

10.31653/smf49.2024.110-123

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

Національний університет «Одеська морська академія»

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ АНТИФРИКЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКИХ СУДЕН**

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Технічний стан окремих вузлів або деталей двигунів внутрішнього згорання (дизелів) морських суден відіграє визначальну роль у забезпеченні їхньої надійності та безаварійної роботи. Одними з таких деталей (щодо судових дизелів) є вкладиші підшипників ковзання, які сприймають нормальні та радіальні навантаження у кривошипно-шатунному механізмі. Тривала та стійка робота підшипників ковзання судових дизелів неможлива без використання мастильного матеріалу, який є складовою тріади тертя метал (вкладиш підшипника) – мастильний матеріал (мастило) – метал (вал дизеля). При цьому забезпечується гідродинамічний або граничний режим мащення. Короткочасна відсутність мастильного матеріалу в цій тріаді або порушення режиму мащення призводить до стрибкоподібного збільшення зносу вкладишів підшипників і може стати причиною аварії дизеля [1-4].

Крім того, погіршення технічного стану вкладишів підшипників судових дизелів (пов'язане зі збільшенням зносу їхніх поверхонь) є причиною збільшення зазорів між валом і вкладишем. Це призводить до зростання динамічних навантажень, виникнення биття вала та підвищення зносу вкладишів підшипників. Металеві часточки (які є продуктами зносу вкладишів підшипників) розповсюджуються системою мащення дизеля, збільшуючи механічний вплив на деталі дизеля, насамперед на інші вкладиші, а також втулку циліндра та поршневі кільця [5-7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підтримання технічного стану вкладишів підшипників судових дизелів (як і деяких контактних поверхонь інших машин і механізмів) можливе шляхом спеціальної механічної або фізичної обробки поверхонь, додавання поверхнево активних речовин у мастильний матеріал, а також нанесенням на поверхні спеціальних антифрикційних покриттів [8-11]. У разі спеціальної механічної або фізичної обробки поверхонь змінюється їхня геометрія, при цьому в трибологічній системі метал – мас-

тильний матеріал – метал виникають додаткові пружнодемпфуючі сили, які забезпечують розклинювальний тиск між поверхнями [12-16]. Поверхнево активні речовини, які додаються в мастильний матеріал, сприяють підвищенню структурної однорідності та збільшенню товщини граничного шару мастила [17-20] Спеціальні антифрикційні покриття, які наносяться на поверхні тертя, запобігають розтіканню мастильного матеріалу із зони контакту, при цьому забезпечується режим гідродинамічного тертя [21-23].

**Постановка завдання.** З урахуванням викладеного, метою дослідження було визначення впливу антифрикційних покриттів на технічний стан підшипників суднових дизелів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Одним із поширених типів антифрикційних покриттів є епілами – полімерні речовини, що містять з'єднання фтору, які наносяться на металеві поверхні. Під час епіламування на поверхні твердого тіла утворюється плівка товщиною до 30 нм, яка не впливає на дислокаційну структуру та твердість металу. Її поверхнева енергія залежить від виду епіламу та не залежить від металу, на який вона наноситься. Основна функція епіламованого шару полягає в утриманні мастильного матеріалу в зоні тертя енергетичним бар'єром на межі «метал – епілам». Це досягається за рахунок збільшення крайових кутів змочування мастила  $\theta$ , яке знаходиться у поверхні металу, покритого шаром епіламу (рис. 1), а також за рахунок переспрямовування вектору дії сили поверхневого натягу мастила.

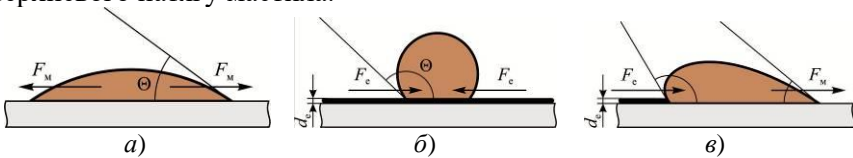


Рис. 1. Крайовий кут змочування та напрямок вектора сили поверхневого натягу рідини:

*a* – мастило на поверхні металу; *б* – мастило на поверхні епіламу;  
*в* – мастило на межі метал – епілам;

$\theta$  – крайовий кут змочування;  $F_m$ ,  $F_e$  – сили поверхневого натягу на металевій поверхні та поверхні, що покрита шаром епіламу, відповідно.

