

УДК 629.5.03  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/30>

### **Маннапова О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

### **Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

### **Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

### **Лісовський С.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКОСІРЧИСТИХ ПАЛИВ НА ПРОЦЕС ЗМАЩУВАННЯ РУХОМИХ ДЕТАЛЕЙ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ**

*Метою статті є дослідження низького вмісту сірки на надійності роботи паливної апаратури дизелів. Поставлена мета досягається шляхом глибокого аналізу сучасних публікацій, що стосуються впливу парникових і непарникових газів, зокрема низькосірчистих палив на зміну клімату взагалі і на змащування рухомих деталей паливної апаратури, зокрема. Встановлено вплив низькосірчистих палив на надійність роботи паливної апаратури, зокрема паливного насосу високого тиску у контексті конкуренції між різними видами транспорту. Проведений аналіз показав прямопропорційну залежність протизносних властивостей дизельного палива від вмісту сірки. Підтверджена здатність сірки утворювати на поверхнях тертя механічних елементів тверді плівки з оксидів та сульфідів металу, які збільшують зносостійкість та зменшують силу тертя, що безпосередньо відбивається на ефективності роботи паливної апаратури. Збільшення глибини дизельних палив призводить до утворення знесічених (або низькосірчистих) дизельних палив, що змінює кількість і склад сірчистих сполук. У процесі очищення видаляються сульфідні, які являють собою сірчисті сполуки з найбільшою реакційною здатністю. Підтверджено, що наслідком видалення з'єднань сірки у процесі виробництва малосірчистих дизельних палив стає однозначне погіршення їх протизносних властивостей, яке стає тим гіршим, чим чистішим від гетероатомних полярних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів є паливо. Встановлена залежність між величиною діаметра плями зносу від зростання концентрації сірки в дизельному паливі. Найбільш суттєвим результатом дослідження є встановлення однозначної кореляції між вмістом сірки в дистильному паливі і змащувальною здатністю, яка залежить від ступеня гідроочищення дистильного палива. Подальшим напрямом роботи є оцінка впливу в'язкості і фракційного складу суднових палив на інтенсивність зношування плунжерних пар паливного насосу високого тиску.*

**Ключові слова:** морське судно, низькосірчисте паливо, пляма зносу, скруббер, паливного насосу високого тиску.

**Постановка проблеми.** Дистильтні палива в суднових дизелях є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури (ПА). Застосування низькосірчистих суднових дистильтних палив (СДП) у суднових енергетичних установках (СЕУ) через зниження змащувальної здатності та в'язкості палива на вході у двигун може знизити надійність роботи ПА.

Ступінь зносу вузлів та агрегатів ПА суттєво впливає на надійність роботи дизеля. Найбіль-

шому зносу піддаються прецизійні вузли паливного насоса високого тиску (ПНВТ) та форсунки. На поверхні пар тертя при контакті з паливом утворюється граничний шар, який виконує функцію мастильної плівки, що зменшує силу тертя та знос деталей тертя.

Встановлена чітка залежність протизносних властивостей дизельного палива (ДП) від вмісту сірки. На ці властивості впливає здатність сірки

утворювати на поверхнях тертя тверді плівки з оксидів та сульфідів металу, які збільшують зносостійкість та зменшують силу тертя.

У знесірених (низькосірчистих) ДП зі збільшенням глибини очищення змінюється як кількість, так і склад сірчистих сполук. У першу чергу видаляються сірчисті сполуки з найбільшою реакційною здатністю (сульфіди). Видалення з'єднань сірки у процесі виробництва малосірчистих дизельних палив призведе до погіршення їх протизносних властивостей.

Причиною зниження мастильної здатності глибоко гідроочищених ДП є видалення з них гетероатомних полярних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що діють як граничне мастило.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Транспорт, з одного боку, вносить серйозний внесок у розвиток регіональної та світової економіки, а, з іншого, спричиняє екологічні наслідки у вигляді викидів парникових газів (ПГ), наприклад  $\text{CO}_2$ , що впливають на зміну клімату, і непарникових газів, таких як  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , легких органічних сполук і твердих органічних речовин, що впливають на якість повітря на місцевому рівні, а отже, на природу і здоров'я людей. Існує велика кількість досліджень, в яких обговорюється природа і масштаби екологічної шкоди, спричиненої видами транспорту [1; 2]. Деякі з цих досліджень зосереджені на суднових викидах і пов'язаних з ними політичних заходах [3–7].

