

10.31653/smf46.2023. 132-141

Столярик Т.О.

Національний університет «Одеська морська академія»

ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ СИСТЕМ ЦИЛІНДРОВОГО МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Енергетичні комплекси суден морського та внутрішнього водного транспорту є багатокomпонентними структурними об'єктами, при цьому:

їх функціонування починається з прийому на борт судна робочих рідин (палива, мастила, води);

їх основним експлуатаційним завданням є перетворення потенційної енергії робочих рідин на корисну роботу, що забезпечує або рух судна, або вироблення теплової та електричної енергії;

завершальним етапом їх виробничого циклу є видалення відпрацьованих газів та охолоджуючих рідин у довкілля [1].

При цьому необхідно забезпечувати не тільки вимоги щодо одержання ефективної потужності та підтримки екологічних параметрів, але також мінімальний рівень неминучих втрат під час перетворенні вхідної енергії на корисну роботу [2, 3].

Аналіз основних досліджень і публікацій. Потенційна енергія палива, що згоряє в циліндрі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), за допомогою кривошипно-шатунного механізму (КШМ) перетворюється на кінетичну енергію обертання колінчатого валу дизеля. Під час поступального руху поршня в циліндрі дизеля виникають неминучі втрати в трибологічній системі втулка циліндра – мастильний матеріал – поршневі кільця [4, 5]. Передача поступального руху поршня в обертальний рух колінчатого валу та пов'язаного з ним споживача енергії (гвинта, коли дизель виконує функції головного двигуна, або електричного генератора, якщо дизель виконує функції допоміжного двигуна) неможлива без використання підшипників ковзання (мотилевих та рамових), а також підшипників валопроводу (упорних та опорних). Саме в КШМ та вказаних підшипниках виникають основні втрати енергії, які відносять до категорії неминучих витрат під час отримання корисної роботи [6, 7]. Втрати енергії під час передачі корисної (індикаторної) потужності до споживача лежать можуть становити 6...10 % – у разі експлуатації суднових ДВЗ на номінальному режимі, і до 100 % – під час експлуатації на холостому ході. Мінімізації цих втрат та забезпечення мінімальних зна-

чень протягом тривалого часу є актуальним завданням, на вирішення якого спрямовані наукові дослідження, які проводять як дизелебудівні корпорації, так і окремі науково-виробничі фірми та інститути [8].

Суднові ДВЗ є найпоширенішими типами теплових машин, що перетворюють потенційну енергію рідкого палива на механічну роботу та передають її на рушій. Майже 100 % суден морського та внутрішнього водного транспорту використовують суднові дизелі як головні двигуни. Зростаючі потреби у перевезення вантажів морськими шляхами сприяють будівництву суден підвищеного тоннажу, на яких як головні двигуни встановлюють малообертові двотактні двигуни, що передають свою корисну потужність на гвинт фіксованого кроку [9].

Найхарактернішим вузлом ДВЗ, у якому відбувається поступальний рух, є циліндрова група, саме – пара тертя поршневе кільце – циліндрова втулка. При правильному центруванні деталей КШМ (поршня в крейцькопфному підшипнику або поршня та шатуна) між поршнем і втулкою циліндра забезпечується мінімальний зазор, який повністю компенсується за рахунок ущільнювальної дії поршневих кілець. При цьому забезпечується відсутність повітряних і газових протікань в об'ємі циліндра, тому кінетична енергія газів, що утворилися в циліндрі під час згоряння палива, повністю використовується для поступального переміщення поршня. У разі підвищеного зносу поршневих кілець або їх поломки відбувається зростання мінімально неминучих втрат енергії та зниження ефективних показників роботи дизеля (потужності та коефіцієнта корисної дії) [10].

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення критерію, за яким можливо діагностування втрат механічної енергії, що виникає в кривошипно-шатунному механізмі дизеля, мащення якого забезпечується системою лубрикаторного мастила.

Виклад основного матеріалу дослідження. Забезпечення процесу енергоперетворення з мінімально допустимими незворотними втратами під час поступального руху у вузлах тертя судових ДВЗ можливе за рахунок керування реологічними характеристиками (в'язкістю та реологічною стійкістю) та якісними показниками (ступенем упорядкованості молекул, товщиною мастильного шару, крайовими кутами змочування) мастила, що поділяє контактуючі поверхні [1, 4, 11].

Експерименти, що підтвердили цей вислів, виконувались на судновому дизелі 8K80ME-MAN-Diesel & Turbo. Подача мастила на дзеркало циліндрової втулки дизеля та подальше мащення втулки циліндра та поршневих кілець забезпечується лубрикаторною (циліндровою) системою мащення, в якій використовуються мастила з лужним числом (Total Base Number – TBN) 30...80 мг КОН/г (де КОН – вміст лугу в мастилі). Принципова схема системи циркуляційного мащення дизеля наведена на рис. 1.