Епіламування сприяє утворенню граничних змащувальних шарів підвищеної (порівняно з поверхнею без нанесеного шару епіламу) товщини. Схема утворення граничних шарів під час нанесення епіламів на металеву поверхню показана на рис. 2.

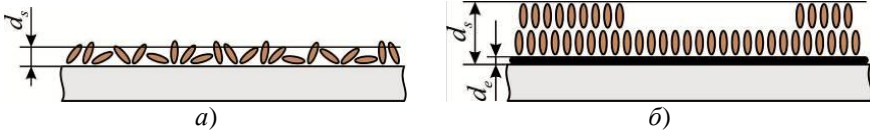


Рис. 2. Зміна товщини граничного шару мастила  $d_s$ :

*a* – без нанесення, *б* – з нанесенням на металеву поверхню шару епіламу

Дослідження з визначення впливу органічних покриттів (епіламів) на технічний стан вкладишів підшипників суднових дизелів виконувалися в такій послідовності:

- розробка технології нанесення епіламу на поверхні вкладишів підшипників ковзання [24, 25];
- визначення товщини нанослою епіламу, адсорбованого на металевій поверхні вкладишів підшипників ковзання [26, 28];
- вивчення впливу нанослою епіламу на утворення граничного шару мастила [29, 30];
- визначення зміни технічного стану вкладишів підшипників у разі нанесення на їхню поверхню нанослою епіламу [31, 32].

Під час проведення експериментів використовувалися такі епілами: Aqualin, Efren-K та Polisam-20, що мають максимальну температуру експлуатації  $450^{\circ}\text{C}$  та допускають короткочасну експлуатацію до температури  $700^{\circ}\text{C}$ . (Надалі у тексті статті епілами довільно позначені як 1, 2, 3.) Технологія нанесення епіламу на поверхню вкладишів підшипників складалася з наступного. Експерименти виконувалися для нового комплексу вкладишів. Спочатку проводилося їхнє знежирення в озонобезпечному хладоні-116 ( $\text{C}_2\text{F}_6$ ) шляхом об'ємного занурення з подальшим висушуванням. Після цього за температурою навколишнього середовища проводилося безпосереднє епіламування шляхом занурення вкладишів у епікам.

Для визначення товщини шару епіламу, який адсорбувався на поверхні вкладиша підшипника, і товщини граничного змащувального шару мастила, що утворюється на поверхні епіламу, проводилися попередні лабораторні дослідження. Як аналог поверхні вкладиша підшипника використовувалася відполірована металева поверхня, яка шляхом об'ємного занурення покривалася шаром епіламу. Час перебування металевої поверхні в об'ємі епіламу варіювався в діапазоні 2...10 хв, після чого поверхня висушувалася за температурою  $20^{\circ}\text{C}$ . Товщина шару епіламу, який адсорбувався на металевій повер-

хні, визначалася на еліпсометричній установці, принципова схема якої показана на рис. 3.

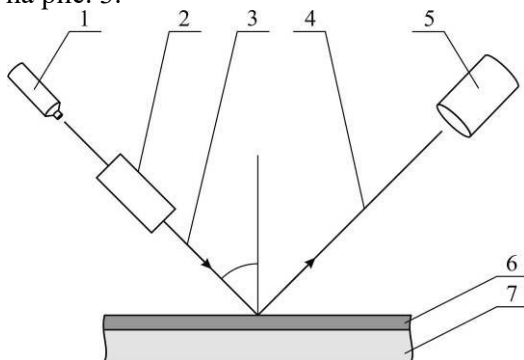


Рис. 3. Принципова схема еліпсометричної установки:

- 1 – джерело світла, 2 – поляризатор; 3 – лінійно поляризоване світло;  
4 – еліптично поляризоване світло; 5 – аналізатор; 6 – шар епіламу;  
7 – металева поверхня

Еліпсометрія є одним із найпоширеніших методів визначення товщини тонких шарів рідин (прозорих для оптичного вивчення) шляхом аналізу кутів відбиття світла від чистої поверхні та від поверхні з нанесеним покриттям.

