

10.31653/smf46.2023. 118-131

Сагін С.В., Сагін А.С.

Національний університет «Одеська морська академія»

## **КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОСТІ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКИХ ТА РІЧКОВИХ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Енергетичні комплекси суден морського та внутрішнього водного транспорту є складовими багатопараметричними системами, функціонування яких забезпечується зовнішніми зв'язками між окремими об'єктами (наприклад, дизель, системи його постачання паливом, мастилом, водою та повітрям, системи контролю робочого процесу та технічного стану) та внутрішніми зв'язками, що розповсюджуються безпосередньо в самому об'єкті (наприклад, якість очищення палива або мастила та технічний стан паливної апаратури високого тиску або дзеркала циліндрової втулки та вкладишів підшипників) [1, 2].

Основною тенденцією в розвитку суднових дизелів (як основного енергетичного компонента суден морського та внутрішнього водного транспорту) є підвищення їх циліндрової та агрегатної потужності, а також економічних показників, що багато в чому залежить від якості моторних мастил, які забезпечують процеси мащення. Раціональне використання моторних мастил передбачає в першу чергу їх обґрунтований вибір з урахуванням конструктивних особливостей дизеля, режимів його експлуатації та характеристик палива, а також забезпечення режимів мащення, що сприяють зниженню механічних втрат в парах тертя та зменшенню витрати мастила на вигар та заміну. Правильно та обґрунтовано вибраний сорт моторного мастила, кваліфікаційне обслуговування систем мащення, догляд за технічним станом деталей та елементів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) в значній мірі сприяють підтриманню їх експлуатаційних показників, а також являються одним з методів контролю та діагностування їх надійності, довговічності та економічності [3-5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ДВЗ (головні та допоміжні) морських та річкових засобів транспорту є порівняно невеликими споживачами мастильних матеріалів в загальному обсязі світового транспортно-енергетичного комплексу [6, 7]. При цьому слід підкреслити, що моторні мастила (ММ), які використовуються в суднових ДВЗ, найбільшою мірою (в порівнянні з двигунами інших видів транспорту – авіаційного, автомобільного, залізничного) лево-

вані присадками та характеризуються збільшеним запасом якості за своїми первісними властивостям. Середній вміст присадок в суднових мастилах в кілька разів перевищує цей показник щодо ММ, які використовуються в інших напрямках енергетики [8, 9]. Це пов'язано в першу чергу зі специфікою експлуатації суднових енергетичних установок, а саме: високими температурними та механічними напруженнями в зонах контакту; передільним зменшенням зазору між парами тертя; неминучістю попадання в обсяг ММ палива, води, газів та механічних домішок; роботою при різних параметрах довілля. Все це зумовлює виключно високий рівень вимог до функціональних властивостей мастил [10, 11].

У комплекс заходів, які сприяють підвищенню експлуатаційної надійності суднових дизелів з одночасним підвищенням їх економічності, входять підтримання, поновлення та ефективна регенерація експлуатаційних характеристик ММ.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка комплексу науково-технічних рішень, які б скорочували експлуатаційні витрати ММ в суднових середньооберткових дизелях та підвищували надійність і ресурсні показники ММ під час використання важких високо в'язких палив в двигунах внутрішнього згоряння морських та річкових засобів транспорту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Системи мащення відносяться до основних систем, що забезпечують надійність роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Це система забезпечує мащення багатьох вузлів дизеля (колінчатого та розподільного валів, газотурбонагнетача, циліндрової втулки та поршневих кілець, мотильового, рамового та головного підшипників), а також відведення теплоти від трибосполучення поршневі кільця – втулка циліндра [12, 13].

Процеси мащення відіграють першорядну роль під час експлуатації та забезпечення безвідмовності суднових дизелів. Навіть короткочасне відсутність мастильного матеріалу між поверхнями тертя або відхилення в негативний бік процесу мащення від розрахункового та тому очікуваного або передбачуваного режиму мащення може привести до виникнення аварійних ситуацій та зниженню надійності роботи суднової енергетичної установки. Особа небезпека таких ситуацій виявляється під час знаходження суден в районах інтенсивного судноплавства, вузькостях та акваторіях морських та річкових портів [3, 14, 15].

