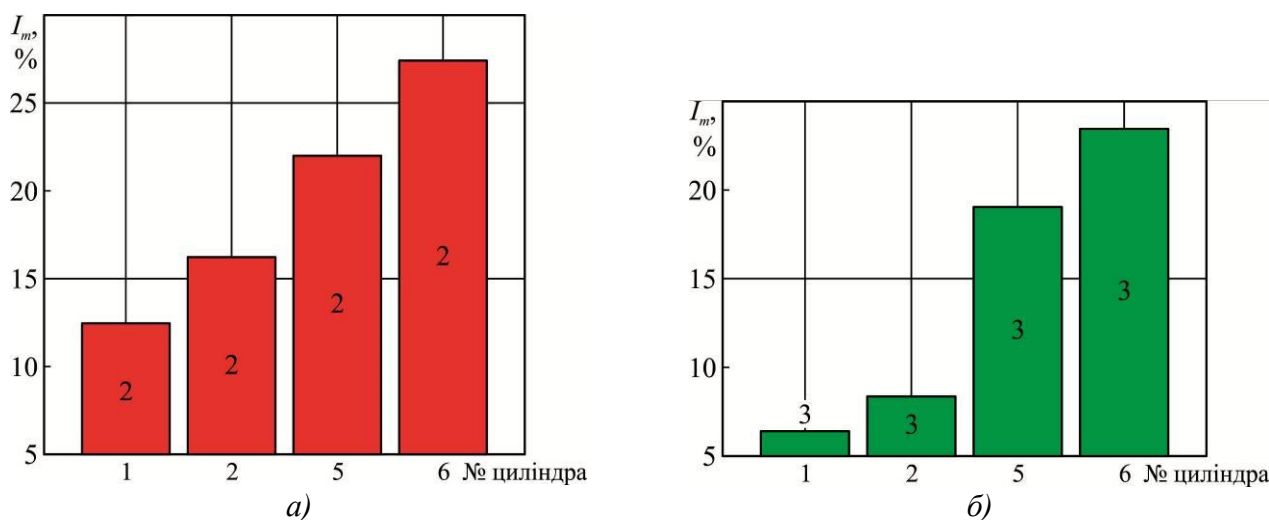


Рисунок 9 – Відсоткове зниження зносу вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo у разі покриття їх поверхні шаром епіламу: а – дизель № 1, епілам № 2; б – дизель № 2, епілам № 3

У більшості випадків знос вкладишів підшипників для різних циліндрів відрізняється один від одного. Це пов'язано з динамічною нерівновагою, що в будь-якому разі виникає під час роботи дизеля; з різним навантаженням на циліндри дизеля через невідосконалене впорскування палива, а також з різним розподіленням опору з боку споживача енергії (гвинта або електричного генератора). При цьому, як правило, більший знос вкладишів характерно для тих, які розташовані ближче саме до споживача енергії – а саме для «кормових» підшипників.

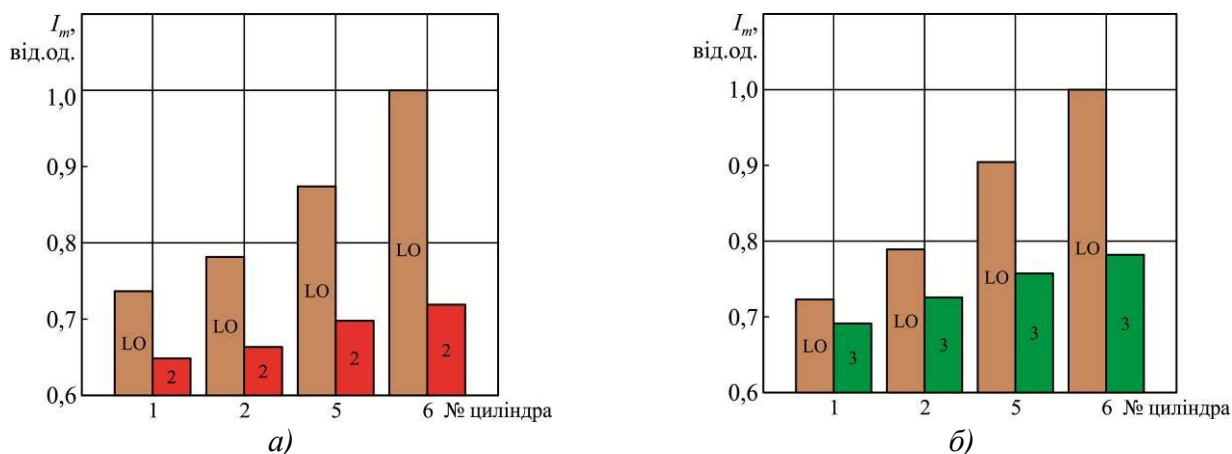
При проведенні експериментів зношування вкладиша для «кормового» підшипника (для циліндра № 6) приймалося за 1; знос інших вкладишів перераховувався за цим значенням у відносних одиницях. Результати розрахунків наведено у таблиці 7 та на рис. 10.