Зміна технічного стану вкладишів підшипників у разі нанесення на їхні поверхні шару антифрикційного покриття (епіламу) виконувалася для суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo. Ці дизелі є одними з найпоширеніших моделей фірми MAN-Diesel&Turbo і використовуються як на морському [33], так і на залізничному транспорті [34], а також у стаціонарних енергетичних установках (як генератори електростанцій). Два дизелі 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo були встановлені на спеціалізованому морському судні, призначеному для перевезення контейнерів. Дизелі передавали свою потужність через редуктор на один гвинт відповідно до схеми, яка показана на рис. 4.

Дизелі експлуатувалися за однаковим навантаженням, з використанням однакових сортів палива і мастила. Під час експлуатації дизелів поза спеціальними екологічними зонами – Sulfur Emission Control Areas (SECAs) [35] використовувалось паливо RMG380 з вмістом сірки 0,048 %. Під час експлуатації дизелів в SECAs [36] використовувалось паливо DMA з вмістом сірки 0,0076%. Протягом усього часу експерименту використовувалось моторне масло Castrol TLX PLUS 404.

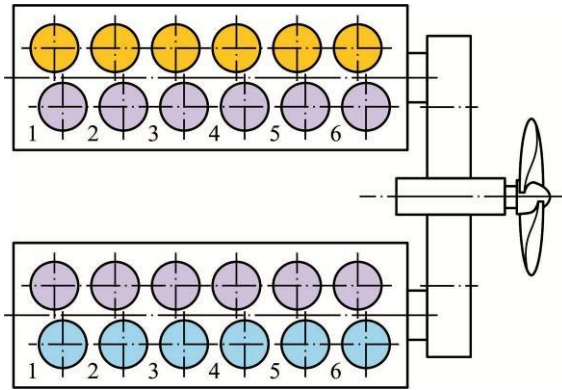


Рис. 4. Схема проведення експерименту на судових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo (жовті та блакитні – такі, вкладиші підшипників яких покривались шаром епіламу; сірі – такі, вкладиші підшипників яких не покривались шаром епіламу)

V-подібна компоновка дизеля дозволила обробити вкладиші підшипників одного з рядів циліндрів дизеля антифрикційним покриттям (епіламом). При цьому вкладиші підшипників іншого ряду циліндрів не оброблялися епіламом. Таким чином, для кожного з дизелів вкладиші підшипників одного ряду циліндрів (жовтий і блакитний на рис. 4) оброблялися епіламом, вкладиші іншого ряду циліндрів (сірі на рис. 4) – не оброблялися.

Дослідження проводилися в науковій лабораторії (перший і другий етапи), а також на дизелях спеціалізованого морського судна (третій етап).

Першим етапом досліджень було визначення оптимального часу нанесення епіламів на металеву поверхню, а також вибір епіламів, які забезпечують формування граничних змащувальних шарів з найбільшою товщиною та кутом змочування. Результати, що були отримані під час вимірів, наведені в табл. 1. Номограма, яка характеризує товщину адсорбованого шару різних епіламів в залежності від тривалості процесу їх нанесення, показана на рис. 5.

