

УДК 629.5

ARTICLE HISTORY

Received 20.02.2023

Accepted 27.02.2023

Столярик Тимур Олександрович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
tymir@gmail.com

Забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів

Stoliaryk Tymur
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
tymir@gmail.com

Ensuring the lubrication regimes of four-stroke marine diesel engines

Резюме – Наведені результати досліджень, щодо забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів. Випробування виконувались на дизелях 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo, які в кількості трьох одиниць входили до складу допоміжної енергетичної установки судна класу Bulk Carrier дедвейтом 37620 т. Умови роботи моторного мастила, що використовувалось в циркуляційній системі мащення двох дизелів змінювались шляхом нанесення на поверхні вкладишів підшипників органічних покриттів та додавання до обсягу мастила поверхнево-активної речовини. Експериментально доведено, що при цьому підвищується енергетичні показники роботи дизеля та знижується швидкість окислення мастила.

Abstract – The results of research on ensuring the lubrication regimes of marine four-stroke diesel engines are presented. The tests were performed on 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo diesel engines, which in the amount of three units were part of the auxiliary power plant of the Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 37,620 tons. The operating conditions of the engine lubricant used in the circulating lubrication system of two diesel engines were changed by applying organic coatings to the surface of the bearing liners and adding a surface-active substance to the volume of the lubricant. It has been experimentally proven that this increases the energy performance of the diesel engine and decreases the rate of oxidation of the motor oil.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105

Світові дизелебудівні концерни (MaK-Caterpillar, MAN-Diesel&Turbo, Mitsubishi Heavy Industries, Wartsila-Sulzer та ін.) та компанії (Cummins, Daihatsu, Hyundai, Matsui, Yanmar та ін), виробляють та постачають на судна велику кількість двигунів, що працюють за двотактним або чотиритактним циклом. Робочий цикл в циліндрі дизелів забезпечується завдяки подачі палива та повітря та відведення випускних газів [1, 2]. Теплові режими в деталях дизеля підтримуються за допомогою прісної та забортної води, а також мастила, яке одночасно виконує дві функції – охолодження та мащення [3, 4].

Пари тертя суднових дизелів (за винятком паливної апаратури високого тиску) проєктуються за умовою забезпечення гідродинамічного режиму мащення. При цьому змінні навантаження, що діють на шар мастила під час поступального руху поршня, хитливого руху шатуна та обертового руху колінчастого валу, зменшують зазор в відповідних парах тертя, що викликає короткочасні, тривали, а іноді постійні режими граничного тертя [5, 6]. В порівнянні з режимами гідродинамічного мащення ці режими характеризуються зменшенням розклинюючого тиску та гідравлічної щільності в проміжку пар тертя, що забезпечує мастило. Саме за цих умов виявляється перевага рідкокристалічних властивостей мастила орієнтаційної впорядкованості та структурованості його молекул, товщини впорядкованого граничного шару, крайових кутів мащення, і характеристик, які присутні лише у вуглеводних рідин [7, 8].

Рідкокристалічні властивості мастила виявляються лише біля твердої поверхні, з якою воно контактує [9, 10]. Під час віддалення молекул мастила від поверхні рівень їх структурованості стрибкоподібно спадає [11, 12]. Моторні мастила, що використовуються в суднових дизелях, характеризуються більшим ступенем структурованості в порівнянні з мастилами, що використовуються в медичній, харчовій та хімічній промисловості. Товщина впорядкованого граничного шару моторних мастил досягає 10 ... 12 мкм, це обумовлює підвищення в'язкості мастила в граничному шарі, сприяє підвищенню його пружно-демпфуючих властивостей та може використовуватися під час експлуатації суднових дизелів як спосіб, що забезпечує перебіг процесу граничного тертя / граничного мащення без безпосереднього контакту поверхонь [13, 14].