Вплив нових екологічних норм на транспортні ринки є широко обговорюваним питанням, особливо в контексті конкуренції між видами транспорту. У роботі [8] розглядається вплив спеціального екологічного законодавства Міжнародної морської організації (ІМО) щодо викидів з суден на конкуренцію між морським та автомобільним транспортом. Правила ІМО щодо забруднення з суден містяться в Міжнародній конвенції щодо запобігання забрудненню з суден (МАРПОЛ 73/78) з доповненнями, які встановлюють обмеження на викиди оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) та сірки ( $\text{SO}_x$ ) з вихлопних газів суден, а також забороняє навмисні викиди озоноруйнівних речовин. Існують також положення щодо обмеження вмісту сірки в судновому паливі для суден у портах.

Зосередженість політики на зменшенні вмісту сірки в судновому паливі зумовлена її внеском у забруднення навколишнього середовища. При згорянні сірки в паливі утворюється  $\text{SO}_x$ , який є одним із забруднювачів навколишнього середовища, особливо при утворенні кислотних дощів. Вміст сірки в мазуті має великий вплив на

рівень частинок у вихлопних газах. У суден є два варіанти скорочення викидів сірки в: перехід на мазут з низьким вмістом сірки або використання скрубберів: 1) перехід на мазут з низьким вмістом сірки (LSFO) і 2) використання скрубберів. Замість використання LSFO судна можуть обладнати систему очищення вихлопних газів або використовувати будь-який інший технологічний метод для обмеження викидів  $\text{SO}_x$ . На теперішній час не з'ясовано, чи є витрати на використання скрубберів конкурентоспроможними порівняно з використанням LSFO. Розробка скрубберів для суден все ще перебуває на ранній стадії, і місцева влада може заборонити скидання потоків відходів зі скрубберів у портах і лиманах. Проблема утилізації серйозно підриває майбутнє широкомасштабне розгортання скрубберів. Існує також проблема простору при модернізації скрубберів на існуючих суднах, пов'язана з корпусом двигуна і резервуарами з кислотостійким покриттям. У роботі [9] стверджується, що використання мазуту з високим вмістом сірки і скрубберів дає чисту вигоду від скорочення викидів  $\text{CO}_2$ . Хоча на скруббері відбуваються викиди  $\text{CO}_2$  через нейтралізацію та додаткове споживання палива, ці викиди будуть значно меншими, ніж викиди  $\text{CO}_2$  при додатковій переробці дистилату на нафтопереробному заводі. Постійний розвиток технології скрубінгу неминуче призведе у майбутньому до очищення інших газів, таких як оксиди азоту.

Однак у цьому документі виражається велике занепокоєння, що скорочення вмісту сірки в судновому паливі до 0,1 % може призвести до серйозного порушення комерційної динаміки судноплавства; значного збільшення експлуатаційних витрат на судна; зниження конкурентоспроможності порівняно з іншими видами транспорту; «зворотного зсуву» з морського на автомобільний транспорт, що суперечитиме меті щодо сприяння використанню морського/каботажного транспорту. Тому дана робота зосереджена на дослідженні у більшому ступені економічних питань щодо впливу вимог ІМО до палива з низьким вмістом сірки на каботажні перевезення. Для цього аналізується дослідження впливу вимог до палива з низьким вмістом сірки [10].

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження низького вмісту сірки на надійності роботи паливної апаратури дизелів.

**Викладення основного матеріалу.** Експерименти та результати експлуатації двигунів, що працюють на низькосірчистих ДП, засвідчили швидке зношування ПНВТ. Так, зниження

сірки у паливі з 0,2 % до 0,001 % знижує термін служби ПНВТ з 200 тис. км пробігу і більше до 3,2–12,8 тис. км.

Крім того, використання глибокоочищених палив, поряд зі зниженням вмісту шкідливих речовин у ВГ, відбивається на високому рівні зносу паливних насосів, низькій змащувальній здатності і поганих протизносних характеристиках низькосірчистих дизельних палив.

Узагальнені дослідницькі дані впливу на ресурс паливних насосів використання палива з різним вмістом сірки свідчать, що реальний ресурс насосів експоненційно зменшується зі зниженням вмісту сірки.

Дослідження впливу глибини гідроочищення на протизносні властивості дизельних палив проводилися на спеціально приготовлених зразках ДП, в яких вмістом сірки становив від 0,01 до 0,2 % мас. Для мінімізації впливу показників в'язкості, щільності, вмісту та складу ароматичних вуглеводнів на протизносні властивості палив підбиралися палива з близькими значеннями цих показників. Доведено, що збільшення вмісту сірки від 0,01 до 0,5 % покращують протизносні властивості дизельних палив у 1,2–1,5 рази (рис. 1).

При цьому помічено, що змащувальна здатність ДП у значному ступені залежить від їх фракційного складу. Так, змащувальна здатність дизельних палив зі зниженням точок перегонки палив помітно збільшується. З іншого боку, знос металу в низькосірчистих ДП з полегшеним фракційним складом збільшується в 3–4 рази порівняно з паливом, який має вміст сірки 0,05 %.