В даний час експлуатація морських суден (а, отже, та їх енергетичних установок) відбувається як у звичайних, так і в особливих районах, до останніх належать зони контролю емісії викидів оксидів сірки (SO_x Emission Control Areas) та азоту (NO_x Emission Control Areas) [12]. Це накладає певні обмеження як на паливо, що використовується в цих районах, так і на циліндрове мастило, лужний показник якого повинен відповідати вмісту сірки в паливі. Відповідно до вимог Додатка VI MARPOL 73/78 під час експлуатації суднових дизелів повинно використовуватися паливо, вміст сірки в якому не перевищує 0,5 % за масою. У спеціальних екологічних районах (SO_x Emission Control Areas) вміст сірки у паливі має не перевищувати 0,1 % за масою. При цьому комплектація суднових систем лубрикаторного (циліндрового) мащення проводиться таким чином, щоб забезпечити можливість використання мастила з різним лужним показником (наприклад, з TBN30, який відповідає вмісту сірки в паливі до 0,1 %) та з TBN50, який відповідає вмісту сірки у паливі до 0,5 %). Саме за таким принципом скомплектовано систему лубрикаторного (циліндрового) мащення дизеля 8K80ME-MAN-Diesel & Turbo (рис. 1).

Система працює в такий спосіб. З цистерн запасу циліндрового мастила 3 або 4 мастило (в яких знаходиться мастило з різними експлуатаційними характеристиками) через фільтри 2 або 5 спрямовується до витратних цистерн лубрикаторного мастила 1 або 6. Мастило до циліндрової втулки дизеля 8 подається лубрикатором 7. В схемі передбачена можливість експлуатація дизеля 8 з використанням різних сортів лубрикаторного мастила, а також можливість експлуатації різних груп циліндрів (циліндрів 1-4 та 5-8) на різних сортах мастила. До однієї з груп циліндрів подавалось мастило Castrol CL 30 с TBN 30, до іншої – мастило Castrol CL 50 с TBN 50.

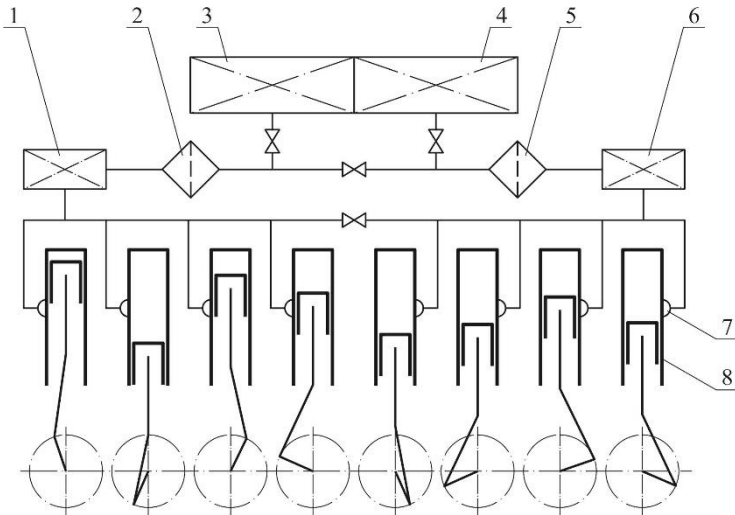


Рис 1. Схема лубрикаторної (циліндрової) системи мащення суднового дизеля 8K80ME-MAN-Diesel & Turbo:

1, 6 – витратна цистерна лубрикаторного мастила; 2, 5 – мастильний фільтр;
3, 4 – цистерна запасу мастила; 6 – лубрикатор; 8 – дизель

Наявність двох цистерн лубрикаторного мастила (позиції 3 і 4) давало можливість використання різних груп циліндрів мастильного матеріалу з різними характеристиками. При цьому якісною характеристикою лубрикаторного мастила приймалося значення крайового кута змочування, який утворює мастило на металевій поверхні. Його визначення виконувалося оптичними методами у береговій науководослідній лабораторії [13-15]. Таким чином, різні групи циліндрів (в циліндри 1-4 та 5-8) подавалося мастило з різними значеннями крайових кутів змочування. При цьому було встановлено, що одне з мастил (далі позначено як мастило № 1) характеризується меншими крайовими кутами змочування ніж інше (далі позначено як мастило № 2).