Якість процесу мащення суднових дизелів оцінюється за різними показниками, насамперед:

за аналізом моторного мастила, що взято з підпоршневого простору (лише для двотактних дизелів) або з картеру дизеля (як правило для чотиритактних);

за показниками робочого циклу (перш за все за величиною тиску наприкінці процесу стиснення та за значенням температури випускних газів);

за механічними втратами, що виникають під час перетворення індикаторної роботи робочого циклу в ефективну потужність.

Однієї з особливостей чотиритактних дизелів є те, що вони характеризуються загальною системою мащення, в якій ММ забезпечує мащення та охолодження циліндрової групи та підшипників руху. Для чотиритактних дизелів одним з розповсюджених зі способів оцінки їх безвідмовності є аналіз ММ, яке взяте з картера дизеля. При цьому до основних показників, за якими здійснюється цей аналіз, є загальне лужне число (Total Base Number – TBN) та вміст в ММ механічних домішок. Зміна цих показників в негативний бік, а саме зниження TBN та підвищення кількості механічних домішок, що потрапляють в ММ, свідчить про погіршення процесу мащення. Наслідком цього стає зменшення гідравлічної щільності в парах тертя вал-вкладиш підшипника та поршневе кільце-втулка циліндра, що, в свою чергу, призводить до витоків повітряної суміші з циліндру та зниження тиску наприкінці процесу стиснення. Ця величина є однієї з тих, що контролюється під час роботи суднових дизелів, її зниження негативно впливає на подальше samozapalювання палива та екологічність експлуатації морського судна [16]. При цьому можливі випадки виникнення пропусків спалаху палива з циліндрах, де тиск та температура повітря наприкінці стиснення не забезпечують надійне samozapalювання палива. Одночасні з цим навантаження на інші циліндри стрибкоподібно збільшується, зростає нерівномірність обертання колінчатого валу та динамічна невірноваженість дизеля. Перелічені фактори призводять до виникнення критичних, надкритичних та аварійних режимів роботи дизеля, що стає причиною зниження його надійності.

Дослідження проводилися на суднових допоміжних двигунах Volvo Penta TMDA 163A, які в кількості двох входили до складу допоміжної енергетичної установки спеціалізованого морського судна

класу Heavy Lift дедвейтом 10850 тонн. Принципова схема системи циркуляційного мащення надана на рис. 1.

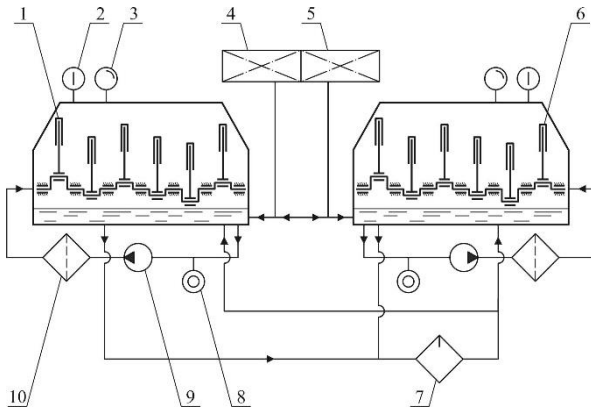


Рис. 1. Принципова схема системи циркуляційного мащення суднових дизелів Volvo Penta TMDA 163A:

- 1 – дизель № 1; 2 – термометр; 3 – манометр; 4, 5 – витратні цистерни циркуляційного мастила; 6 – дизель № 2; 7 – мастильний сепаратор; 8 – витратомір; 9 – циркуляційний насос; 10 – мастильний фільтр