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

Тривалість процесу нанесення епіламу на поверхню, $t$ , хв	Товщина шару епіламу, $h$ , нм		
	1	2	3
2	4,8	7,7	9,1
4	9,3	12,3	13,2
6	10,3	16,6	14,7
8	10,7	17,2	14,9
10	11,2	17,4	15,2

Примітка: нумерація епіламів виконана у довільній формі

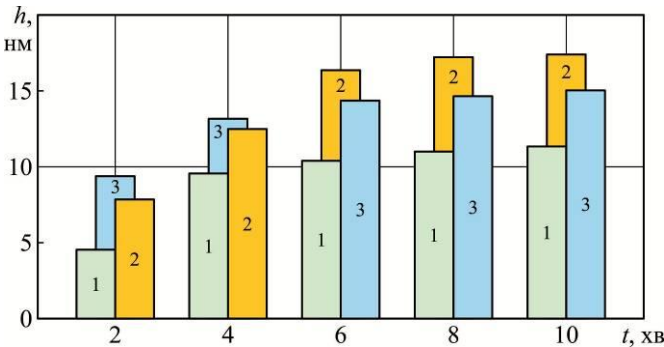


Рис. 5. Залежність товщини органічного покриття (епілами Aqualin, Efren-K, Polisam-20) від тривалості процесу їх нанесення. Нумерація епіламів виконана у довільній формі

Наведені дані (табл. 1 та рис. 5), свідчать, що після 6...10 хв нанесення товщина адсорбційного шару епіламу на металевій поверхні стабілізується та для різних епіламів знаходиться в діапазоні 11,2...17,4 нм.

Метою другого етапу досліджень було визначення впливу епіламів на структурні характеристики граничних змащувальних шарів. Результати цих експериментів наведені в таблиці 2 і на рис. 6. При цьому під позначенням ММ розуміється безпосередня товщина граничного шару моторного мастила  $d_s$ , який утворюється на металевій поверхні, а також значення його кутів змочування  $\theta$ . Під позначенням 1, 2, 3 розуміється товщина граничного шару мастила  $d_s$ , який утворюється на тій самій поверхні за умовою її покриття шаром епіламу, а також значення кутів змочування моторного мастила  $\theta$ .

Таблиця 2. Результати визначення структурних характеристик граничного моторного шару мастила за умовою нанесенні на металеву поверхню шару епіламів Aqualin, Efren-K, Polisam-20

Тип покриття поверхні	Структурна характеристика граничного шару мастила	
	товщина, мкм	крайовий кут змочування, град
Без покриття	12,3	10,2
1	15,2	15,8
2	18,3	17,4
3	17,2	16,3

Примітка: нумерація епіламів виконана в довільній формі

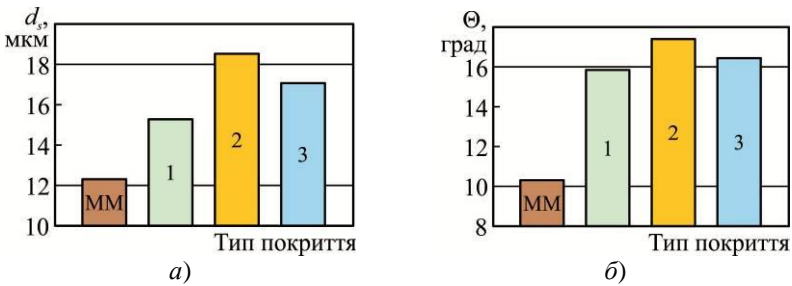


Рис. 6. Зміна товщини  $d_s$  та кута змочування  $\theta$  граничного шару мастила за умовою нанесення на металеву поверхню різних епіламів: MM – відсутність покриття (товщина граничного шару мастила); 1, 2, 3 – покриття різними епіламами

Наведені результати свідчать, що епіламування забезпечує 1,23...1,40 кратне збільшення товщини граничного шару мастила, а також 1,55...1,60 кратне збільшення кутів змочування.

Враховуючи результати першого і другого етапів досліджень (які представлені в таблицях 1, 2 та на рис. 5, 6), третій етап проводився з використанням епіламів 2 і 3. Саме ці епілами забезпечили утворення на металевій поверхні граничних шарів з найбільшою товщиною та кутами змочування.