Суднові чотиритактні дизелі, які можуть передавати потужність гребному гвинту та в такому випадку виконувати функції головного двигуна, або забезпечувати обертовий рух ротора електрогенератора,

будучи при цьому допоміжними, характеризуються поєднаною системою мащення. При цьому деталі циліндрової групи (трибосполучення поршневі кільця – втулка циліндра) та колінчастого валу (трибосполучення вал – вкладиш рамового чи мотильового підшипника) змащуються одним та тем же моторним мастилом, яке піддається впливу теплових та механічних навантажень. З часом це погіршує його експлуатаційні характеристики – в'язкість, загальне лужне число, температуру спалаху, а також призводить до поступового збільшення в ньому продуктів зносу та забруднення. Одночасно з цим зменшується гідравлічна щільність, яку забезпечує мастило між парами тертя, режими мащення змінюються з гідродинамічного на змішаний та граничний, збільшуються механічні втрати під час отримання корисної роботи. Саме за цих умов актуальним стає завдання активації рідкокристалічних властивостей моторного мастила та використання його структурних характеристик. Підвищення структурних характеристик моторного мастила (насамперед товщини граничного впорядкованого шару молекул) досягається шляхом додавання до мастила поверхнево-активних речовин (ПАР) та нанесення на поверхні тертя наночарів органічних покриттів, зміцненням поверхонь окремими хімічними елементами, використанням електромагнітного випромінювання та ін. [15, 16].

Дослідження з визначення впливу структурних характеристик моторного мастила на експлуатаційні показники суднових дизелів виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 37620 т. Як допоміжні двигуни на судні використовувались чотиритактні дизелі 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo з номінальною потужністю 960 кВт та частотою обертання колінчастого валу 900 хв^{-1} . Спрощена схема системи циркуляційного мащення дизеля наведена на рис. 1.

Забезпечення режимів мащення виконувалось в такій спосіб. Кожний з дизелів (№ 1 – позиція 1, № 2 – позиція 2, № 3 – позиція 4 на рис. 1) мав окремий циркуляційний насос 7, який з картера дизеля через фільтр 8 спрямовував мастило до колінчастого валу. Продуктивність циркуляційного насосу визначалась за допомогою витратоміру 6. Далі мастило скрізь свердлення в валу та шатуну потрапляло до рамового, мотильового та головного підшипників. Це забезпечувало мащення підшипникових вузлів дизеля. Мащення циліндрової групи забезпечувалось через розбризкування та аеродиспергування мастила з картера дизеля. Сепарація мастила здійснювалась за допомогою відцентрового сепаратора 5 окремо для кожного з дизелів. Окрема циркуляція та сепарація мастила запобігала його змішуванню між системами мащення дизелів. Це сприяло коректному проведенню

експериментів та підвищувало рівень оцінки технічного стану мастила для кожного дизеля. В системі циркуляційного мащення дизеля № 1 встановлювався дозуючий пристрій 10. За його допомогою до потоку мастила додавалась ПАР, до складу якої входили розчинені соли міді та олеат калію. Кількість ПАР регулювалась мікроконтролером 9 з урахуванням обсягу мастила, що вимірювався витратоміром. Оптимальна концентрація ПАР в мастилі була встановлена під час попередніх досліджень. Під час її визначення переважним вважалась здатність ПАР сприяти утворенню біля поверхні граничних шарів з більшою товщиною на більшому ступені орієнтаційної впорядкованості.

