УДК 656.07:338
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/26>

Дакі О.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Урум Н.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Рященко О.І.

Державний університет інфраструктури та технологій

Бабере О.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОСЕРНИСТИХ ПАЛИВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Міжнародна морська організація (ІМО) на світовому рівні ввела регулюючий режим, що обмежує вміст сірки в морському паливі. Найбільшу увагу в останні роки було звернено на основний міжнародний інструмент, що регламентує викиди в атмосферу із суден – на Додаток VI Міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78. Водночас значно посилилися вимоги щодо обмеження шкідливих викидів із суден, зокрема й окислів сірки (SOx), насамперед у призначених районах контролю викидів SECA (SOx Emission control areas). Викиди цих оксидів забруднюють повітряне середовище, негативно впливають на здоров'я людей, спричиняють ризик виникнення серцево-легеневих захворювань, хронічні респіраторні захворювання.

ІМО постійно працює над удосконаленням нормативного інструмента забезпечення екологічності, приймаючи обмеження щодо викидів оксидів сірки і, як наслідок, – необхідності зменшення вмісту сірки в паливі.

Однак дистилатні палива є змащувальним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури. Експерименти та результати експлуатації двигунів з використанням низькосірчастих дистилатних палив виявили високу інтенсивність зношування прецизійних пар паливної апаратури. Зниження вмісту сірки в паливі призводить до погіршення їхніх протизносних властивостей, унаслідок чого відбувається збільшення зносу деталей тертя паливної апаратури двигунів. Окрім того, видалення сірки з палива в процесі гідроочищення призводить до видалення поверхнево-активних речовин, які сприяють утворенню захисних плівок на поверхнях металу деталей тертя.

У статті визначено, що одним з основних способів зменшення викидів оксидів сірки є зменшення її вмісту в паливі. Штучне видалення сірки з дизельного палива призводить до значного погіршення змащувальних властивостей палива та передчасного зносу деталей тертя. Розв'язанням цієї проблеми є насичення низькосірчастого дизельного палива біодизелем, з одного боку, це зменшить шкідливі викиди оксиду сірки, з іншого – підвищить змащувальні властивості палива.

Ключові слова: біодизель, дистилат, екологічність, змащування, оксид сірки.

Постановка проблеми. Паливна апаратура суднового дизеля є його найбільш складним і вартісним складником. Вона впливає на надійність і економічність роботи всього двигуна. Знос деталей тертя є однією з основних причин зниження ресурсу суднових дизелів. Сьогодні потрібне рішення двох протилежних за своєю сутністю завдань: підвищення екологічності судового дизеля завдяки зменшенню вмісту сірки в паливі – з одного боку, та підвищення надійності судового дизеля завдяки ефективному змащуванню деталей тертя – з іншого.

Міжнародна морська організація (ІМО) на світовому рівні ввела регулюючий режим, що обмежує вміст сірки в морському паливі [1]. Конвенція МАРПОЛ є основним міжнародним конвенційним документом щодо запобігання забруднення морського середовища із суден [2]. Найбільшу увагу в останні роки було звернено на основний міжнародний інструмент, що регламентує викиди в атмосферу із суден – на Додаток VI Міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78. Водночас значно посилилися вимоги щодо обмеження шкідливих викидів із суден, зокрема й окислів сірки (SOx), насамперед

у призначених районах контролю викидів SECA (SOx Emission control areas). Це пов'язано з тим, що за дослідженнями ІМО викиди SOx та NOx із морських суден сприяють підвищенню фонових концентрацій забруднення повітряного середовища в містах і прибережних районах у світі. Викиди цих оксидів забруднюють повітряне середовище, негативно впливають на здоров'я людей, спричиняють ризик виникнення серцево-легеневих захворювань, хронічні респіраторні захворювання.

