

10.31653/smf44.2022. 121-131

Заблоцький Ю.В., Сагін А.С.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПІД ЧАС
ЗМІНИ РЕЖИМІВ МАЩЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПАР
ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

Постановка проблеми в загальному вигляді. В теперішній час основним джерелом енергії суднових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) є нафтове паливо. При цьому навіть з урахуванням розвитку та використання в судновій енергетиці альтернативних сортів палива (насамперед палива біологічного походження та газового палива) саме рідке вуглеводневе паливо буде домінуватиме порівняно з ними у найближче десятиліття [1-3].

Неодноразово зазначалося, що серед характеристик палива традиційно відзначається його в'язкість, температури спалаху та самозаймання, вміст сірки, а також теплотворна здатність. При цьому практично ніколи не оцінюється така характеристика палива як здатність до мащення [4-6]. Саме здатність до мащення забезпечує якісну та надійну роботу паливної апаратури (ПА) ДВЗ, яка у свою чергу є одним із відповідальних вузлів будь-якого двигуна. Поняття «здатність до мащення» палива не актуальне для «об'ємних зон» паливної системи (трубопроводів перекачування, фільтрів, сепараторів тощо), за винятком гвинтових і шестерних паливних насосів, в яких паливо під час свого руху надає дію з мащення на кромки гвинтів або шестірна. Однак для елементів ПА високого тиску, де зазор між поверхнями, що контактують між собою, визначається декількома мікрометрами, поняття «здатність до мащення палива» є більш ніж актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді робіт, що присвячені питанням дослідження поведінки вуглеводневих рідин (палива та мастила) поблизу металевих поверхонь, було визначено наявність особливої рідкокристалічної структури, при якій молекули рідини мають орієнтаційну впорядкованість і характеризуються квазікристалічними властивостями [7-9]. Для ДВЗ, де найвиразніше можуть проявлятися такі властивості, в першу чергу, є пари тертя вал – вкладиш підшипника [10, 11], поршневе кільце – втулка циліндра [12, 13], плунжер золотника – втулка паливного насоса високого тиску (ПНВТ) [14, 15].

У питанні забезпечення здатності до мащення палива важливу роль відіграють сили тиску, що розклинає, які виникають в умовах граничного мащення (характерного для пари плунжер – втулка ПНВТ).

Постановка завдання. Основними вузлами тертя паливної системи суднового дизеля, які працюють в режимі граничного мащення / граничного тертя є прецизійні пари ПНВТ та розпилювачів форсунок. Процеси тертя та зношування, що перебігають у насосних елементах ПА, надають вирішальний вплив на тривалість безвідмовної роботи всієї паливної системи та експлуатаційних характеристик ДВЗ. Тому визначення зміни навантажень на елементи ПА високого тиску необхідно виконувати за умови структурних характеристик палива, яке одночасно виконує функції мащення прецизійних пар.

Виклад основного матеріалу.

Процеси тертя в ПА протікають у складних умовах, пов'язаних з тим, що:

- насосні елементи паливної апаратури високого тиску здійснюють зворотно-поступальний рух [16, 17];
- швидкість ковзання плунжера у втулці ПНВТ постійно змінюється [18, 19];
- мастильним середовищем є важкі палива з в'язкістю до 100 сСт, що знаходяться за температурою 90...110°C [20, 21];
- температура деталей паливної апаратури високого тиску змінюється в межах 50...200°C [22, 23];
- нормальне навантаження у вузлах тертя у площині ковзання змінюється за синусоїдальним законом [24, 25].

Одночасно з цим, експлуатація ПА необхідно виконувати з урахуванням екологічних вимог до суднових дизелів [26, 27] та суднових енергетичних установок [28, 29].