Мащення підшипникових вузлів колінчатого валу та циліндрової групи дизелів №1 1 та №2 6 забезпечувалось моторним мастилом Castrol Vection 15W40 або Shell Rimula R4X 15W40, які знаходились в витратних цистернах циркуляційного мастила 4 та 5. Обидва мастила рекомендовані до використання в системі циркуляційного мащення дизелів Volvo Penta TMDA 163A. Кожен з дизелів був обладнаний автономною системою мащення, що дозволяло використовувати в них різні моторні мастила (для одного – Castrol Vection 15W40, для другого – Shell Rimula R4X 15W40). З цистерн 4 та 5 мастило самопливом потрапляло до картеру дизелів. Через перемикання клапанів (які на схемі не показані для її спрощення) робота будь-якого з дизелів могла здійснюватися з використання будь-якого мастила. З картеру дизеля мастило циркуляційним насосом 9 спрямовувалось до колінчатого валу та далі потрапляло до його підшипників. Продуктивність насоса визначалась через кількість мастила, що пройшло через витратомір 8. Мащення циліндрової групи забезпечувалось шляхом випаровування та розбризкування моторного мастила з картеру дизеля. Очищення моторного мастила

виконувалось через його фільтрацію в мастильному фільтрі 10, а також через його сепарацію в мастильному сепаратору 7. Робота сепаратора 7 забезпечувалась окремо для кожного з дизелів, це попереджувало змішування мастила, яке знаходилося в системах мащення дизелів. Контроль показників роботи дизеля виконувався з використанням термометру 2 та манометру 3. Потужність дизелів визначалась ватметром, встановленим в центральному посту управління.

Основні характеристики моторних мастил Castrol Vection 15W40 та Shell Rimula R4X 15W40, які використовувалися в системі циркуляційного мащення суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A, наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Основні характеристики моторних мастил

Параметр	Castrol Vection 15W40	Shell Rimula R4X 15W40
Клас SAE	15	15
Густина при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	924	926
Кінематична в'язкість при 40°С, сСт	98	97
Кінематична в'язкість при 100°С, сСт	15,3	15,1
Температура спалаху, °С	218	215
Total Base Number, мгКОН/г	12,3	12,4

Дизелі до початку експерименту мали сумірний період експлуатації, однаковий технічний стан основних контактних вузлів (колінчатого валу, вкладишів підшипників, паливної апаратури) та експлуатувалися на однакових навантаженнях (з неузгодженістю не більше  $\pm 2,5\%$ ). Це дозволяло зробити висновок про їхню ідентичність один одному як перед початком експерименту, так і під час його проведення.

Показниками, за якими здійснювався контроль технічного стану та оцінка безвідмовності дизелів, були обрані:

загальне лужне число (ТВN) моторного мастила, яке (відповідно до даних таблиці 1) для на початок проведення експерименту було однаковим для обох мастил;

тиск в циліндрі наприкінці процесу стиснення;

температура випускних газів;

питома витрата палива.

Вимірювання TBN моторних мастил виконувалось за допомогою суднової лабораторії DIGI Used Oil TBN Analysis Kit. Результати вимірювань наведені в табл. 2. Далі, під час надання результатів дослідження, моторні мастила довільно визначені як ММ № 1 та ММ № 2.

Таблиця 2. Зміна загального лужного числа моторних мастил під час проведення експерименту

Час, $t$ , год	ММ № 1		ММ № 2	
	TBN, мгКОН/г	$V_{\text{TBN}}$ , (мгКОН/г)/год	TBN, мгКОН/г	$V_{\text{TBN}}$ , (мгКОН/г)/год
1	12,3	–	12,4	–
200	12,2	0,10	12,1	0,17
400	11,8	0,12	11,6	0,20
600	11,3	0,20	10,9	0,22
800	10,8	0,205	10,6	0,26
1000	10,5	0,20	10,2	0,26

Як показник, що характеризує динаміку зміни TBN моторного мастила за певний проміжок часу, доцільно визначати швидкість зменшення його загального лужного числа, яка розраховується за виразом

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

де  $\text{TBN}_n$ ,  $\text{TBN}_{n-1}$ ,  $t_n$ ,  $t_{n-1}$  – поточне та попереднє значення відповідних показників, співмножник 100 введено з метою кращої візуалізації значень швидкості зменшення TBN в зв'язку з їх невеликим абсолютним значеннями.