ІМО постійно працює над удосконаленням нормативного інструмента забезпечення екологічності, приймаючи обмеження щодо викидів оксидів сірки і, як наслідок, – необхідності зменшення вмісту сірки в паливі. Однак дистильатні палива є змащувальним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури. Експерименти та результати експлуатації двигунів із використанням низькосірчастих дистильатних палив виявили високу інтенсивність зношування прецизійних пар паливної апаратури. Зниження вмісту сірки в паливі призводить до погіршення їхніх протизносових властивостей [3; 4], унаслідок чого відбувається збільшення зносу деталей тертя паливної апаратури двигунів. Окрім того, видалення сірки з палива в процесі гідроочищення призводить до видалення поверхнево-активних речовин, які сприяють утворенню захисних плівок на поверхнях металу деталей тертя. Під час експлуатації дизелів на таких паливах протікає інтенсивне зношування як плунжера, так і втулки паливного насоса високого тиску. Знос цих деталей приводить до збільшення зазорів у з'єднаннях, що впливає на процеси подачі палива. Водночас погіршується якість розпилювання, порушується регулювання паливного насоса, виникають перебої в роботі двигуна. Отже, розкриття особливостей використання низькосірчастих палив для підвищення екологічності судових дизелів і пошук раціональних шляхів зменшення зношування деталей тертя є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Звертаючись до аналізу останніх публікацій із дослідженої теми, зазначимо, що найбільш актуальним завданням зниження сірки в паливі є забезпечення екологічності дизеля, що наголошується в роботах [3; 4]. Водночас наголошено, що підвищення екологічності веде до проблем із надійністю елементів судових дизелів, що зазначено в джерелах [5–9]. Окремо можливі шляхи подолання цього протиріччя наведено в працях [10; 11]. Варто зауважити, що проблема екологічності дизелів і паливopідготовки знайшла свій розвиток в останні 20–30 років, що пов'язано з жорсткими вимогами міжнародних організацій [1; 2].

Постановка завдання. Дослідження спрямовано на розкриття особливостей використання низькосірчастих палив для підвищення судових дизелів та обґрунтування раціональних шляхів зменшення зношування деталей тертя судового дизеля.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Як уже зазначалося раніше, відповідно до вимог [2] відбувається планомірна жорсткість вимог до вмісту SOx у відпрацьованих газах судових енергетичних установок (СЕУ). Найбільш жорсткі вимоги висунуто для районів контролю шкідливих викидів SECA: Балтійське та Північні моря, прибережні води США та Канади, Середземне море, узбережжя Японії та низка інших акваторій. Для підвищення екологічності судових дизелів (за викидами SOx) можна використовувати два методи (рис. 1).

У табл. 1 представлено кількість шкідливих викидів під час згоряння палива за досвідом середньоморських дизельних двигунів, випущених у ХХІ ст. З наведених даних можна зробити висновок, що під час експлуатації судових дизелів на традиційних паливах виконати вимоги [2] неможливо без використання додаткових методів.

Метод доочищення випускних газів за допомогою скрубера.

Рис. 1. Основні методи підвищення екологічності судового дизеля за викидами SOx випускних газів

Обсяги викидів під час згоряння різних видів палив

Тип палива	SO _x г/(кВт год)	NO _x г/(кВт год)	CO ₂ г/(кВт год)	Тверді частки
Мазут (3,5 % сірки)	13,0	9–12	580–630	1,50
Морське дизельне паливо (0,5 % сірки)	2,0	8–11	580–630	0,25–0,50
Очищене дизельне паливо (0,1 % сірки)	0,4	8–11	580–630	0,15–0,25

Скрубер функціонує так: газ, який надходить на очищення, подається по похилому газоходу в нижню частину скрубера та піднімається по корпусу нагору. У верхній частині скрубера розташовані три яруси зрошення, що складаються з відцентрових форсунок. Розчин NaOH, який подається під тиском, розпорошується. Краплі розчину, які при цьому утворюються, падають під дією сили ваги назустріч запиленому газу й потрапляють на дрібні провальні тарілки, на яких утворюється піна та відбувається взаємодія газу з розчином. Очищення газу від оксидів сірки (SO₂) виконується за абсорбційною технологією. Під час контакту розчину NaOH із газом відбуваються такі реакції:

Відпрацьований розчин і виловлений пил збираються в нижній частині скрубера. Очищений газ відходить через газоходи, що розміщені у верхній частині апарату.