У ПНВТ і розпилювачах форсунок прецизійні деталі, які переміщаються щодо один одного та паливо, яке знаходиться в зазорі між ними, утворюють тріаду тертя метал – мастильний шар палива – метал [30]. У процесі роботи деталі ПА зношуються, у міру чого зростає радіальний зазор між втулкою та плунжером, а також місцеві зазори, одночасно погіршується процес подачі палива та сумішоутворення, падає гідравлічна щільність тріади тертя. Зміна геометричного профілю плунжерних пар ПНВТ призводить до підвищеного зносу цих елементів, зниження їх надійності та підвищення витрати палива. У зв'язку з цим були і залишаються актуальними теоретичні

та експериментальні дослідження, спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності ПА суднових дизелів. Перспективними у цьому напрямі є методи та засоби, що дозволяють підвищити довговічність ПА за рахунок управління триботехнічними процесами, що перебігають на її робочих поверхнях. Аналіз умов роботи типового вузла тертя паливної апаратури показує, що на нього діє сила P_t , яка обумовлена стисненням палива і не лежача на одній осі з рушійною силою P_d , що, у свою чергу, поряд з конструкційними особливостями призводить до порушення співвісності плунжера та виникнення нерівноважених радіальних сил P_r , яки викликають підвищене зношування плунжера [31, 32].

Розглянемо вплив перепаду тиску палива та деяких конструкційних параметрів деталей ПНВТ на порушення їх співвісності, нехтуючи при цьому силами інерції, силою тяжкості плунжера та палива, а також шорсткістю поверхонь тертя. Припустимо також, що в кільцевому зазорі має місце ламінарний потік рідини. Припустимо, що плунжер правильної циліндричної форми розташований співвісно нерухомо в отворі втулки і перепад тиску рідини ΔP за довжиною сполучення залишається постійним і змінюється лінійно, тобто.

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

де P_1 та P_2 – високий та низький тиск палива.

У разі правильної циліндричної форми деталей плунжер займе концентричне положення щодо отвору втулки, і в цьому випадку сумарні радіальні тиски P_{r_1} та P_{r_2} будуть однакові за величиною і рівні, тобто

$$P_{r_1} = P_{r_2} = \pi r l \frac{P_1 - P_2}{2},$$

де r – радіус плунжера.

Якщо спостерігається спотворення циліндричної форми плунжера і втулки, а макрогеометричні відхилення деталей паливної апаратури утворюються як у процесі виготовлення, так і в результаті нерівномірного зношування при експлуатації, тиск палива на плунжер буде нерівномірним і призведе до зміщення та перекіс в отворі втулки (рис. 1).

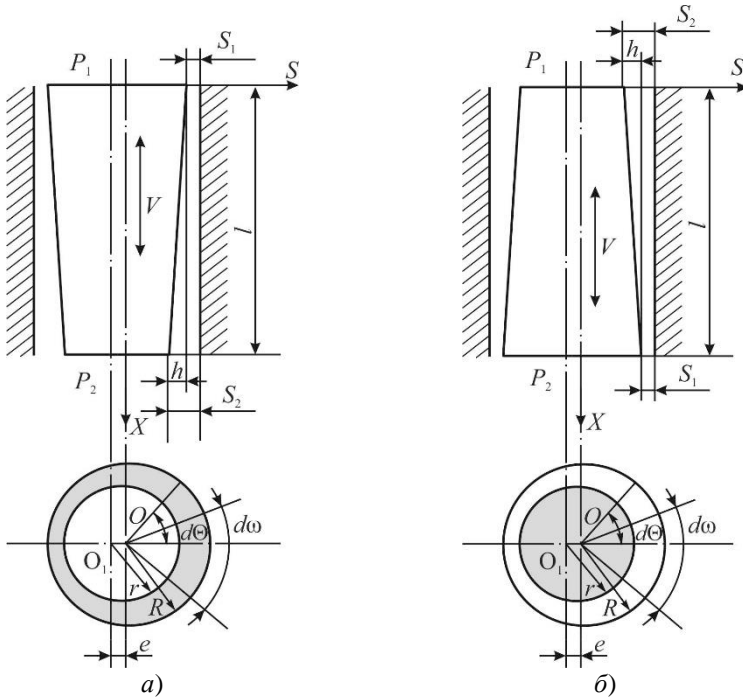


Рис. 1. Схема сполучення втулки та плунжера:

а) з найбільшою основою конуса, розташованим з боку верхнього торця головки, б) з найменшою основою конуса, розташованим з боку верхнього торця головки

При розміщенні в отворі втулки конусного плунжера (найбільша основа якого розташована з боку верхнього торця головки) переріз зазору та тиск рідини в зазорі по довжині сполучення будуть змінними рис. 1, а. Для елементарного зазору (щілини) довжиною dx , висотою по радіусу S і шириною по дузі кола $d\omega$ справедливо тотожність, що зв'язує градієнт тиску з градієнтом витрати палива, що протікає в одиницю часу через перетин, перпендикулярне потоку, тобто

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{12z}{S^2} \cdot \frac{dg}{d\omega},$$

де – об'єм рідини, що протікає через площу зазору з шириною дуги, що дорівнює $d\omega$;

S – радіальний зазор

$$S = R - r,$$

R – радіус втулки.