За результатами, що надані в табл. 2, побудовані діаграми, які відображають зміну TBN та  $V_{\text{TBN}}$  за часом (рис. 2).

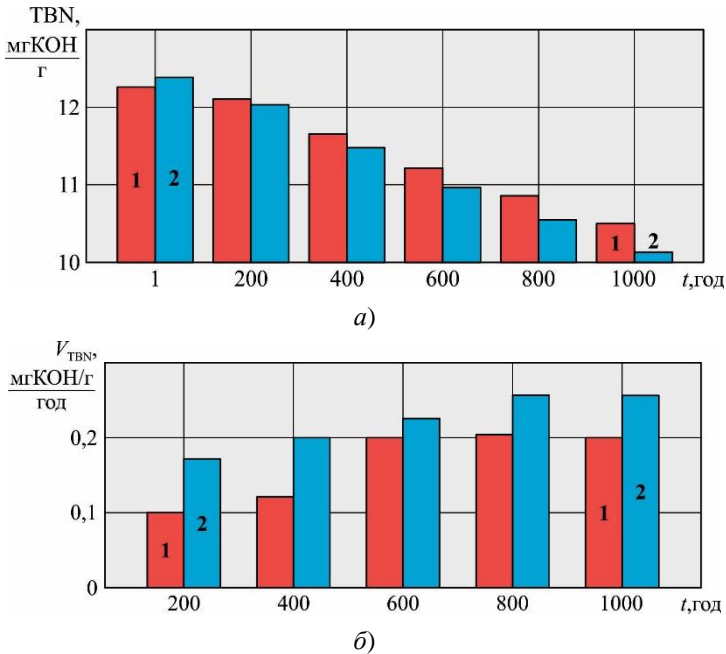


Рис. 2. Зміна характеристик моторного мастила під час експлуатації суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A: 1 – ММ № 1; 2 – ММ № 2; а – TBN; б –  $V_{\text{TBN}}$

Ще одним з показників, за допомогою якого можливо виконувати оцінку безвідмовності роботи суднових дизелів, є тиск наприкінці стиснення. Його зниження в окремих циліндрах дизеля свідчить про погіршення компресійних властивостей поршневіх кілець, попадання металевих домішок на поверхню втулки циліндра та збільшення їх зносу. Зниження тиску стиснення по всіх циліндрах свідчить про погіршення процесу мащення та зниження рівня безвідмовності роботи дизеля. Під час експерименту значення тиску стиснення визначалося за допомогою суднової системи діагностики Dostor для кожного з циліндрів дизеля (за умови відключення подачі палива в даний циліндр). За отриманими значеннями розраховувалося середнє значення тиску стиснення по всіх циліндрах дизеля. Контроль тиску стиснення виконувався після 1-ї години роботи дизелів і далі через кожні 100 годин роботи. На тимчасових проміжках, у яких виконувалася контроль тиску стискування (1, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 годин), дизелі працювали на різних, але однакових між

собою навантаженнях (в діапазоні 120...280 кВт). Система діагностики Doctor дозволяє контролювати параметри робочого процесу дизеля з похибкою  $\pm 1,0\%$ . Отримані значення під час використання різних моторних мастил наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Зміна тиску стиснення суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних мастил

Час, години	Тиск стиснення, МПа	
	ММ № 1	ММ № 2
1	9,18	9,18
200	9,15	9,11
400	9,07	9,02
600	8,93	8,83
800	8,92	8,71
1000	8,91	8,69

*Примітка:* відповідно до інструкції з експлуатації номінальне значення тиску наприкінці процесу стиснення складає  $p_{\text{сном}}=9,2$  МПа.

Для кращої візуалізації результати, що надані в табл. 3, узагальнені як номограма, що показана на рис. 3.