Експерименти виконувались під час океанського переходу судна тривалістю 12...15 днів. Постійність навантаження на дизель визначалася незмінною частотою обертання колінчастого валу та постійною цикловою подачею палива. Протягом усього експерименту судновий дизель 8K80ME MAN-Diesel & Turbo працював на одному сорті палива RМК350 (з вмістом сірки 0,32 %). Відбір проб мастила та їх подальший аналіз виконувався в судновій технічній лабораторії

фірми Unitor через кожні 20 годин роботи дизеля відповідно до рекомендованих фірмою-виробником технології та послідовності [16]. При цьому для кожного циліндра дизеля встановлювалося своє значення подачі циліндрового мастила. Відхилення її величини за різними циліндрами не перевищувало 5 % від середнього значення. З підпоршневого простору кожного циліндра виконувався відбір проб відпрацьованого мастила з подальшим визначенням у судновій технічній лабораторії вмісту в мастилі металевих домішок, Fe, ppm, та залишкового лужного числа, BN, мгКОН/г.

За вмістом металевих домішок Fe, ppm, у мастилі, що відпрацьовувало, можна оцінити рівень мінімально неминучих втрат енергії під час поступального руху в парі тертя поршневе кільце – циліндрова втулка. Чим вище значення Fe у відпрацьованому мастилі, тим більше знос цієї пари тертя, а отже більше як контактні взаємодії, так і мінімально неминучі втрати енергії.

Значення залишкового лужного числа BN, мгКОН/г, характеризує (зокрема) гідравлічну щільність трибологічної системи поршневе кільце – мастильний шар – циліндрова втулка. Чим вище цей показник, тим менша частина газів, що утворюються в циліндрі під час згоряння палива, проходить по дзеркалу втулки циліндрової через можливі нещільності між поршневими кільцями та циліндровою втулкою. Таким чином, у циліндрі разом з паливом згоряє менша частина мастила, що знаходиться лише над верхнім / верхніми поршневими кільцями.

Результати виконаних досліджень наведено в таблиці 1 та на рис. 2.

Таблиця 1. Результати експерименту

Показник	Час експлуатації, години					
	40	80	12	16	20	24
			0	0	0	0
Вміст металевих домішок у відпрацьованому мастилі, Fe, ppm*	$\frac{63}{42}$	$\frac{53}{40}$	$\frac{57}{33}$	$\frac{48}{36}$	$\frac{52}{28}$	$\frac{55}{27}$
Залишкове лужне число, BN, мгКОН/г мастила*	$\frac{31}{43}$	$\frac{33}{47}$	$\frac{31}{44}$	$\frac{32}{48}$	$\frac{34}{46}$	$\frac{36}{47}$

* – у чисельнику під час роботи з використанням мастила № 1; у знаменнику – мастила № 2.

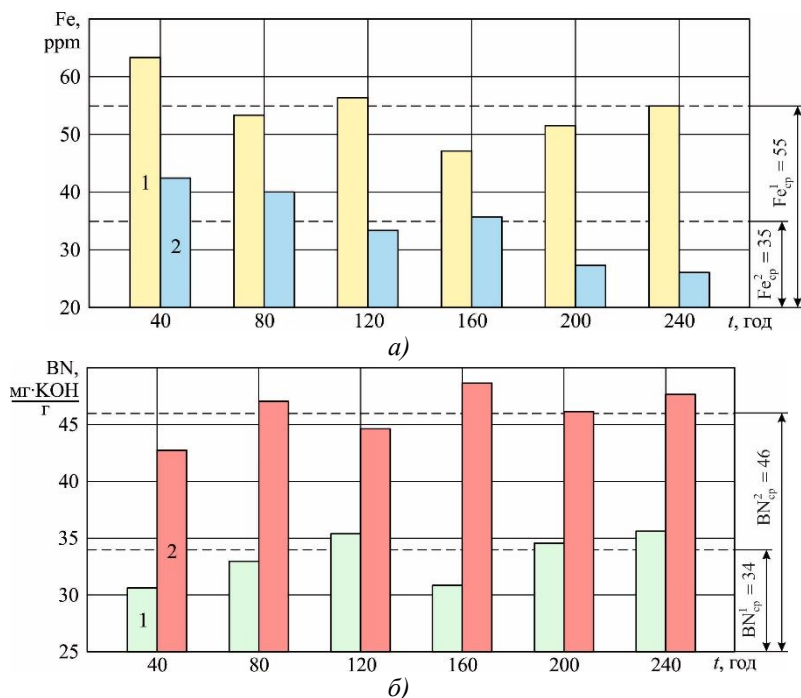


Рис. 2. Зміна вмісту металевих домішок (а) та залишкового лужного числа (б) у відпрацьованому мастилі під час експлуатації суднового дизеля 8K80ME MAN-Diesel & Turbo з використанням різних циліндрових мастил : 1 – циліндрове мастило № 1; 2 – циліндрове мастило № 2

З метою підтвердження стабільності отриманих результатів дослідження були продовжені в діапазоні часу 200...1000 годин. Їх результати наведені в таблиці 2 та відображені на рис. 3

Таблиця 2. Результати експерименту

Показник	Час експлуатації, години				
	200	400	600	800	1000
Вміст металевих домішок у відпрацьованому мастилі, Fe, ppm*	52	53	48	52	49
	28	29	26	29	28
Залишкове лужне число, BN, мгKOH/г мастила*	46	47	44	43	44
	34	33	32	31	33

* – у чисельнику під час роботи з використанням мастила № 1; у знаменнику – мастила № 2.