Елементарна радіальна сила, що діє на конусний плунжер, вісь якого зміщена щодо осі отвору втулки на величину ексцентриситету e і найбільша основа конуса розташована з боку верхнього торця головки, визначається за формулою (див. рис. 1, *a*)

$$dP_{r_1} = 2rl \left[P_1 - \frac{\Delta P(S_1 + h + e \cos \theta)}{2S_1 + h + 2e \cos \theta} \right] \cdot \cos \theta d\theta,$$

де e – ексцентриситет;

θ – кут;

$$d\omega = rd\theta.$$

Повна величина невірноваженої радіальної сили, що діє на конусний плунжер з найбільшою основою, розташованою з боку верхнього торця головки, визначається за рівнянням

$$dP_{r_2} = \frac{\pi r l \Delta P}{4e} \cdot \left[1 - \frac{2S_1 + h}{\sqrt{(2S_1 + h)^2 - 4e^2}} \right].$$

Невірноважені радіальні сили, що виникають, змушують конусний плунжер з найбільшою основою, розташованою з боку верхнього торця головки, зайняти рівноважне положення у зазорі. Однак, в результаті дії невірноважених радіальних сил плунжер зміщуватиметься в зазорі та перекошуватиметься щодо осі втулки. Зі збільшенням ексцентриситету та перекошу зростатиме опір переміщенню плунжера. Усунення плунжера відбуватиметься лише межах найменшого зазору, тобто. зазору між отвором втулки та найбільшим розміром діаметра плунжера.

Елементарна невірноважена радіальна сила dP_r , що діє на конусний плунжер, вісь якого зміщена щодо осі отвору втулки на величину ексцентриситету e і найменша основа розташована з боку верхнього торця головки (рис. 1, *б*) і визначається за рівнянням

$$dP_{r_2} = 2rl \cdot \left[P_1 + \frac{\Delta P(S_2 - h + e \cos \theta)}{h} \right] \cdot \cos \theta d\theta.$$

Повна величина невірноваженої радіальної сили P , що діє на плунжер, найменша основа конуса якого розташована з боку верхнього торця головки, визначиться за формулою

$$P_{r_2} = \frac{\pi r l e \Delta P}{h}.$$

Неврівноважена радіальна сила в цьому випадку також переміщатиме плунжер у рівноважне положення в зазорі, а внаслідок нерівномірного розподілу цих сил по довжині, сполучення відбуватиметься перекошування плунжера. Під час розташуванні плунжера з найменшою основою конуса з боку верхнього торця головки зсув і перекиє осі плунжера буде здійснюватися в межах найбільшого зазору по довжині сполучення. Так як дія неврівноваженої радіальної сили відбувається під час робочого ходу плунжера, є підстави припустити, що під впливом цієї сили плунжер буде переміщатися в радіальному напрямку протягом кожного подвійного ходу.

Зближенню поверхонь деталей пари тертя протидіє опір шару палива, що виникає при цьому. Ступінь зближення залежить від конфігурації поверхонь, що труться, деталей плунжерної пари, швидкості переміщення, в'язкості палива і величини зазору. Зі зменшенням довжини поверхні тертя гідродинамічний тиск знижується пропорційно квадрату довжини. На ділянках виїмок, западин, зовнішнього каналу палива, паливних отворів, у верхній і нижній мертвих точках руху плунжера гідродинамічний рух не виникає і плунжер на цих ділянках приходить у безпосередній контакт з втулкою під дією неврівноваженої радіальної сили, що виникає від перепаду тиску палива. У цьому випадку має місце тертя граничне мащення.