Перевагами скруберів є можливість використання на судах традиційних високосірчастих палив за низькою ціною, інфраструктура постачання суден бункерним паливом не змінюється. Однак саму технологію використання скруберів у суднових енергетичних установках до кінця не відпрацьовано. Потрібно тримати на судні значний запас 50 %-го розчину каустичної соди для роботи скрубера. Після роботи пристрою потрібно скидати за борт досить велику кількість відпрацьованих розчинів солей. Тому необхідно контролювати за чотирма параметрами викиди розчину солі за борт. Окрім того, поряд із високою вартістю переобладнання судна скрубери мають значні масо-габаритні показники. Основна маса цього обладнання впливає на остійність судна, тому для деяких типів суден, особливо для пасажирського флоту, установка скрубера неможлива.

Використання низькосірчастого палива.

Варіантом для досягнення встановлених норм викиду SO_x є використання важких палив із низьким вмістом сірки. За вимогою стандартів на суд-

нові бункерні палива ISO 8217-2017 [12] визначає три різних дистиляти (DM) та низка залишкових марок (RM). А відповідно до ліміту концентрації сірки в суднових паливах, які використовуються в зонах контролю за викидами SO_x (SECA), на ринок було випущено марки палива (RM) із вмістом сірки менш 0,1 %. Такі типи палива, звичайно, називають ультранизькосірчастими паливами (ULSFO). Вони не є традиційними дистилятами, а являють собою суміш продуктів, які отримуються на нафтопереробних заводах, що раніше не використовувалися широко для морських енергетичних установок.

Під час застосування низьких-сірчастих мазутів у суднових енергетичних установках може виникати низка проблем, таких як підвищений вміст алюмосилікатів у паливі, несумісність з іншими паливами, а також стресова корозія.

У важкому паливі з вмістом сірки менш 0,1 % можуть міститися абразивні частки алюмосилікатів (Al + Si). Алюмосилікати використовуються на ділянках каталітичного крекінгу як каталізатори. Розмір гранул каталізатора становить близько 40–60 мкм, але в процесі крекінгу утворюються частки з розміром 10–20 мкм, що осідають у залишкових фракціях. Ці частки у процесі синтезу залишкових палив у низці випадків підмішуються до них. Потрапляння таких домішок у паливо призводить до збільшення швидкості зносу в десятки разів (див. рис. 2).

Тому потрібно використовувати систему очищення та кондиціонування палива для його очищення палива та видалення алюмосилікатів. Системи очищення повинні бути розраховані на роботу за більш високих температур і більш низької рекомендованої витрати. Занадто низька температура та занадто високий потік палива через сепаратори під час очищення призведуть до недостатнього видалення води, алюмосилікатів, шламу та інших забруднень. Проблеми сумісності виникають, коли компоненти в паливі погано змішуються, наприклад під час змішування палива з високим вмістом ароматичних вуглеводнів (асфальтенів палива HFO) із паливами аліфатичного (парафінового) типу (дистилятами) або

Рис. 2. Абразивне зношування гільзи та частка алюмосилікатів на поверхні поршневого кільця

з новими видами палива з вмістом сірки 0,1 %. Асфальтени можуть випасти із суспензії, і результатом може бути значна кількість осаду в баках, фільтрах і сепараторах.

Природна нестабільність палива з низьким вмістом сірки створює чотири критичних загрози для безпечної роботи суднових двигунів:

- погіршення якості запалення;
- надмірні відкладення на двигуні;
- збільшення видимих викидів твердих часток;
- значне утворення шламу забрудненням паливної системи.

Зниження стабільності палива також може призвести до збільшення викидів. Низькосірчасті морські палива часто утворюють велику кількість незгорілих вуглеводів і викликають видимі викиди твердих часток (непрозорість диму). Погана стабільність палив сприяє утворенню смоли та шламу під час збереження, а також викликає відкладення на форсунках та прогорання клапанів.

Відомо [5; 11], що дистильовані палива в суднових дизелях є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури.

Залежність протизносових властивостей палива від вмісту сірки зумовлена її здатністю утворювати на поверхнях тертя нові хімічні з'єднання у вигляді твердих плівок з оксидів і сульфідів металу. Ці тверді плівки відіграють величезну роль у процесах тертя й зносу – збільшують зносостійкість і зменшують силу тертя. У низькосірчастих паливах у міру збільшення глибини очищення відбувається зміна не тільки кількості, але й складу сірчистих з'єднань. Насамперед видаляються сірчасті з'єднання з найбільшою реакційною здатністю (сульфіди), а залишаються відносно стабільні речовини, пере-

важно тіофени. Бензо- та дібензтіофени мають недостатню хемосорбційну активність для утворення поверхневих плівок, які перешкоджають зносу металу. Видалення з'єднання сірки в процесі виробництва низькосірчастих дизельних палив призведе до погіршення їхніх протизносових властивостей (рис. 3).