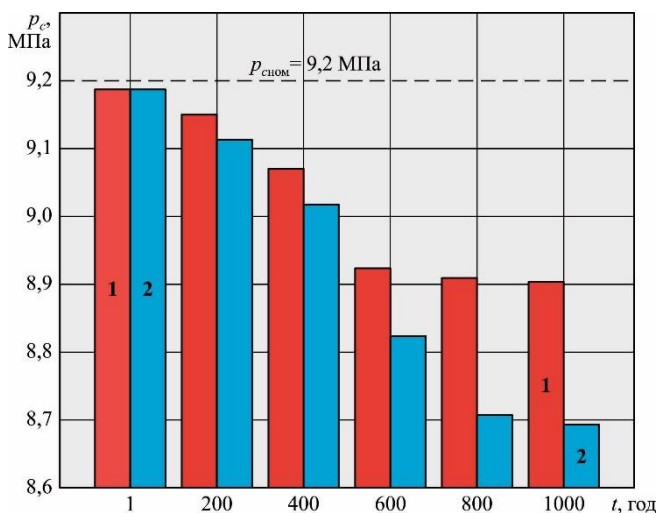


Рис. 3. Зміна тиску стиснення  $p_c$  суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних мастил



Одним із параметрів роботи дизеля, що характеризує якість робочого процесу, є температура газів після циліндра  $t_r$ . Збільшення її значення за окремими циліндрами дизеля свідчить про погіршення процесу згоряння палива в циліндрі дизеля (у разі пізнього впорскування) або про підвищену кількість мастила, яка потрапляє на стінки циліндра та згоряє разом з паливом. Контроль температури газів після циліндра дизеля Volvo Penta TMDA 163A проводився за допомогою системи діагностики Doctor, що виконує вимірювання температури та виведення показань на комп'ютер центрального поста управління. Аналогічно вимірювання тиску наприкінці стиснення, вимірювання температури випускних газів проводилися в інтервалі 1...1000 годин роботи дизелів, при цьому дизелі експлуатувалися на різних, але рівних між собою навантаженнях. Протягом усього періоду проведення експерименту підтримувалися однаковими параметри в системах охолодження та змащування дизелів (температура мастила на вході в дизель, температура води на виході з дизеля, тиск мастила та води на вході в дизель). Значення температури газів після циліндра визначалися кожного циліндра дизеля, після чого ці значення усереднювалися. У табл. 4 наведено середні значення  $t_r$  для всіх циліндрів. Додатково відзначимо, що під час експерименту відхилення значення температури випускних газів за окремими циліндрами від середнього значення за всіх циліндрів не перевищувало  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

Таблиця 4. Зміна температури випускних газів суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних мастил

Час, години	Температура випускних газів, $^\circ\text{C}$	
	ММ № 1	ММ № 2
1	323	323
200	322	326
400	321	327
600	298	307
800	327	334
1000	321	332

*Примітка:* відповідно до інструкції з експлуатації максимальне значення температури випускних газів  $t_{r\text{max}}=335^\circ\text{C}$ .

Для кращої візуалізації результати, що надані в табл. 4, узагальнені як номограма, що показана на рис. 4.

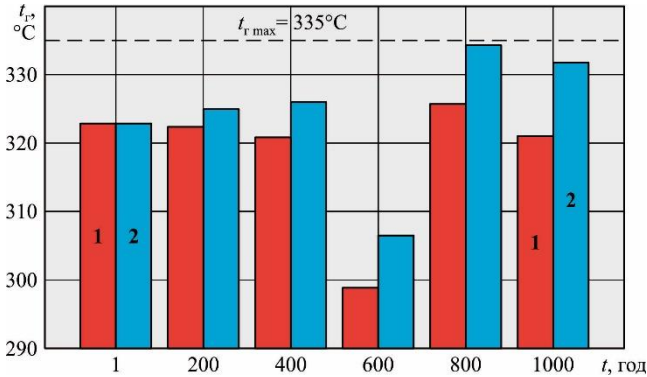


Рис. 4. Зміна температури випускних газів  $t_g$  суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних мастил

Економічність роботи дизелів оцінювалась за величиною питомої витрати палива  $b_e$ , кг/(кВт·год), її значення розраховувались за величиною витрати палива, часу, на протязі якого проводились експериментальні дослідження, та потужності дизеля за час проведення експерименту (в інтервалах 1...200 годин, 200...400 годин та далі до 800...1000 годин). Отримані значення наведені в табл. 5 та узагальнені як діаграми на рис. 5.