Під час граничного мащення поверхні деталей, що сполучаються між собою, розділені шаром палива завтовшки 0,1...0,5 мкм. Наявність граничного шару або граничної плівки знижує силу тертя в порівнянні з тертям без мастила в 2...10 разів і зменшує зношування сполучених поверхонь в $10^2...10^4$ разів.

Міцність граничної плівки палива багато в чому залежить від природи палива та наявності у ньому активних молекул домішок. Палива, що використовуються в суднових дизелях, є механічною сумішшю різних вуглеводнів, які мають включення органічних кислот, смол, а також поверхнево-активних речовин. У зв'язку з цим палива, як і мастила, утворюють на металевих поверхнях граничну фазу квазікристалічної структури товщиною до 3...5 мкм, що володіє міцним зв'язком з поверхнею і поздовжньою когезією [33-36].

Висновки та перспективи подальших досліджень. У ПНВТ і розпилювачах форсунок прецизійні деталі, що переміщаються відно-

сно один одного і паливо, що знаходиться в проміжку між ними, утворюють тріаду тертя метал – мастильний шар палива – метал. У процесі роботи деталі ПА зношуються, у міру чого зростає радіальний зазор між втулкою та плунжером, а також місцеві зазори, одночасно погіршується процес подачі палива та сумішоутворення, падає гідравлічна щільність тріади тертя.

Під час роботи ПНВТ на плунжер, що здійснює зворотно-поступальний рух, діють неврівноважені радіальні сили, які виникають в результаті перепаду тиску рідини, нерівномірності швидкості відносного переміщення поверхонь, що труться, і конструктивних особливостей деталей як плунжерної пари, так і сполучення кулачок розподільного валу – ролик товкача.

Під час активного ходу плунжера перепад тиску рідини найбільше впливає на виникнення неврівноважених радіальних сил і на його зміщення в отворі втулки. Під час холостого ходу плунжера перепад тиску рідини практично відсутній. Крім того, при відносному переміщенні між поверхнями, що труться, деталей тріади тертя виникає гідродинамічний тиск шару рідини. Гідродинамічний тиск, нерівномірно розподілений поверхнею тертя, також призводить до зміщення плунжера в отворі втулки і перерозподілу радіальних зазорів. При порушенні співвісності між плунжером і втулкою та за наявності відхилень від циліндричності деталей створюються умови для нерівномірного зношування. Активним засобом попередження цього явища є утворення в зоні тертя орієнтованої стриктури молекулярного шару палива, що виконують функції мащення та попереджує безпосередній контакт прецензійних пар.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10 - 14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.

2. Сагін С.В., Солодовников В.Г. Применение ультразвуковой обработки топлива для снижения сернистого износа двигателя // Технические науки – от теории к практике. Сб. ст. по материалам XXXV междунар. науч.-практ. конф. № 6(31). – Новосибирск: «СибАК», 2014. – С.42-48.

3. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых

дизелей // Проблемы техники: науч.-виробн. журнал. – 2012 . – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84 - 103.

4. Fomin O., Lovska A., Kučera P., Pištěk V. Substantiation of Improvements for the Bearing Structure of an Open Car to Provide a Higher Security during Rail/Sea Transportation // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9(8). – 873. <https://doi.org/10.3390/jmse9080873>

5. 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.

6. 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.

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

8. 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.

9. 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>.

10. 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

11. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

12. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55 - 59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.

13. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 5 – 17. doi: 10.31653/smf343.2021. 5-17.

14. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

15. Сагін 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.

16. 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.

17. 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. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

18. 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.

19. 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.

20. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

21. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives //

Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

22. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

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

24. Сагін С.В., Кривий М.О. Розрахунок контактного тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 84 - 92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

25. Сагин С.В. Оптимизация расхода высокощелочного цилиндрического масла судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. – 2016. – № 7 (28) . URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3385>.

26. Куропятнык О.А., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1 - 9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

27. Sagin S.V., Куропятнык О.А. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // Naše more : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78 - 86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.

28. Sagin S.V., Куропятник А.А. 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.

29. 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.

30. 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>.

31. Sagin, S.V., Stoliaryk, T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, 2021. – Vol. 7-8. P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

32. 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>.

33. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА».. – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

34. 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. – С. 72 - 80.

35. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi 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. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

36. 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, 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.