

10.31653/smf48.2024.126-136

Солодовніков В.Г.¹, Руснак Д.Ю.²¹Одеський національний морський університет²Національний університет «Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА У ПАЛИВНИХ СИСТЕМАХ СУДНОВИХ СЕРЕДНЬООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Суднові середньообертові дизелі (СОД) використовуються на всіх без винятку судах морського та внутрішнього водного транспорту, забезпечуючи необхідною потужністю як пропульсивний комплекс (у разі їх роботи на гвинт), також і судову електростанцію (у разі, коли вони використовуються як приводи генераторів електричного струму) [1-3].

Під час експлуатації судових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) не рідко виникають різні дилеми, до однієї з яких відноситься використання в судових СОД високов'язких палив з високим вмістом сірки. Дані палива мають знижену вартість, тому їх використання в судовій енергетиці, що почалося з парових котлів та у подальшому було поширене на крейцкопфні моделі дизелів, в даний час все ширше відбувається і для СОД. Більше того, сучасні моделі СОД та їхня паливна апаратура проектується безпосередньо для використання палив з в'язкістю до 380 сСт та вмістом сірчистих домішок до 0,5 %. При цьому на судах морського та внутрішнього водного транспорту експлуатується достатня кількість дизелів ранніх модифікацій, спроектованих для роботи виключно на паливі, вмісту сірки в якому не перевищує 0,03 %. Конвертація цих ДВЗ для роботи на високов'язкому сірчистому паливі зводиться до переобладнання їхньої паливної апаратури. Це призводить до покращення розпилування та подальшого згоряння палива, але ніяк не запобігає такому явищу, як сірчиста корозія деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ) [4-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язання завдання зниження сірчистого зношування деталей ДВЗ в даний час повністю виконане для малообертових дизелів, що мають окрему систему мащення циліндрів [7-9]. При цьому завдання залишається лише знайти оптимальне співвідношення між вмістом сірки в паливі і вмістом лужних присадок в мастилі. Наприклад, для палив з вмістом сірки до 0,1 % рекомендується використання циліндрових мастил, що вклю-

чають до свого складу 20...30 мгКОН/г мастила (де КОН – вміст лугу в мастилі); для палив, що містять до 0,5 % сірки, мастила з кількістю лугу 30...40 мгКОН/г, для високов'язких палив значення КОН може становити 50 мгКОН/г [10-12].

Суднові СОД мають загальну циркуляційну систему мащення, яка забезпечує подачу мастила в циліндр дизеля та до підшипників колінчатого валу. Використання мастил з підвищеним вмістом лугу в даному випадку недоцільно як з економічних причин (у зв'язку з їхньою більш високою вартістю в порівнянні з мастилами з меншим значенням КОН), також і зважаючи на їх гірші експлуатаційні параметри (зокрема меншу здатність чинити опір нормальним навантаженням). Тому для СОД єдиним способом боротьби з наслідком використання сірчистого палива є його додаткова обробка перед подачею в циліндр, що згодом сприяє зниженню сірчистого зносу. При цьому необхідно враховувати, що розв'язання проблеми видалення сірчистих домішок з палива має бути комплексним, тому що будь-яка фізична дія на паливо призводить до зміни практично всіх його компонентів [13-15].

Виходячи з того, що в паливі знаходяться різноманітні сірчисті сполуки (елементарна сірка, сірководень, меркаптани, сульфіді, дисульфіді, тіофени, теофани, сульфокислоти та інші), що взаємодіють з деталями ЦПГ, кришкою циліндра, випускними та продувними клапанами, можна визначити такі основні шляхи захисту цих вузлів:

- виготовлення деталей дизеля з матеріалів, стійких до дії сірчистої корозії;
- зміни у конструкції дизелів, призначених для роботи на сірчистих паливах;
- застосування антисірчистих присадок;
- виключення режимів роботи дизеля, що викликають найбільш інтенсивну електрохімічну корозію та підвищений зношування (тобто режимів з низькою температурою води, яка охолоджує стінки циліндра та циліндрову кришку);
- створення систем паливопідготовки, що знижують кількість сірчистих сполук, що надходять до циліндра дизеля;
- вибір режиму роботи системи паливопідготовки, що забезпечує найбільш якісну обробку палива [16-18].