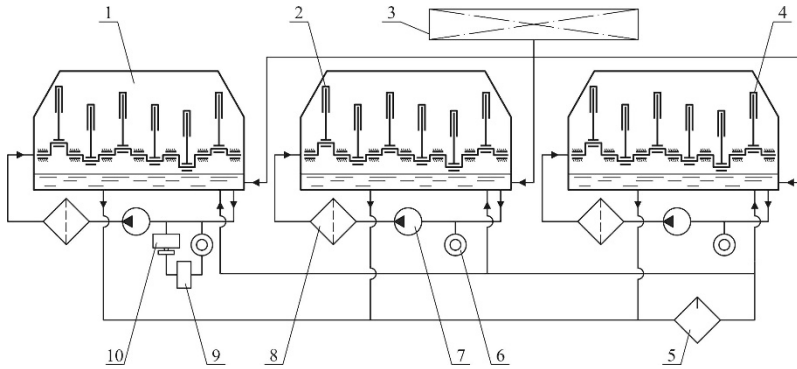


Рис. 1. Система циркуляційного мащення суднових дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo (фрагмент):

- 1 – дизель № 1; 2 – дизель № 2; 3 – витратна цистерна системи циркуляційного мащення; 4 – дизель № 3; 5 – сепаратор; 6 – витратомір; 7 – циркуляційний насос; 8 – фільтр; 9 – мікроконтролер; 10 – дозуючий пристрій

Експлуатація суднових дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo здійснювалась з використанням суднових моторних палив RMA10 (під час знаходження судна в зонах спеціального екологічного контролю емісії оксидів сірки – SECAs, в яких вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,1 % за масою), а також VLSFO та RMG380 (під час експлуатації судна поза зонами SECAs, в яких дозволяється використовувати палива зі вмістом сірки до 0,5 % за масою). Основні характеристики моторних палив RMA10, VLSFO та RMG380 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики моторних палив

Характеристика	RMA10	VLSFO	RMG380
Густина за 15 °С, кг/м ³	922	949	991
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	7,2	215	380
Температура спалаху, °С	65	70	76
Вміст сірки, %	0,08	0,44	0,5
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	42210	41860	41600

В циркуляційній системі мащення використовувалось моторне мастило Mobilgard320, яке відноситься до середньолужного класу та рекомендовано концерном MAN-Diesel&Turbo як мастило для суднових форсованих середньооберткових дизелів експлуатація яких тривалий час здійснюється на важких паливах зі вмістом сірки до 0,5 % за масою. Основні характеристики моторного мастила Mobilgard320 наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Основні характеристики моторного мастила Mobilgard320

Характеристика	Значення
Густина за 15 °С, кг/м ³	863
В'язкість за 40 °С, мм ² /с	142
В'язкість за 100 °С, мм ² /с	14,6
Температура спалаху, °С	>200
Загальне лужне число (TBN), мгКОН/г	17,45

З метою визначення впливу структурних параметрів моторного мастила Mobilgard320 на експлуатаційні характеристики суднового дизеля 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo визначались його наступні показники: температура випускних газів $t_{вг}$, механічний коефіцієнт корисної дії (ККД) η_m , тиск наприкінці стиснення p_c . Крім вказаних показників контролювались також всі інші, що необхідні під час технічного обслуговування та діагностування дизеля [17, 18]. В випадку, коли відхилення контрольованого показника перевищувало встановлені інструкцією з експлуатації значення, виконувалось його автоматичне регулювання шляхом нанесення регулюючої дії [19, 20].

Температура випускних газів приймалась як критерій теплової напруженості дизеля. Її збільшення вважалось показником погіршення

технічного стану поршневих кілець та виникнення за цими обставинами зайвого закиду мастила на дзеркало циліндрової втулки.

Тиск наприкінці стиснення приймався як критерій технічного стану поршневих кілець та як показник, що характеризує гідравлічну щільність в трибосполученні поршневі кільця – втулка циліндра. Зменшення тиску наприкінці стиснення (у одного дизеля в порівнянні з іншим, що працює на такому ж навантаженні) свідчило за погіршення пружнодемпфуючих характеристик мастила та виникнення контактів між поршневими кільцями та втулкою.

Механічний ККД приймався як критерій, що характеризує втрати енергії під час отримання корисної роботи. Його визначення виконувалось методом постійної витрати палива, за умовою спалювання на всіх навантаженнях дизеля одного та того ж обсягу палива, якій обирався рівним $0,01 \text{ м}^3$.