Даний етап досліджень виконувався на морських дизелях 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo. Вкладиші підшипників одного ряду циліндрів дизеля правого борту були покриті епіламом 2 (жовтий ряд циліндрів на рис. 4). Вкладиші підшипників одного ряду циліндрів дизеля лівого борту були покриті епіламом 3 (синій ряд циліндрів на рис. 4). Кожен з дизелів мав ряд циліндрів, вкладиші яких не були покриті епіламом (сірі ряди циліндрів на рис. 4).

Для визначення впливу антифрикційних покриттів (епіламів) на технічний стан вкладишів підшипників по закінченні регламентного терміну експлуатації підшипникових вузлів проводилась оцінка зносу їх несучих поверхонь. Для цієї мети визначався знос вкладишів підшипників. Враховуючи нерівномірність навантаження на різні циліндри дизеля, технічний стан підшипникових вузлів відрізняється один від одного. Це особливо проявляється у нерівномірному зносі вкладишів підшипників. При цьому вкладиші циліндрів підшипників, що розташовані ближче до споживача енергії (гвинту або електричному генератору), мають більший знос порівняно з вкладишами, що знаходяться далі від споживача енергії.

Під час експериментів знос вкладиша для «кормового» підшипника (циліндра № 6) приймався за 100 %; знос інших вкладишів вимірювався у відносних одиницях до цього значення. Результати розрахунків наведені в таблиці 3 і на рис. 7.

Таблиця 3. Знос вкладишів підшипників суднових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo за різних умов експлуатації

№ циліндра	Знос вкладишів підшипників (відносні одиниці)			
	Дизель № 1 правого борту		Дизель № 2 лівого борту	
	Без покриття поверхні	Покриття епіламом №2	Без покриття поверхні	Покриття епіламом №2
1	73	64	72	68
2	78	66	79	72
5	87	68	92	75
6	100	72	100	77

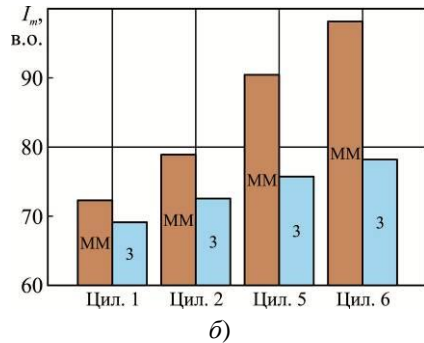
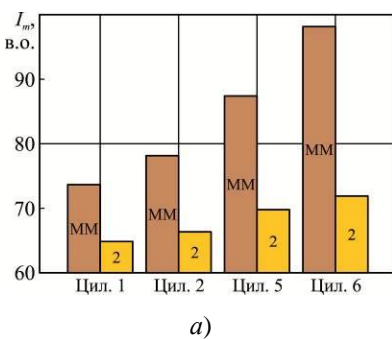


Рис. 7. Зношування вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo за різних умов експлуатації: (а) – дизель правого борту, епілам № 2; (б) – дизель лівого борту, епілам № 3



Підкреслимо, що результати з визначення зносу вкладишів підшипників різних дизелів (лівого і правого борту) у разі нанесення на їх поверхню епіламів 2 і 3, а також за умовою експлуатації вкладишів підшипників без нанесення на їх поверхню антифрикційних покриттів мають подібні значення. Це підтверджує правильність теоретичних припущень та коректність вимірювань.

Метод епіламування, що був використаний для нанесення антифрикційних покриттів на поверхні підшипників ковзання дизелів суднових енергетичних установок, не знайшов широкого розповсюдження в елементах суднових технічних засобів. Це пов'язано, зокрема, з консервативністю суднової енергетики як науки та прагненням екіпажу судна уникнути додаткових ризиків, що виникають під час впровадження інноваційних ідей. Особливо це стосується таких відповідальних вузлів, як суднові дизелі. Однак, за умовою якісних попередніх досліджень та дотримання технології нанесення епіламів на поверхні, можливо забезпечити режими, сприятливі для підвищення їх експлуатаційних характеристик і технічного стану.