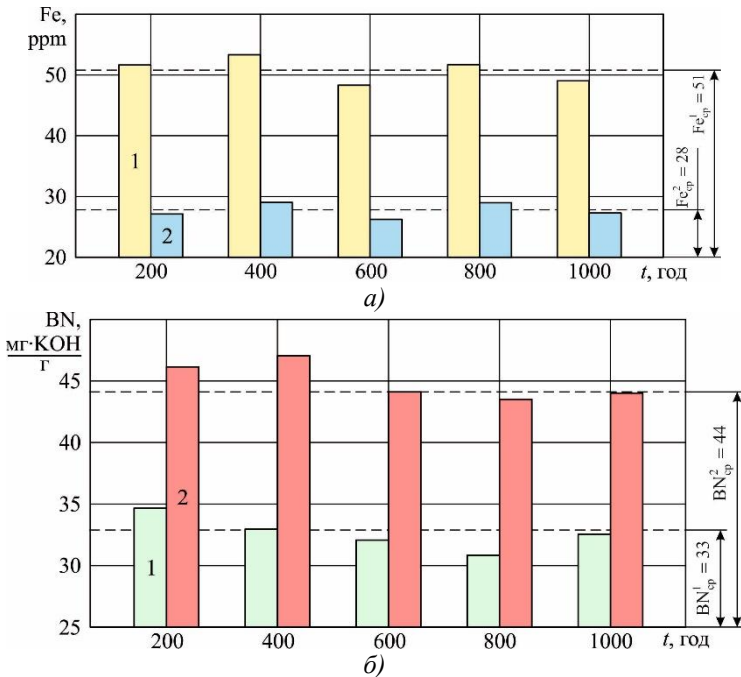


Рис. 3. Зміна вмісту металевих домішок (а) та залишкового лужного числа (б) у відпрацьованому мастилі під час експлуатації суднового дизеля 8K80ME MAN-Diesel & Turbo з використанням різних циліндрових мастил :

1 – циліндрове мастило № 1; 2 – циліндрове мастило № 2

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати проведених досліджень дозволяють зробити такі висновки.

1. Мінімально неминучі втрати енергії, що виникають при зворотно-поступальному русі у вузлах тертя судових двигунів внутрішнього згоряння (зокрема при переміщенні поршня в циліндрі), можуть бути оцінені за характеристиками відпрацьованого мастила, взятого з його підпоршневого простору (для дизелів, що працюють циклу). При цьому як критерій доцільно використовувати вміст металевих домішок у відпрацьованому мастилі та його залишкове лужне число. Збільшення вмісту механічних домішок свідчить про підвищення рівня контактних взаємодій у парі тертя поршневі кільця – втулка циліндра та зростання мінімально неминучих втрат енергії. Значення залишкового лужного числа мастила, що використовується для змащування циліндропоршневої групи дизеля, може характеризувати гідравлічну щільність трибологічної системи поршневе кільце

– мастильний шар – циліндрова втулка. При цьому великим значенням залишкового лужного числа мастила відповідає більша гідравлічна щільність і менші значення мінімально неминучих втрат енергії.

2. Мастила, що використовуються в системах циліндричного змащування двотактних дизелів, утворюють на контактних поверхнях мастильний шар, який характеризується якісними показниками – крайовим кутом змочування.

3. Експериментально підтверджено, що використання лубрикаторного мастила, яке характеризується великим кутом змочування, сприяє зниженню вмісту металевих домішок у відпрацьованому циліндровому дизелі мастил і підвищенню його залишкового лужного числа.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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 Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

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

3. 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.

4. Богач В.М., Довіденко Ю.М., Дуранов О.П. Особливості роботи лубрикаторних систем суднових довгоходових двигунів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 53 - 63. 10.31653/smf44.2022. 53-63.

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

6. 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>.

7. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2022. – Vol. 5(1(67)). – P. 22-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.

8. 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.

9. Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в суднових дизелях // *Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб.* – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.

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

11. Столярик Т.О. Вдосконалення процесів мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 57-69. DOI : 10.31653/smf45.2022. 57-69.

12. 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: НУ «ОМА». – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

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

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

15. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // *Судовые энергетические установки : сборник научных статей.* – Одесса : ОНМА, 2010. – Вип. 26. – С. 116-125.

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