Таблиця 7 – Знос вкладишів підшипників судових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації (відносні одиниці – від. од.)

№ циліндра	Дизель № 1		Дизель № 2	
	Без покриття	Покриття епіламом № 2	Без покриття	Покриття епіламом № 3
1	0,736	0,644	0,725	0,681
2	0,782	0,655	0,791	0,725
5	0,874	0,678	0,923	0,747
6	1,0	0,724	1,0	0,769

За результатами таблиці 7 побудовано діаграми, що показані на рис. 10.

Всі дослідження виконувались з суворим виконанням правил технічної експлуатації, а також з міжнародних вимог щодо забезпечення безпеки людини та довкілля [62, 63].



Рисунки 10 – Відносний знос вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації: а – дизель № 1, епілам № 2; б – дизель № 2, епілам № 3

Висновки.

Вкладиші підшипників ковзання відносяться до одного з найвідповідальніших вузлів судових дизелів і забезпечують передачу поступального руху поршня в циліндрі в обертальний рух колінчатого валу. Забезпечення їх функціонування неможливе без використання мастильного матеріалу (моторного мастила), який створює мастильний шар і перешкоджає безпосередньому контакту поверхонь. Погіршення технічного стану вкладишів підшипників може призвести до підвищених механічних та теплових навантажень. Це, у свою чергу, збільшує втрати потужності на тертя та знижує ефективну потужність дизеля. Підвищення технічного стану вкладишів підшипників можливе шляхом їхньої попередньої (до експлуатаційної) обробки антифрикційними покриттями. До таких покриттів відносяться епілами – полімерні фторвмісні речовини, які наносяться на металеві поверхні. Після нанесення на металеву поверхню епілам утворює тонку плівку завтовшки кілька десятків нанометрів. Однак надалі ця плівка сприяє утворенню на її поверхні більш структурованих граничних шарів мастильного матеріалу (моторного масла). Комплекс цих взаємодій сприяє зниженню зношування поверхні вкладишів підшипника.

Нанесення епіламів на металеву поверхню можливе з хладонів. Час нанесення епіламів характеризується межею насичення, перевищення якої не збільшує товщину адсорбованого на поверхні шару. Для епіламів Aqualin, Efren-K, Polisam-20, які використовувалися під час проведення експерименту, найбільша інтенсивність утворення адсорбованої плівки відповідала початковому етапу

нанесення. При цьому в період перших 2...4 хв нанесення утворювалася плівка, товщина якої становила 74...88 % від повної товщини адсорбованого за весь період нанесення шару епіламу. За період 8...10 хв інтенсивність збільшення товщини адсорбованого шару знижується. Перевищення часу нанесення епіламу вище 10 хв. практично не впливає на товщину адсорбованого шару.