Зниженню сірчистого зносу деталей ЦПГ та випускного тракту дизеля також сприяє раціональна експлуатація систем мащення та охолодження. Наприклад, під час експлуатації ДВЗ необхідно підт-

римувати температуру охолоджувальної води та мастила на верхніх межах, рекомендованих інструкціями (щоб уникнути конденсації продуктів згоряння сірки та утворення міцних мінеральних сірковмісних кислот, насамперед сірчистої H_2SO_3 , та сірчаної H_2SO_4). Під час експлуатації дизелів на режимі часткових навантажень рекомендується підвищувати температуру повітря на вході в циліндр шляхом вимкнення охолоджувача повітря [19, 20].

Під час згоряння палива в циліндрі дизеля всі сірчисті сполуки, що містяться в ньому, утворюють двоокис SO_2 і триокис SO_3 сірки. Одночасно в циліндрі утворюється велика кількість водяної пари і, таким чином, у продуктах згоряння з'являється система з двох компонентів, що конденсуються $H_2O - H_2SO_4$, що зумовлює можливість інтенсивної сірчистої корозії.

Умовою випадання конденсату на стінках циліндра є перевищення точки роси зазначеної двофазної суміші над температурою стінок. Слід зазначити, що точка роси суміші навіть за дуже малому вмісті H_2SO_4 значно перевищує точку роси водяної пари. У міру подальшого зниження температури поверхонь деталей до точки роси водяної пари з продуктів згоряння починає випадати розчин сірчаної кислоти та вода, тим самим значно знижується концентрація конденсату на стінках. Остання обставина призводить до різкого зростання агресивності конденсату, оскільки відомо, що сірчана кислота найбільше реагує з металами за концентрацією 3...20 %. Таким чином, за температурами стінок циліндра, що перевищують точку роси продуктів згоряння, сірчана корозія протікає слабо. У разі, коли температура стінок виявляється нижче точки роси водяної пари, інтенсивність корозії різко зростає [21].

Точка роси водяної пари може бути підрахована за формулою, запропонованою Б.Б. Генбомом

$$t_s = 100 \left\{ \left[0,0016daL_o + \frac{H}{2} \left(\frac{\gamma_r}{\mu_o} + \chi_i \right) \right] \frac{P_\phi}{\mu_\phi (1 + \gamma_r) M_L} \right\}^{0,25} ; \quad (1)$$

де d – масове вміст вологи вміст, г/кг;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

L_o – теоретично необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг палива, кмоль/кг;

H – вміст водню в паливі;

γ_r – коефіцієнт залишкових газів;

μ_0 – коефіцієнт молекулярної зміни;

χ_i – частка теплоти, що виділяється у процесі згоряння;

P_ϕ – поточне значення тиску в циліндрі, кгс/см²;

m_ϕ – коефіцієнт молекулярної зміни, що відповідає куту повороту колінчатого валу;

M_L – кількість молей свіжого заряду, кмоль [22, 23].

Для визначення впливу вмісту сірчистих домішок у паливі на точку роси доцільно використовувати емпіричну залежність, одержану В.С. Семеновим

$$t_p = t_s + 170 \left(\frac{\chi_i S_r}{\alpha} \right)^{1,29}; \quad (2)$$

де t_s – значення точки роси водяної пари, °С;

S_r – вміст сірки у паливі, % [24].

Точка роси парів сірчаної кислоти зростає зі збільшенням її концентрації та тиску газів у циліндрі. У дизелях точка роси при положенні поршня у верхній мертвій точці досягає величин 150...180 °С і знижується приблизно до 60 °С до кінця ходу розширення [25].