Кінематична в'язкість палив, навпаки, сама по собі незначно впливає на змащувальні властивості, оскільки її значення залежать від фракційного складу нафтопродукту. Але в'язкість ДП суттєво впливає на знос металу. Зменшення значення в'язкості нижче 2,5 сСт суттєво погіршує протизносні властивості ДП, що знижує надійність ПА двигунів.

Наведені результати стосувалися лише транспортних двигунів колісної техніки. Дослідження судового дистильного палива дали дуже суперечливі результати (рис. 2).

Так, встановлена однозначна кореляція між вмістом сірки в дистильному паливі і змащувальною здатністю, яка залежить від ступеня гідроочищення дистильного палива. Для досягнення необхідного вмісту сірки у процесі нафтопереробки видаляються полярні з'єднання з палив, що призводить до зниження їх природної змащувальної здатності.

При дослідженні впливу в'язкості палив встановлено незначну кореляцію між змащувальною здатністю і в'язкістю. Це пояснюється тим, що у процесі змащування плунжерних пар ПА, крім в'язкості та вмісту сірки, необхідно врахувати багато інших факторів. Вони знаходяться у тісній взаємодії, взаємно впливають один на одного. Тому вважається, що вплив в'язкості на змащувальну здатність СДП є незначним.

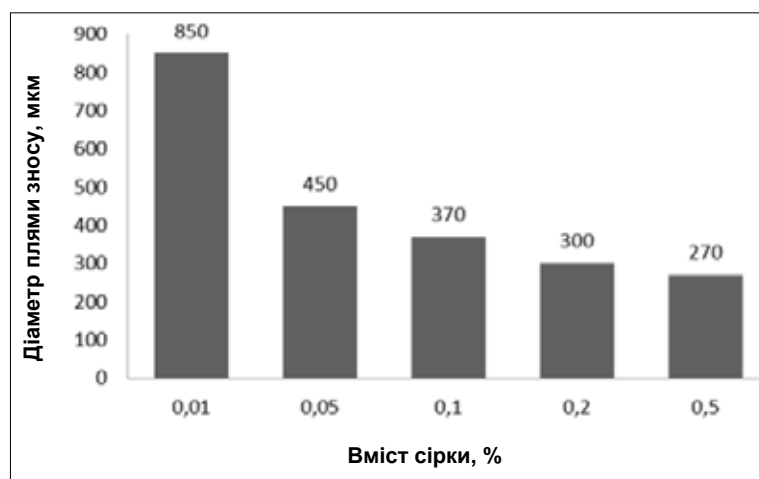


Рис. 1. Зменшення величини діаметра плями зносу (ДПЗ) при зростанні концентрації сірки в дизельному паливі

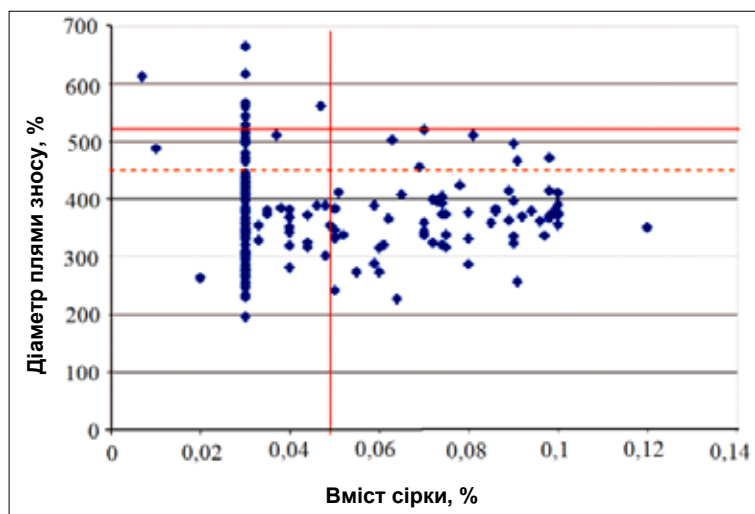


Рис. 2. Взаємозв'язок між вмістом сірки та змащувальною здатністю палива

Але в інших джерелах вказано про однозначний вплив в'язкості дистильованого палива впливає на інтенсивність зношування прецизійних пар ПА, особливо при пониженні в'язкості палива нижче 2 сСт.

Вплив температури на змащувальну здатність СДП прямо пропорційний: збільшення температури приводить до зменшення в'язкості палива і зростання величини ДПЗ.

Але при цьому необхідно вміст сірки в паливі та вихідну в'язкість.