Збільшення дальнодіючих поверхневих сил (чому сприяє нанесення епіламу) підвищує структурну впорядкованість граничного шару мастила, утвореного на металевій поверхні. В даному випадку – товщину граничного шару мастила на поверхні вкладиша підшипника та крайового кута змочування. При цьому підвищуються пружнодемпфуючі властивості мастил, що є однією з причин подальшого зменшення зносу контактних поверхонь. Експериментально підтверджено, що епіламування вкладишів підшипників сприяє 1,23...1,48 кратному підвищенню товщини граничного шару та 1,55..1,70 кратному підвищенню крайових кутів змочування, що надалі сприяє зниженню зносу вкладишів підшипників на 6,1...27,6 % та покращує їх технічний стан.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.
2. Сагин С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
3. Sagin S.V., Madey V.V., Stoliaryk T.A. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5(2(61)). – P. 26–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
4. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
5. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” - 2020 – P. 195–202. DOI: 10.34660/INF.2020.4.52991.
6. Zablotskiy 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”. Part 1. – August 31, 2019. – Beijing, PRC. – P. 131–138. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36257.
7. Levinskiy M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2023. – Вып. 28. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
8. Sagin S.V., Zablotskiy Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
9. Levinskiy M.V., Levinskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel’s course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // Automation of ship technical facilities. – 2020. – Вып. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
8. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
9. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.

10. Сагин С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
11. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб. – 2011. – № 26. – С.116-125.
12. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 84-103.
13. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
14. 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>.
15. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
16. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
17. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
18. Сагин С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одеса: ОГМА. – С.102-104.
19. Zablotskiy 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”. Part 1. – August 31, 2019. – Beijing, PRC. – P. 131–138. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36257.
20. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
20. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
21. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // Water transport. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
21. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
22. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
23. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
24. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

25. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
26. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
27. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
28. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
29. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132-142.
30. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
31. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
32. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
34. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
35. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
36. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
37. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants/ – 2025. № 13. – P. 146. https://doi.org/10.3390/lubricants13040146.
38. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
39. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V., Gaichenia O.V. Supplying of marine diesel engine ecological parameters // Naše more: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – № 69(1). – P. 53–61. DOI: 10.17818/NM/2022/1.7.
40. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.

41. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
42. Sagin S.S., Sagin S.V. Using a hybrid system for coordinating the movement of sea vessels during their maneuvering in compressed waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
42. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання гібридної системи координації руху морських суден під час їх маневрування в стиснених водах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
43. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
44. 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 // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
44. 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 // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
45. Petrychenko O., Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
46. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
46. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
47. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
48. Sagin S.V., Karianskyi S.A., Madey V.A., Sagin A.S., Stoliaryk T.A., Tkachenko I.V. impact of biofuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Journal of Maritime Science and Engineering*. – 2023. – № 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
49. Звєрьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
50. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
51. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.
52. Sagin S.V, Madey V.A, Sagin A.S, Stoliaryk T.A, Fomin O.F, Kučera P.I. Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – № 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
53. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
54. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
55. 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.

56. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
57. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
58. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
59. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
60. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
61. Куропятник А.А., Сагін С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
62. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. –2019.– P. 146–153. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36259.
63. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. –2020.– P. 154–160. DOI: 10.34660/INF.2020.24.53689.

REFERENCES

1. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // Automation of ship facilities. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
2. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
3. Sagin S.V., Madey V.V., Stoliaryk T.A. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5(2(61)). – P. 26–32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698.
4. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
5. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” - 2020 – P. 195–202. DOI: 10.34660/INF.2020.4.52991.
6. 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”. Part 1. – August 31, 2019. – Beijing, PRC. – P. 131–138. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36257.
7. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Automation of ship technical facilities. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
8. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

9. Levynskiy M.V., Levynskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // Automation of ship technical facilities. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
10. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.
11. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // Ship power plants. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
12. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
13. Petrychenko O.O., Levynskiy M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
14. 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>.
15. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
16. Sagin S.V., Zablotsky Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
17. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // Water transport. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
18. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // Ship power plants. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
19. Zablotsky 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”. Part 1. – August 31, 2019. – Beijing, PRC. – P. 131–138. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36257.
20. Petrychenko O., Levynskiy M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
21. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // Water transport. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
22. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // Water transport. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
23. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // Water transport. – 2023. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
24. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // Water transport. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
25. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // Water transport. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
26. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Ship power plants. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
27. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // Water transport. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.

28. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies*. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
29. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2018. – № 38. – P. 132–142.
30. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
31. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
32. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
34. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // *Automation of ship technical facilities*. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
35. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
36. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
37. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants* / – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
38. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
39. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V., Gaichenia O.V. Supplying of marine diesel engine ecological parameters // *Naše more: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – № 69(1). – P. 53–61. DOI: 10.17818/NM/2022/1.7.
40. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
41. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
42. Sagin S.S., Sagin S.V. Using a hybrid system for coordinating the movement of sea vessels during their maneuvering in compressed waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
43. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
44. 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 // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
45. Petrychenko O., Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
46. Gorb S., Levynskiy M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.

47. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
48. Sagin S.V., Karianskyi S.A., Madey V.A., Sagin A.S., Stoliaryk T.A., Tkachenko I.V. impact of biofuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Journal of Maritime Science and Engineering.* – 2023. – № 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
49. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants.* – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
50. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // *Water transport.* – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
51. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport.* – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
52. Sagin S.V, Madey V.A, Sagin A.S, Stoliaryk T.A, Fomin O.F, Kučera P.I. Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels // *Journal of Marine Science and Engineering.* – 2022. – № 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
53. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
54. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
55. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants.* – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
56. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport.* – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. [doi.org.10.33298/2226-8553.2024.1.39.21](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21).
57. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // *Ship power plants.* – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
58. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // *Automation of ship facilities.* – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
59. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport.* – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
60. Sagin S.V., Sagin S.S. Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport.* – 2023. – № 2(38). – P. 187–197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
61. Kuropyatnyk O.O., Sagin S.V. Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities.* – 2018. – № 24. – P. 72-80.
62. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration.* –2019.– P. 146–153. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36259.
63. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”.* –2020.– P. 154–160. DOI: 10.34660/INF.2020.24.53689.

Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF ORGANIC NANOCOATINGS ON ENSURING LUBRICATION PROCESSES OF BEARING ASSEMBLIES OF MARINE DIESEL ENGINES

The results of research on determining the influence of organic nanocoatings on ensuring the lubrication processes of bearing assemblies of marine diesel engines are presented. Experimental studies consisted of three stages. In the first and second, which were carried out in the research laboratory, the thickness of the adsorbed layer of various epilams on the metal surface was determined, as well as the thickness and edge wetting angles of the boundary layer of the lubricant formed on the metal surface under such conditions. The thickness of the adsorbed epilam layer, as well as the characteristics of the structured boundary layer of the lubricant were determined using an ellipsometric setup. It was found that with an epilam process duration of up to 10 minutes, an adsorbed epilam layer with a thickness of 10.9...17.7 nm is formed on the metal surface. This (for different epilams) contributes to an increase in the thickness of the boundary layer of the lubricant from values of 12.0...12.7 microns to 14.8...18.0 microns and an increase in the contact angle from values of 9.7...10.7 degrees to 15.4...17.8 degrees, which indicates an increase in the structural order of the lubricant near the metal surface. The third stage of research was carried out on two identical 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo marine diesel engines, which were part of the power plant of a Container Ship class vessel designed to transport 3780 TEU containers. The V-shaped design of the 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo diesel engine allowed applying an epilam coating to the liners of the sixth bearings of one row of cylinders. The liners of the sixth bearings of the other row of cylinders were left without applying an epilam coating. The presence of two 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo diesel engines on the vessel allowed the simultaneous use of two different epilams during the research. Epilams were selected, which (according to the results of stages 1 and 2) ensured the formation of more structured boundary layers of lubricant near the metal surface. The experiments were carried out for 3200 hours. During this time, the 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo diesel engines operated in a wide range of loads - 35...85% of the nominal power. It was experimentally confirmed that epilaming of bearing liners contributes to reducing the wear of bearing liners by 6.1...27.6% and improves their technical condition.

Keywords: bearing liner, boundary layer of lubricant, operation of marine diesel engines, marginal wetting angle, maritime transport, motor oil, organic coatings, lubrication process, lubrication system, marine diesel, technical condition

Стаття прийнята 21.03.2025