Очевидно, що поряд із сірчистою корозією не можна заперечувати наявність абразивного зношування деталей під час роботи на сірчистому паливі. Однак, підтримка температури охолоджуючої води та мастила в рекомендованих межах дозволяє зменшити шкідливе злиття сірки на дизель [26].

Для успішного застосування в'язких, високосірчистих палив у суднових СОД необхідно вирішення комплексу організаційно-технічних завдань від прийому палива на борт судна до спалювання в циліндрі дизеля. Система паливopідготовки повинна забезпечувати захист дизеля при роботі сірчистих палив на всьому діапазоні експлуатаційних режимів.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення додаткового способу паливopідготовки, що забезпечує необхідну якість палива та одночасно сприяє зменшенню сірчистої корозії деталей дизеля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із методів паливopідготовки, що сприяє зменшенню шкідливого впливу сірки на деталі ДВЗ, є обробка палива ультразвуком. Цей спосіб насамперед сприяє поліпшенню дисперсних якостей палива, а явище кавітації, що супроводжує цей процес, призводить до додаткової активації його вуглеводневих складових та розщепленню C-S зв'язків. Одним

із варіантів застосування ультразвукової обробки палива є дообладнання штатних систем паливопідготовки додатковими модулями, які здійснюють цей процес [3].

Таким модулем була доукомплектована система паливопідготовки дизелів 6NSD-M Nigita Power Systems, які мають номінальну потужність 480 кВт за частотою обертання валу 1450 об/хв, та входили у кількості трьох штук до складу суднової допоміжної енергетичної установки. Дизелі мали кожен свою автономну систему паливоподачі, що давало можливість проводити дослідження для окремого дизеля з паливом, що пройшов різні етапи підготовки. Паливна система одного з двигунів не піддавалася перекомлектації та експлуатувалася у «штатному» стані, при цьому даний дизель приймався за «контрольний». Паливо до двох інших дизелів подавалося після додаткової обробки за допомогою ультразвукових хвиль. Фрагмент ділянки дообладнання паливної системи дизелів показаний на рис. 1.

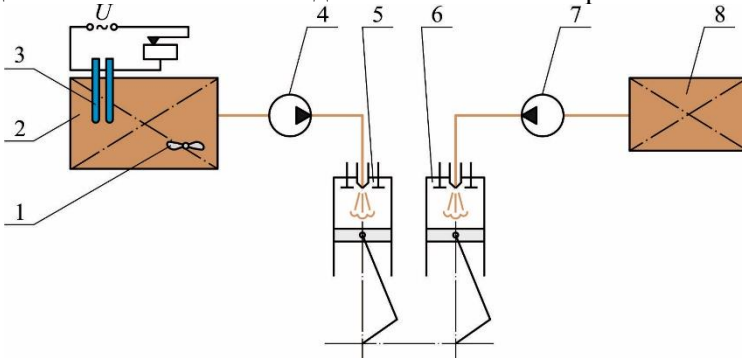


Рис. 1. Схема дообладнання системи подачі палива до двигуна (фрагмент):
1 – змішувач лопаткового типу; 2, 8 – паливні цистерни;
3 – ультразвукова установка; 4, 7 – паливні насоси; 5, 6 – двигуни

Двигун 6 був «контрольним» і експлуатувався в «штатному» режимі, при цьому паливо, пройшовши стандартну процедуру підготовки, подавалося до нього насосом 7 з цистерни 8. Двигуни 5 були «експериментальним». Паливо до них подавалося насосом 4 з цистерни 2, в якій паливо піддавали вплив ультразвукових хвиль за допомогою генератора УЗГ-5-М з фазовою корекцією та магнітострикційним випромінювачем. Генератор складається з кількох силових осередків та загальної системи управління. Система дозволяє регулювати різницю фаз вихідної напруги осередків, домагаючись необхідного розподілу картини ультразвукового поля. Під час синфазної

роботи генератор дозволяє набрати модульно будь-яку потужність у діапазоні $N_{уЗГ}=20...5000$ Вт, а також забезпечити вихідну частоту ультразвукового сигналу в діапазоні $\nu_{уЗГ}=7...35$ кГц з точністю задання частоти до 1 Гц.