На рис. 4 наведено поле кореляції між вмістом у паливі сірки (%) та розмірів плями зношення на деталі (мкм).

Є низка способів для регулювання протизносових властивостей палив відповідно до сучасних вимог. Перший – це застосування спеціальних протизносових присадок. Другим є поліпшення триботехнічних характеристик палив шляхом додавання в дизельне паливо олії рослинного походження (рапсова, соєва, соняшникова, пальмова), біопалива або мінеральної олії у визначених пропорціях. Принцип дії протизносових присадок полягає в утворенні міцної плівки на поверхні деталей тертя. Плівка складається з продуктів механіко-хімічних перетворень присадки на поверхні металу. Спосіб її формування залежить від режиму тертя. Під час рідинного режиму цілком досить ефективної адсорбції (фізична адсорбція, хемосорбція) присадки, що поліпшує властивості змащувального палива. У режимі граничного тертя шар змащувальної рідини між деталями тертя постійно порушується та виникає погроза схоплювання поверхонь. Під час мікросхоплювання оголюється так звана ювенільна поверхня, що володіє високою вільною енергією та, відповідно, каталітичною активністю. На цій поверхні змащувальний матеріал має істотні хімічні зміни та утворює шар принципово нової речовини, яка складається з продуктів перетво-

Рис. 3. Вплив вмісту сірки в паливі на надійність роботи паливного насоса високого тиску:

1 – вміст сірки до 0,2 %; 2 – вміст сірки до 0,005 %; 3 – вміст сірки до 0,001 %

Рис. 4. Кореляція між вмістом сірки і змашувальною здатністю палива

рення палива, присадки та металу деталі, що володіє високою механічною стійкістю, а під час стирання постійно відновляється. У цьому випадку найбільш ефективні присадки, що містять активні полярні групи. Значення діаметра плями зносу значно зменшується від 20 до 45 % під час використання присадок із концентрацією $0,015 \div 0,02$ % маси палива [5; 6]. Вадою зазначеного способу є значна вартість присадок до палива.

Важливою властивістю рослинних олій є їхня здатність змішуватися в будь-яких пропорціях із нафтопродуктами. Ця особливість рослинних олій дає можливість отримувати моторні палива

із заданими фізико-хімічними властивостями змішуванням різних компонентів у необхідних пропорціях. Жирні кислоти, що є основним компонентом рослинних олій, являють собою високомолекулярні кисневмісні з'єднання з вуглеводною основою. За своєю хімічною структурою вони схожі на вуглеводні, які входять до складу нафтового дизельного палива. Зі свого боку, структурні формули метилових ефірів жирних кислот і самих жирних кислот також досить близькі до них.

Поверхнево активні речовини в рослинних оліях завдяки прояву фізичної адсорбції та хемо-

Рис. 5. Вплив вмісту метилових ефірів пальмової олії в суміші низькосірчастого палива на силу тертя

сорбції на поверхнях тертя знижують швидкість зносу та втрати на тертя. Взаємодія поверхнево активних речовин із поверхнею тертя змінює деформаційні характеристики матеріалів трибо-системи, зменшуючи надлишкову вільну енергію поверхні тертя. Отже, рапсова олія широка застосовується для підвищення змащувальної здатності палива. Використання біодизельного палива як компонента для змішування з нафтовим дизельним паливом не вимагає модернізації звичайного дизельного двигуна, на відміну від таких альтернативних палив, як природний газ, зріджений природний газ та етанольні суміші. Ефіри рослинних олій добре змішуються з нафтовими дизельними паливами й не розшаровуються навіть за наявності розчиненої води.

На рис. 5 наведено дослідження протизносових властивостей сумішей, які мають 1, 2, 5, 10 та 20 % метилових ефірів пальмової олії. Протягом одного місяця не було виявлено виділення осаду або помутніння за температури 30°C.

З рис. 5 видно, що мінімальна сила тертя досягається за 10 % вмісту біодизеля. Найзначніша сила тертя знижується в інтервалі концентрацій у 1–5 %.