Вимірювання всіх показників, що характеризують роботу дизеля, забезпечувалось системою контролю та діагностики Doctor [21, 22].

Основною характеристикою моторного мастила, зміна якої контролювалась під час випробувань та у подальшому використовувалась як критерій його стану, було загальне лужне число – TBN. Ця величина в певні проміжки часу визначалась за допомогою судової діагностичної лабораторії фірми Unitor. Під час випробувань також контролювались інші показники моторного мастила – вміст води та механічних домішок, густина та в'язкість. Компенсація витрати мастила на вигар здійснювалась шляхом додавання мастила з витратної цистерни системи циркуляційного мащення (позиція 3 на рис. 1) до картеру дизеля із розрахунку $100 \text{ літрів} / 100 \text{ годин}$ роботи.

На початок та під час проведення досліджень дизелі мали однаковий технічний стан елементів та обладнання, що входить до їх систем: паливної, мащення, повітряпостачання та випуску газів, а також співпадаючий час попередньої роботи. Також однаковими підтримувались значення тиску та температури робочих речовин (мастила та води) в системах мащення та охолодження. Під час випробувань дизелі експлуатувались однаковий час на однаковому навантаженні, це контролювалось як за умови паралельної роботи дизелів (двох або трьох), також і за умови поодинокій роботи дизелів [23, 24].

Визначення вказаних показників виконувалось кожні 100 годин роботи дизелів. При цьому значення навантаження на дизель під час фіксації показників відрізнялось від навантаження аналогічного циклу вимірювань, що виконувався в інший часовий проміжок. Але

навантаження на різні дизелі в однаковий проміжок дослідження були однаковими.

Як показник, що характеризує структурні параметри моторного мастила, обиралась товщина впорядкованого граничного шару мастила d_s , який утворюється біля металевої поверхні. Його визначення виконувалось в науково-дослідній лабораторії за допомогою оптичного методу подвійного променезаломлювання [25, 26].

Зміна структурних характеристик моторного мастила забезпечувалась шляхом використання ПАР та нанесенням тонкого шару (20 ... 50 нм) органічних покриттів на поверхні тертя. ПАР додавалась до мастила на протязі всього часу проведення експерименту. Органічні покриття наносились на поверхні вкладишів підшипників колінчатого валу під час їх заміни. ПАР додавалась в циркуляційну систему лише одного з дизелів (позиція 1 на рис. 1), нанесення органічних покриттів виконувалось для вкладишів підшипників двох дизелів (позиції 1, 2 на рис. 1). На одному з дизелів (позиція 3 на рис. 1), ніяких із вказаних змін не виконувалось.

Як критерії забезпечення процесу мащення, через абсолютні значення контрольованих параметрів (t_{br} , η_m , p_c) визначались їх відносні відхилення:

збільшення тиску наприкінці стиснення

$$\Delta p_c = \frac{p_c^{\max} - p_c^{\min}}{p_c^{\min}} \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

збільшення механічного ККД

$$\Delta \eta_m = \frac{\eta_m^{\max} - \eta_m^{\min}}{\eta_m^{\min}} \cdot 100 \% ; \quad (2)$$

зменшення температури випускних газів

$$\Delta t_{br} = \frac{t_{br}^{\max} - t_{br}^{\min}}{t_{br}^{\min}} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

де p_c^{\max} , p_c^{\min} , η_m^{\max} , η_m^{\min} , t_{br}^{\max} , t_{br}^{\min} – максимальне та мінімальне значення показників дизелів в певний проміжок часу.

З метою оцінки динаміки зміни TBN мастила за виразом

$$V_{TBN} = \frac{TBN_i - TBN_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \cdot 100 \quad (4)$$

визначалась швидкість його зміни, в якому позначення TBN_i , TBN_{i-1} , t_i , t_{i-1} відповідають поточному та попередньому значенням відповідних показників. Розмірність V_{TBN} – (мгКОН/г)/год, співмножник 100

введено з метою кращої візуалізації значень швидкості зміни TBN в зв'язку з їх невеликим абсолютним значенням.