Усі дослідження виконувались на енергетичних установках, які мають діючі сертифікати класифікаційних товариств (зокрема, міжнародного реєстру Lloyd's Register of Shipping, Англія; Американського Бюро Судноплавства, ABS, США). Під час проведення експериментів експлуатація суден, дизелів та систем, що забезпечують їх функціонування, виконувалась відповідно до вимог Міжнародної Конвенції SOLAS, Міжнародної Конвенції MARPOL, а також інструкцій з експлуатації [37].

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Проведені дослідження та отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. З метою забезпечення технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів може бути використано метод епіламування їх поверхонь, який сприяє зниженню контактних навантажень.

2. Товщина шару епіламу, що адсорбується на поверхні вкладишів підшипників суднових дизелів, може досягати 11,2...17,4 нм, а час для його адсорбції не перевищує 10 хвилин.

3. Нанослой епіламів, нанесений на металеву поверхню, підвищує структурні характеристики граничного шару мастила. Це виявляється в збільшенні його товщини та кутів змочування – параметрів, що сприяють підвищенню пружно-демпфуючих властивостей мастила та розклинувального тиску в трибологічній системі метал – мас-

тильний шар – метал. У виконаних дослідженнях збільшення цих параметрів становило:

- для товщини граничного шару мастила від 12,3 мкм (в разі експлуатації без нанесення епіламів) до 15,2...18,3 мкм (за умовою використання різних епіламів);

- для кута змочування від 10,2° (в разі експлуатації без нанесення епіламів) до 15,8...17,4 (в разі використання різних епіламів).

4. Підвищення структурних характеристик граничного шару мастила за рахунок епіламування поверхонь вкладишів підшипників значно зменшує їх знос. Для суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo експериментально встановлено, що епіламування забезпечує 1,1...1,4-кратне зменшення зносу поверхні вкладишів підшипників, а також поліпшує їхній технічний стан.

5. Епіламування відноситься до категорії сучасних нанотехнологічних методів. Цей метод вимагає попередніх досліджень для визначення оптимальних видів антифрикційних покриттів (епіламів) та часу їх нанесення на поверхні, але при цьому не викликає додаткових трудовитрат під час його використання, а також підвищується енергоефективність трибологічних систем суднових дизелів та суднових технічних засобів.

### Перелік використаних джерел

1. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. С. 106-120.

2. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. С. 49-54.

3. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 10-14.

4. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. С. 5-16.

5. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířt'ek V., Kuřcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. Vol. 140. 103745.

6. Колегаєв М.О., Бражнік І.Д. Забезпечення процесу вентиляції вантажних трюмів танкерів за допомогою системи інертних газів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. С. 46-53.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. 2021. № 7–8 (July – August). P. 14-17.

11. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 41. С. 5-9.

12. 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.

13. Kuropatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. P. 146-153.

14. 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. С.102-104.

15. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific

Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). P. 195-202.

16. 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.

17. Сагін 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.

18. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // *Проблемы техники: наук.-виобрн. журнал*. 2012 . № 4. Одесса: ОНМУ. С. 68-81.

19. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. 2022. Vol.69. Iss.1. P. 53-61.

20. 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.

21. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 20-25.

22. 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.

23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // *Автоматизація судових технічних засобів: наук. -техн. зб.* 2021. Вип. 27. С. 108-119.

24. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. 2024. Вип. 1(39). . 215-225.

25. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судов-

вых дизелей // Проблемы техники: науч.-виробн. журнал. 2012. № 3. С. 84-103.

26. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник, 2018. Вып. 24. С. 72-80.

27. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). P. 203-211.

28. 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”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. P. 139-145.

29. 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 January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. P. 154-160.

30. 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. С. 79-89.

31. 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 (July – August). P. 36-43.

32. 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.

33. Сагин А.С., Сагин С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215.

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. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. 2011. № 3. Одесса: ОНМУ. С. 78-88.

36. 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.

37. Сагін С.С., Сагін С.С. 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.