При цьому експлуатація одного з дизелів проводилася на мінімально можливій температурі охолоджувальної води та мастила з точки зору забезпечення умов експлуатації та запобігання досягненню температури точки роси. Значення температури охолоджуючих середовищ, а також температури точки роси розраховувалися за виразами (1) та (2).

Ультразвукова установка 3 експлуатувалася в режимі $N_{уЗГ}=3200$ Вт з застосуванням магнітострикційного випромінювача $\nu_{уЗГ}=22$ кГц. Дані величини були визначені у попередніх лабораторних дослідженнях та забезпечували найкращі дисперсні показники палива [3]. У паливній цистерні 2, в якій відбувалася ультразвукова обробка палива, додатково встановлювався лопатковий змішувач 1, що забезпечувало однорідність палива у всьому обсязі.

Для забезпечення ідентичності експерименту всім дизелів проводилася їх попередня підготовка до випробувань. Умови експлуатації дозволяли послідовно протягом 40 годин виконати повну моточистку вказаних дизелів. При цьому на всіх дизелях замінювалася поршнева група (поршни та поршневі кільця) та основні елементи паливної системи високого тиску (прецизійні пари паливного насоса високого тиску плунжер – втулка та голка – розпилювач форсунки). Крім того, перед початком експериментів для обох двигунів здійснювався контроль та регулювання паливної апаратури. При цьому паливні насоси високого тиску регулювалися на однаковий кут випередження подачі палива, а форсунки двигунів налаштовувалися на однаковий тиск підйому голки.

Протягом усього часу проведення експерименту здійснювався контроль часу роботи та експлуатаційного навантаження на дизелі. Для досягнення рівномірного розподілу часу роботи дизелів двигуни послідовно переводилися в режим stand-by. Різниця в часі роботи двигунів, а також в експлуатаційних навантаженнях на двигуни не перевищувала 4 %, що, враховуючи енергоємність об'єктів, дозволяло вважати умови роботи дизелів ідентичними. Експлуатація двигунів проводилася на тому самому сорті палива. При цьому засоби автоматичного контролю підтримували в'язкість палива незмінною протягом усього експерименту. Також ідентичними підтримувався

сорт циркуляційного мастила, що забезпечує режими мащення, та його експлуатаційні характеристики. Ці заходи дозволили вважати, що виконання експерименту відбувається в однакових умовах. Умови мащення та охолодження відрізнялися лише в одного «експериментального» дизеля, який доцільно переводився на режим експлуатації, що сприяє підвищеному корозійному зношуванню деталей ЦПГ.

Завданням дослідження було визначення зносу циліндрових втулок і верхнього поршневого кільця для «стандартного» палива, і палива, що піддалось додатковій обробці за допомогою ультразвукових хвиль.

Вимірювання зносу проводилося для двох крайніх циліндрів, які, як відомо, більш ніж інші (центральні циліндри) схильні до цього явища. Отримані в такий спосіб значення усереднювалися. Крім того, вимірювання лише на двох циліндрах суттєво скорочувало час монтажних робіт, що обмежувалося умовами експлуатації. З цих причин дослідження виконували після 170, 360, 580, 780 і 990 годин роботи двигунів – за якими було можливе тимчасове виведення дизелів з експлуатації. Результати вимірювання зносу циліндрових втулок та поршневих кілець наведено на рис. 2 та 3.