Таблиця 5. Зміна питомої витрати палива суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних мастил

Час, години	Питома витрата палива, кг/(кВт·год)	
	ММ № 1	ММ № 2
1	213	214
200	216	219
400	211	217
600	204	211
800	213	222
1000	214	224

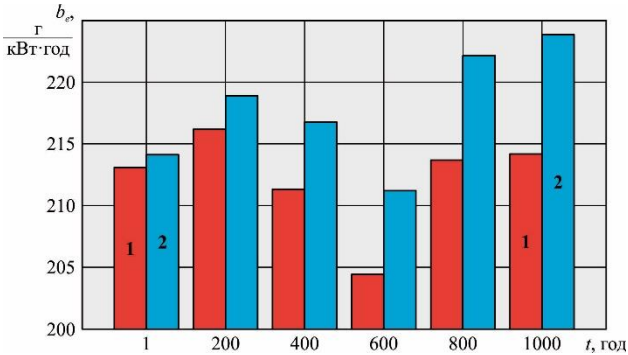


Рис. 5. Зміна питомої витрати палива  $b_e$  суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A під час використання різних моторних мастил

**Висновки.** Як результат виконаних досліджень зробимо наступні висновки.

1. Безвідмовність роботи дизелів морських суден може бути оцінена технічним станом моторного мастила, що використовується в циркуляційній системі мащення.

2. Основними експлуатаційними показниками моторного мастила, які визначають та забезпечують безвідмовність роботи суднових дизелів є загальне лужне число та швидкість його зменшення, а також вміст в моторному мастилі механічних домішок, що характеризують знос деталей дизеля та забруднення мастила.

3. Моторні мастила, що характеризуються меншою швидкістю зменшення загального лужного числа забезпечують більш якісне мащення суднових дизелів, що відображається в підвищенні гідравлічної щільності та змащувальної здатності мастила. Підтвердженням цього (під час порівняння моторного мастила швидкість падіння загального лужного числа якого менш з іншим мастилом) стає більш повільне зниження тиску наприкінці процесу стиснення (що характеризує менший знос в парах тертя дизеля) та зменшення температури випускних газів (що характеризує більшу гідравлічну щільність в сполученні поршневе кільце – втулка циліндру).

4. Під час інтенсивного зменшення загального лужного числа моторного мастила погіршується його технічний стан, що виявляється в збільшенні механічних домішок (які є результатом його окислення або зносу деталей дизеля), що потрапляють до його об'єму. З часом

це зменшує змащувальну здатність моторного мастила та знижує надійність роботи дизелів.

5. Особливу актуальність наведені результати мають для чотиритактних дизелів, мащення яких забезпечується загальною циркуляційною системою, в якій підшипники колінчатого валу та елементи циліндрової групи змащуються одним і тим же мастилом.

6. Наведені результати свідчать про можливість діагностування безвідмовності роботи суднових дизелів через технічний стан моторного мастила, яке використовується в його системі циркуляційного мащення.

### *ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ*

1. 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. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.

2. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 12-16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

3. 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.

4. Богом'я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.

5. Голяков В.А., Голяков В.В., Онищенко О.А. Використання технологій методології науки у дослідженнях морського та внутрішнього водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.

6. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньооборотних дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

7. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

8. Столярик Т.О. Вдосконалення процесів мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 57-69. doi: 10.31653/smf45.2022.57-69.

9. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse1010137>.

10. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 - 119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

11. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. Technology Audit and Production Reserves. – 2022. № 5(1(67)). – С. 22–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>

12. Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.

13. Столярик Т.О. Забезпечення режимів мащення чотиритактних суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 90 – 105. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105.

14. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. 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>.

15. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

16. 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>.