Для малов'язких низькосірчистих палив приріст ДПЗ є мінімальним (до 3,7%), для більш високих значень сірки та в'язкості – приблизно 10%. Тому деякі виробники рекомендують встановлення додаткового охолоджувача в паливній системі для регулювання в'язкості на вході в двигун.

**Висновки.** Протизносні властивості низькосірчистих дистильованих палив залежать не тільки від вмісту сірки, але й фракційного складу, що залежить від температури кінця кипіння палива і його в'язкості.

Дослідження не підтвердили впливу в'язкості на змащувальну здатність СДП.

Використання ДП з низьким вмістом сірки значно знижує надійність роботи паливної апаратури дизелів. Однак існує суперечлива оцінка впливу характеристик суднових палив, таких як в'язкість, фракційний склад, вміст сірки, на інтенсивність зношування плунжерних пар ПНВТ.

Комплексні дослідження впливу різних показників СДП на їх триботехнічні властивості взагалі відсутні. СДП, як правило, мають більш важкий фракційний склад, іншу в'язкість та інші фізико-хімічні характеристики.

#### Список літератури:

1. Banister D., Button K. Transport, the environment and sustainable development. London : Routledge. 1993, 292 p. DOI: 10.4324/9780203857151.
2. Chapman L. Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography*. 2007. Vol. 15. № 5. P. 354–367. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2006.11.008.
3. Endresen O. Emission from international sea transportation and environmental impact / O. Endresen et al. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2003. Vol. 108. № D17. DOI: 10.1029/2002JD002898.
4. Corbett J., Koehler H. Updated emissions from ocean shipping. *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108. № D20. DOI: 10.1029/2003JD003751.
5. The contribution from shipping emissions to air quality and acid deposition in Europe / R.G. Derwent et al. *AMBIO: A J. of the Human Environment*. 2005. Vol. 34. № 1. P. 54–59.
6. Transport impacts on atmosphere and climate: shipping. / V. Eyring et al. *Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 44. № 37. P. 4735–4771, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.059.
7. Psaraftis H, Kontovasa C. Balancing the economic and environmental performance of maritime transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2010. Vol. 15. № 8. P. 458–462. DOI: 10.1016/j.trd.2010.05.001.
8. Analysis of policy measures to reduce ship emissions in the context of the revision of the national emissions ceilings directive / J. Cofala et al. IIASA for EC DG ENV. Laxenburg, Austria. 2007. 74 p.
9. The impact of scrubber discharge on the water quality in estuaries and ports / J. Teuchies et al. *Environmental Sciences Europe*. 2020. Vol. 32. № 103. DOI: 10.1186/s12302-020-00380-z.
10. Notteboom T. The impact of low sulphur fuel requirements in shipping on the competitiveness of ro-ro shipping in Northern Europe. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2011. Vol. 10. P. 63–95. DOI: 10.1007/s13437-010-0001-7.

#### **Mannapova O.V., Shtrybets V.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW-SULPHUR FUELS ON THE PROCESS OF LUBRICATION OF MOVING PARTS OF FUEL EQUIPMENT**

*The aim of the article is to study the effect of low sulphur content on the reliability of diesel fuel equipment. This goal is achieved through an in-depth analysis of modern publications on the impact of greenhouse and non-greenhouse gases, in particular low-sulphur fuels, on climate change in general and on the lubrication of moving parts of fuel equipment, in particular. The influence of low-sulphur fuels on the reliability of fuel equipment, particularly a high-pressure fuel pump in the context of competition between different modes of transport, is determined. The analysis showed a direct proportional dependence of the anti-wear properties of diesel fuel on the sulphur content. The ability of sulphur to form solid films of metal oxides and sulphides on the friction surfaces of mechanical elements, which increase wear resistance and reduce friction, has been confirmed, which directly affects the efficiency of fuel equipment. Increasing the depth of diesel fuels leads to the formation of desulphurised (or low sulphur) diesel fuels, which changes the amount and composition of sulphur compounds. The cleaning process removes sulphides, which are the most reactive sulphur compounds.*

*It has been confirmed that the removal of sulphur compounds in the process of producing low-sulphur diesel fuels results in a clear deterioration of their anti-wear properties, which becomes worse the purer the fuel is from heteroatomic polar compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons. A dependence was established between the size of the wear spot diameter and the increase in the sulphur concentration in diesel fuel. The most significant result of the study is the establishment of an unambiguous correlation between the sulphur content of distillate fuel and lubricity, which depends on the degree of distillate fuel hydrotreatment. The further direction of work is to assess the influence of viscosity and fractional composition of marine fuels on the wear rate of plunger pairs of a high-pressure fuel pump.*

**Key words:** sea vessel, low-sulphur fuel, wear spot, scrubber, high-pressure fuel pump.