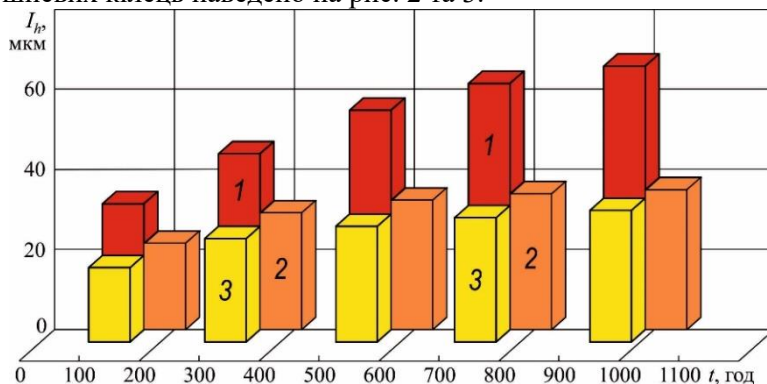


Рис. 2. Корозійний знос циліндрових втулок суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умов експлуатації:

1 – паливо без додаткової обробки (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах)

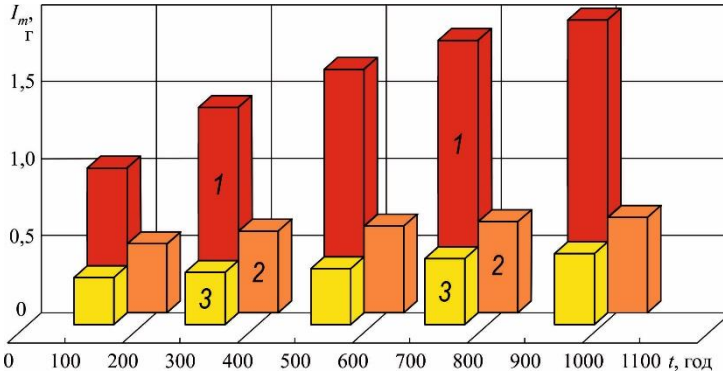


Рис. 3. Корозійний знос поршневих кілець суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умов експлуатації:

1 – паливо без додаткової обробки (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах)

Висновки і перспективи подальших досліджень. Аналіз наведених результатів свідчить про те, що ультразвукова обробка палива призводить до зниження сірчистого зносу деталей ЦПГ, при цьому найбільше зниження цього параметра спостерігається для поршневих кілець, що особливо актуально, враховуючи важливість даного вузла у забезпеченні як якісних процесів стиснення, згоряння та розширення, і надійності роботи сполучення поршень – втулка циліндра. Також необхідно зазначити, що навіть в умовах, що сприяють підвищеному корозійному зносу (робота системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах), значення лінійного зносу циліндрових втулок, так і масового зносу поршневих кілець на 63...65 % менше аналогічних величин, отриманих для дизеля, що працює на пальному без додаткової підготовки.

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність застосування ультразвукової обробки сірчистих палив як додаткового методу паливопідготовки, що сприяє зниженню сірчистого зношення деталей ЦПГ суднового СОД.

Перелік використаних джерел

1. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

2. Petrychenko O., Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

3. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pířtěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>

4. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

5. 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”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. [10.34660/INF.2019.15.36258](https://doi.org/10.34660/INF.2019.15.36258).

6. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

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

8. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

9. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості судових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 76-87.

10. Sagin S., Karianskiy S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Per-

formance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

11. Сагин С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.

12. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

13. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрий Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

14. Сагин С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 206-215. doi: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.07>.

15. Побережний Р.В., Сагин 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](https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-9).

16. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: [10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).

17. 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. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

18. 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 and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

19. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса : НУ "ОМА". – С. 72-80.

20. 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.

21. Руснак Д.Ю., Сагин 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.

22. 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.

23. Сагин С.В., Солодовников В.Г. Ультразвуковая обработка топлива для судовых среднеоборотных дизелей // Austria-science. – 2017. – № 2.– С. 88-93.

24. Солодовников В.Г. Використання ультразвукової обробки в модульних схемах побудови суднових систем паливопідготовки // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 158-168.

25. Солодовников В.Г. Забезпечення технічного стану суднових дизелів шляхом кавітаційної обробки палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 65-69. DOI : 10.31653/smf340.2020.88-94.

26. Solodovnikov V.G. Ultrasonic fuel processing as a method of improving the technical condition and economic characteristics of ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 59-62.