Результати досліджень, а також розрахунків за виразами (1) ... (4) наведені в табл. 3, 4. При цьому під 1, 2, 3 прийнято: додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття, експлуатація без будь яких змін.

За результатами, що наведені в табл. 3, 4 побудовані номограми, що відображають зміну контрольованих показників за різних умов експлуатації циркуляційної системи мащення дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo (рис. 2, 3).

Дослідження, що виконувалися в науково-дослідницькій лабораторії, дозволили встановити зміну товщини впорядкованого граничного шару молекул моторного мастила Mobilgard320 за різний час та різних умов експлуатації суднового дизеля 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo (рис. 4).

Зіставлення результатів, що наведені на рис. 4, а також в табл. 2, 3 та на рис. 2, 3 свідчить, що під час експлуатації моторного мастила, яке має більш виражені структурні параметри (більшу товщину впорядкованого граничного шару мастила) забезпечуються на більш високому рівні енергетичні та теплотехнічні показники роботи дизеля, а також підтримуються експлуатаційні характеристики мастила.

Під час досліджень не було зафіксовано жодних критичних відхилень показників роботи дизеля [27, 28]. Фіксація та збереження результатів випробувань виконувалось за допомогою спеціального програмного забезпеченням з управління активами на морських судах [29, 30].

Результати, що отримані під час досліджень, дозволяють зробити наступні висновки.

Моторні мастила, що використовуються в циркуляційній системі мащення суднових чотиритактних дизелів, піддаються впливу високих температур (під час мащення деталей циліндрової групи) та високих тисків (під час мащення підшипників колінчатого валу). З часом це погіршує експлуатаційні характеристики моторного мастила при цьому:

підвищується окислення мастила, що підтверджується зниженням загального лужного числа TBN);

знижується гідравлічна щільність моторного мастила в парах тертя поршневі кільця – втулка циліндра та вал – вкладиш підшипника, що призводить до зменшення тиску наприкінці процесу стиснення;

погіршуються пружнодемпфуючі властивості мастила, що супроводжується підвищенням температури випускних газів дизеля через закид зайвого мастила на дзеркало циліндрової втулки.

Таблиця 3

Результати досліджень

Час, год	Навантаження, %	Загальне лужне число, ТВН, мгКОН/г			Температура газів, $t_{\text{вг}}$, °С			Механічний ККД, $\eta_{\text{м}}$, %			Тиск стиснення, p_c , МПа		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	70,0	17,45	17,45	17,45	282	283	283	88,2	88,2	88,1	9,6	9,6	9,55
200	75,0	17,3	17,2	16,9	285	287	291	88,9	88,8	88,5	9,75	9,7	9,6
400	65,0	17	16,8	16,2	272	274	278	87,3	87,1	86,5	9,45	9,35	9,15
600	60,0	16,9	16,5	15,5	263	263	271	85,9	85,6	84,6	9,15	9	8,75
800	80,0	16,8	16,3	14,8	293	296	306	89,3	89,1	88,3	9,8	9,7	9,55
1000	50,0	16,7	16,1	14,2	248	250	259	84,8	84,5	82,7	8,9	8,65	8,3