Висновки. У результаті дослідження з'ясовано:

1. Вимога екологічності суднових дизелів є вимогою сучасності. Жорсткі міжнародні норми щодо викидів оксидів сірки SOx вимагають розроблення нових методів паливопідготовки та фільтрації (очищення).

2. Одним з основних способів зменшення викидів оксидів сірки є зменшення її вмісту в паливі.

3. Штучне видалення сірки з дизельного палива призводить до значного погіршення змащувальних властивостей палива та передчасного зносу деталей тертя.

4. Розв'язанням цієї проблеми є насичення низькосірчастого дизельного палива біодизелем. З одного боку, це зменшить шкідливі викиди оксиду сірки, з іншого – підвищить змащувальні властивості палива.

Список літератури:

1. International Maritime Organization. Офіційний сайт. URL: <https://www.imo.org/> (дата звернення: 12.03.2021).
2. Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден 1973 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_009#Text (дата звернення: 12.03.2021).
3. Данилов А.М. Применение присадок в топливах: справочник. Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. 368 с.
4. Ian Crutchley. Low sulphur diesel can lead to extensive wear. *Ship & Offshore*. 2010. № 4. Р. 14–17.
5. Солодовников В.Г. Использование в судовых дизелях топлив различного фракционного и структурного состава. *Судовые энергетические установки*. 2014. № 33. С. 110–117.
6. Горелик Г.Б. Топливная аппаратура дизелей: история, исследование процессов, расширение диапазона стабильных от цикла к циклу подач, вопросы моделирования и расчета. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 246 с.

7. Крылов И.Ф., Емельянов В.Е., Никитина Е.А., Вижгородский Б.Н., Рудяк К.Б. Малосернистые дизельные топлива: плюсы и минусы. *Химия и технология топлив и масел*. 2005. № 6. С. 3–6.
8. Добровольский В.В., Ханмамедов С.А. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных дизелей. *Судовые энергетические установки*. 2010. № 26. С. 46–54.
9. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей. *Проблеми техніки*. 2012. № 3. С. 84–103.
10. Горб С.И. Новые правила энергоэффективности для судов. *Порты Украины*. № 01 (123). 2013. С. 37–39.
11. Горелик Г.Б. Основы теории надежности судовых энергетических установок. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2007. 137 с.

Daki O.A., Urum N.S., Riashchenko O.I., Babere O.S. FEATURES OF USING LOW-SULFUR FUELS TO IMPROVE THE ENVIRONMENTALITY OF MARINE DIESELS

The International Maritime Organization (IMO) has introduced a global regulatory regime that limits the sulfur content of marine fuels. In recent years, the greatest attention has been paid to the main international instrument regulating emissions from ships – Annex VI of the International Convention MARPOL 73/78. At the same time, the requirements for limiting harmful emissions from ships, including sulfur oxides (SOx), have significantly increased, especially in designated emission control areas SECA (SOx Emission control areas). Emissions of these oxides pollute the air, adversely affect human health, including the risk of cardiopulmonary disease, chronic respiratory diseases. IMO is constantly working to improve the regulatory tool for environmental friendliness, adopting restrictions on sulfur oxide emissions and, as a result, the need to reduce the sulfur content of fuels. However, distillate fuels are a lubricant for moving parts of fuel equipment. Experiments and results of operation of engines using low-sulfur distillate fuels revealed a high wear rate of precision pairs of fuel equipment. The decrease in the sulfur content in the fuel leads to a deterioration of their anti-wear properties, resulting in an increase in wear of the friction parts of the fuel equipment of the engines. In addition, the removal of sulfur from the fuel in the process of hydrotreating leads to the removal of surfactants that contribute to the formation of protective films on the metal surfaces of the friction parts. The article identifies that one of the main ways to reduce emissions of sulfur oxides is to reduce its content in the fuel. Artificial removal of sulfur from diesel fuel leads to a significant deterioration of lubricating properties of fuel and premature wear of friction parts. The solution is to saturate low-sulfur diesel fuel with biodiesel, on the one hand it will reduce harmful emissions of sulfur oxide, on the other – increase lubricating properties.

Key words: biodiesel, distillate, environmental friendliness, lubrication, sulfur oxide.