Таблиця 4

Результати розрахунку відносних відхилень параметрів

Час, год	Навантаження, %	Швидкість зміни ТВН, $I_{\text{ТВН}}$			Відносне зменшення $t_{\text{вг}}$, $\Delta t_{\text{вг}}$, %			Відносне збільшення $\eta_{\text{м}}$, $\Delta \eta_{\text{м}}$, %			Відносне збільшення p_c , Δp_c , %		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
200	75,0	0,15	0,25	0,55	2,11	1,39	0,46	0,34	1,56	1,04			
400	65,0	0,3	0,4	0,7	2,21	1,46	0,92	0,69	3,28	2,19			
600	60,0	0,1	0,3	0,7	3,04	3,04	1,53	1,18	4,57	2,86			
800	80,0	0,1	0,2	0,7	4,44	3,38	1,13	0,91	2,62	1,57			
1000	50,0	0,1	0,2	0,6	4,44	3,6	2,54	2,18	7,23	4,22			

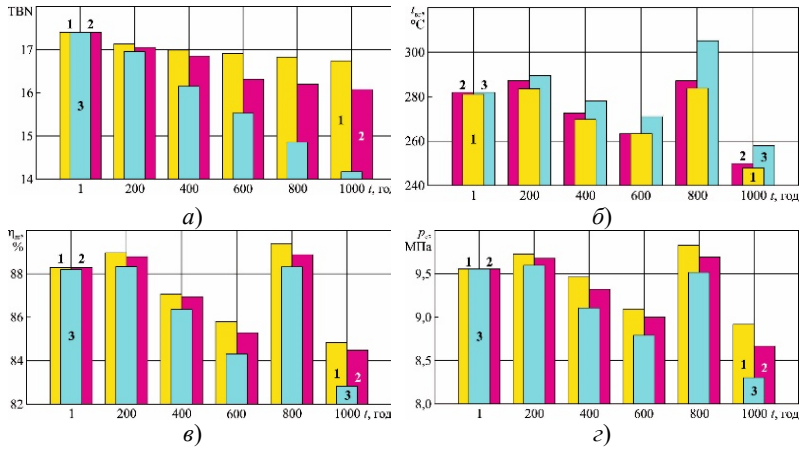


Рис. 2. Зміна контрольованих показників за різних умов експлуатації циркуляційної системи мащення дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo: *а* – загальне лужне число; *б* – температура випускних газів; *в* – механічний ККД; *г* – тиск наприкінці стиснення; 1 – додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 2 – нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 3 – експлуатація без будь яких змін

Як спосіб, що сприяє тривалому підтриманню експлуатаційних характеристик моторного мастила та забезпеченню режимів мащення суднових чотиритактних дизелів, доцільно виконувати активацію його рідкокристалічних властивостей. Найбільш доцільним та зручним варіантом для суднових чотиритактних дизелів є використання поверхнево-активних речовин та нанесення додаткових наночарів спеціальних органічних покриттів на поверхні тертя. При цьому товщина впорядкованого граничного шару моторного мастила збільшується зі значень 6,8 ... 10,7 мкм до значень 12,4 ... 13,7 мкм (для різних часових інтервалів відбору проб). Це (для різних режимів навантаження дизеля та різного часу його експлуатації) забезпечує:

зниження швидкості окислення моторного мастила зі значень 0,55 ... 0,7 (мгКОН/г)/год у випадку звичайної експлуатації циркуляційної системи мащення до 0,2 ... 0,4 (мгКОН/г)/год у випадку нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття та до 0,1 ... 0,3 (мгКОН/г)/год у випадку додавання до обсягу

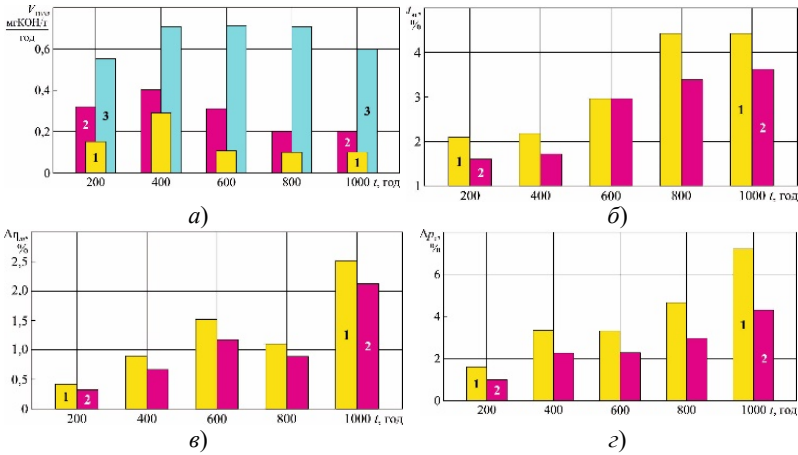


Рис. 3. Критерії забезпечення процесу мащення: *а* – швидкість зміни ТВН; *б* – зменшення температури випускних газів; *в* – збільшення механічного ККД; *г* – збільшення тиску наприкінці стиснення; 1 – додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 2 – нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 3 – експлуатація без будь яких змін

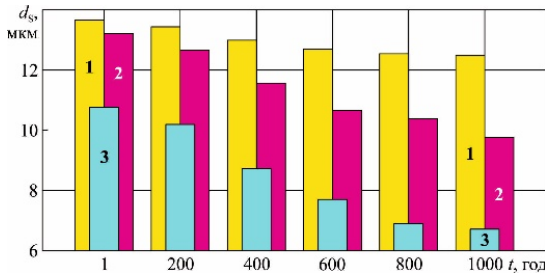


Рис. 4. Зміна товщини впорядкованого граничного шару молекул моторного мастила Mobilgard320 за різний час та різних умов експлуатації судового дизеля 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo: 1 – додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 2 – нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 3 – експлуатація без будь яких змін

мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття;

зниження на 1,4 ... 4,4 % температури випускних газів;

збільшення на 0,34 ... 2,54 % механічного ККД дизеля;

збільшення на 1,04 ... 7,23 % тиску наприкінці стиснення.

Наведені технології сприяють зниженню енергетичних втрат під час отримання корисної роботи та підвищують надійність роботи судових чотиритактних дизелів.

Активация рідкокристалічних властивостей моторного мастила може бути виконана судовим екіпажем за умовою попереднього визначення оптимальної концентрації ПАР та забезпечення послідовності технологічної схеми її виконання.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 26.

2. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Работа судового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вып. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 – 107.

3. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15(3). – P. 115 – 121.

4. 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”, Beijing. – 2019. – Part 1. – P. 139 – 145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

5. Сагин С.В. Исследование корреляционной взаимосвязи жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 33. – Одесса: ОНМА. – С. 67 – 76.

6. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – Одесса: ОНМА. – С. 74 – 83.

7. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132 - 142.

8. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 66 – 74.

9. 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.

10. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum. Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67 – 71.

11. 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.

12. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. морск. ун-ту: зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 – 100.

13. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 20 – 25.

14. Мацкевич Д. В., Сагин С. В., Ханмамедов С. А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109 – 118.

15. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84 – 103.

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. – P. 29 – 35.

17. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 – 9.

18. 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.

19. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 – 34.

20. 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. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 72 – 80.

21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331.

22. 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.

23. Горб С.И., Будуров Н.И. Оптимизация автоматического регулирования частоты вращения судового дизеля // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 21.

24. Сагин С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 108 – 119.

25. Сагин С. В., Заблоцкий Ю. В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виборн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса: ОНМУ. – С. 68 – 81.

26. 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. – Одесса: ОНМА. – С.116 – 125.

27. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 – 71.

28. 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. – 2021. – № 7-8. – P. 36 – 43.

29. Горб С.И. Мониторинг энергоэффективности судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 48 – 53.

30. Горб С.И., Горб А.С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ «ОМА». С. 34 – 48.

Анотація – Наведені результати досліджень, щодо забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів. Випробування виконувались на дизелях 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo, які в кількості трьох одиниць входили до складу допоміжної енергетичної установки судна класу Bulk Carrier дедвейтом 37620 т. В циркуляційній системі мащення дизелів використовувалось моторне мастило Mobilgard320, що відноситься до мастил середньолужного класу. Умови роботи моторного мастила для двох дизелів змінювались шляхом активації його рідкокристалічних властивостей. Це забезпечувалось нанесенням на поверхні вкладишів підшипників одного з них органічних покриттів та нанесенням на поверхні вкладишів підшипників органічних покриттів та постійним додаванням до обсягу мастила поверхнево-активної речовини – для іншого. Експериментально доведено, що при цьому товщина впорядкованого граничного шару моторного мастила збільшується зі значень 6,8 ... 10,7 мкм до значень 12,4 ... 13,7 мкм (для різних часових інтервалів відбору проб). Це (в діапазоні навантаження на дизель 50 ... 80 % та часового інтервалу його експлуатації 100 ... 1000 годин) в порівнянні з дизелем, експлуатація якого здійснювалась без змін умов роботи моторного мастила, забезпечує: зниження швидкості окислення моторного мастила зі значень 0,55 ... 0,7 (мгКОН/г)/год у випадку звичайної експлуатації циркуляційної системи мащення до 0,2 ... 0,4 (мгКОН/г)/год у випадку нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття та до 0,1 ... 0,3 (мгКОН/г)/год у випадку додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; зниження на 1,4 ... 4,4 % температури випускних газів; збільшення на 0,34 ... 2,54 % механічного ККД дизеля; збільшення на 1,04 ... 7,23 % тиску наприкінці стиснення. Наведені технології сприяють зниженню енергетичних втрат під час отримання корисної

роботи та підвищують надійність роботи суднових чотиритактних дизелів. Активація рідкокристалічних властивостей моторного мастила може бути виконана судновим екіпажем за умови попереднього визначення оптимальної концентрації поверхнево-активної речовини та забезпечення послідовності технологічної схеми її виконання.

Annotation – The results of research on ensuring the lubrication regimes of marine four-stroke diesel engines are presented. The tests were performed on 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo diesel engines, which in the amount of three units were part of the auxiliary power plant of the Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 37,620 tons. Mobilgard320 motor oil, which belongs to the medium-alkaline class, was used in the circulation system of diesel engines. The operating conditions of the engine lubricant for two diesel engines were changed by activating its liquid-crystalline properties. This was ensured by the application of organic coatings on the surface of the bearing liners of one of them and the application of organic coatings on the surface of the bearing liners and the constant addition of a surface-active substance to the volume of lubricant – for the other. It has been experimentally proven that the thickness of the ordered boundary layer of motor oil increases from values of 6.8 ... 10.7 μm to values of 12.4 ... 13.7 μm (for different time intervals of sampling). This (within the diesel load range of 50 ... 80 % and the time interval of its operation of 100 ... 1000 hours) in comparison with a diesel whose operation was carried out without changes in the operating conditions of the motor lubricant, provides: reduction of the rate of oxidation of engine oil from values of 0.55 ... 0.7 (mgKOH/g)/h in the case of normal operation of the circulating lubrication system to 0.2 ... 0.4 (mgKOH/g)/h in the case of application on the surface of the bearing liners of the organic coating layer and up to 0.1 ... 0.3 (mgKOH/g)/h in the case of adding a surfactant to the volume of lubricant and applying an organic coating layer on the surface of the bearing liners; a decrease of 1.4 ... 4.4 % in the temperature of exhaust gases; an increase of 0.34 ... 2.54 % in the mechanical efficiency of a diesel engine; increase by 1.04 ... 7.23 % of pressure at the end of compression. These technologies contribute to the reduction of energy losses during obtaining useful work and increase the reliability of the work of marine four-stroke diesel engines. Activation of the liquid crystal properties of the motor lubricant can be performed by the ship's crew, provided that the optimal concentration of the surface-active substance has been previously determined and the sequence of the technological scheme of its implementation has been ensured