

**271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ**

УДК 665.754:66.067

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359954

**ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ ДВИГУНІВ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ**

<b>Погорлецький Д.С.</b>	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1256-8053">https://orcid.org/0000-0002-1256-8053</a> , e-mail: <a href="mailto:dimon150582@gmail.com">dimon150582@gmail.com</a> ;
<b>Грицук І.В.</b>	д-р техн. наук, професор, Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-7065-6820">https://orcid.org/0000-0001-7065-6820</a> , e-mail: <a href="mailto:grytsuk_iv@ukr.net">grytsuk_iv@ukr.net</a> ;
<b>Худяков І.В.</b>	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-8900-7879">https://orcid.org/0000-0002-8900-7879</a> , e-mail: <a href="mailto:igor.khudiakov563@gmail.com">igor.khudiakov563@gmail.com</a> ;
<b>Філіпішина Л.М.</b>	д-р екон. наук, професор, Первомайський навчально-науковий інститут НУК імені адмірала Макарова, м. Первомайськ, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-9552-1367">https://orcid.org/0000-0001-9552-1367</a> , e-mail: <a href="mailto:ontariofilpi@ukr.net">ontariofilpi@ukr.net</a> ;
<b>Самарін О.Є.</b>	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-2690-7298">https://orcid.org/0000-0002-2690-7298</a> , e-mail: <a href="mailto:samarin162@gmail.com">samarin162@gmail.com</a>

В статті розглядаються питання та актуальні проблеми, покращення якості очищення важкого суднового палива від каталітичних домішок, які є причиною зносу циліндропоршневої групи, суднових двотактних двигунів, за рахунок оптимізації очистки паливної системи та автоматичного керування витратою палива через сепараційну установку. Цілю роботи є демонстрація можливості вдосконалення використовуваних стандартних систем очистки палива (які не мають можливості регулювання витрати палива через сепаратор) двигунів суднових енергетичних установок, з метою створення ефективної системи, для покращення процесу очистки важких сортів суднового палива від каталітичних домішок. В результаті аналізу методів та способів покращення очистки важких сортів суднового палива, обґрунтовано доцільність впровадження у існуючі системи паливопідготовки, додаткову систему автоматичного контролю витрати палива через сепараційну установку, в залежності від витрати палива та навантаження суднового двигуна. У роботі запропонований спосіб покращення очистки суднового важкого палива та сформовано структуру модернізованої системи паливопідготовки, яку пропонується використовувати на стандартних системах очистки палива, що не мають можливості регулювання витрати палива через сепаратор та працюють у стандартному виконанні на 100% витрати палива двигуном; досліджено вплив системи автоматичного регулювання продуктивності сепаратора та обрано оптимальний режим роботи сепараційної установки залежно від витрати палива та навантаження суднового двигуна. Дана ситуація спонукає до пошуку альтернативних способів оптимального використання вже використовуваного та встановленого суднового сепараційного обладнання для покращення видалення каталітичних частинок з важкого суднового палива різних марок та захисту суднових двигунів від зношування. Безперервне керування потоком – простий та ефективний спосіб забезпечення оптимальної продуктивності сепарації палива та його очистки.

**Ключові слова:** система паливопідготовки; суднова енергетична установка; очистка палива; каталітичні домішки; експлуатаційні показники.

**Постановка проблеми**

Сучасний світ стикається з проблемами ефективного користування енергетичними ресурсами та зменшення впливу технологічних процесів в суднових енергетичних установках на навколишнє середовище. На морському флоті уваги потребують енергетичні установки через їх енергоспоживання та безпосередній вплив на навколишнє середовище. Один з аспектів оптимізації роботи суднових енергетичних установок (СЕУ) є покращення роботи системи паливопідготовки суднового двигуна, яка забезпечує ефективну очистку суднового палива та роботу двигуна зі зниженням витрати палива та викидів шкідливих речовин у

відпрацьованих газах суднових двигунів в атмосферу; найсуворіші обмеження стосуються оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), оксидів сірки (SO<sub>x</sub>), які утворюються під час згоряння важких суднових палив.

Залишки каталітичних частинок у судновому паливі є невід'ємною їх часткою, що надходить у двигун, та становлять значну частину зношування компонентів камери згоряння двотактних двигунів. Спроба знизити кількість каталітичних частинок у паливних бункерах згідно зі стандартом ISO 8217:2010/2012 до максимум 60 ppm не призвела до зниження середнього рівня вмісту. Навпаки, ширше використання палива ЕСА призвело до значного збільшення кількості випадків зношення окремих елементів суднових двигунів,

пов'язаних з каталітичними частинками. Каталітичні частки (catalytic fines) – це дрібні, дуже тверді частки, що утворюються у процесі нафтопереробки, які, потрапляючи у двигун, викликають зношування за допомогою так званого трикомпонентного стирання. Таким чином, гільзи циліндрів, канавки поршневих кілець та самі поршневі кільця стають найбільш схильними до зносу компонентів двотактних судових двигунів. Каталітичні частинки можуть швидко зношувати двигун, тому рекомендується використовувати систему очищення судового палива для максимального очищення та видалення каталітичних частинок до їх потрапляння у двигун. Необхідно вжити всіх можливих заходів для зниження ризику потрапляння каталітичних частинок до судового двигуна. Рекомендується підтримувати максимально низький рівень каталітичних частинок перед попаданням до двигуна, який становить 15 ppm, прийнятний на короткий період часу. У зв'язку з цим розробка та вдосконалення існуючих систем паливопідготовки для вирішення цих проблем при конструюванні систем СЕУ стає все більш актуальною. Одним з напрямків у цьому питанні постає покращення якості очистки високосірчистих судових палив від каталітичних домішок (вміст каталітичних частинок в бункерному паливі, становить від 0 до 80 ppm Al + Si в стандарті ISO 8217 (2010-2012 років) і від 0 до 60 ppm в новіших версіях ISO 8217) шляхом модернізації існуючих систем очистки палив судових двигунів [1-4].

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наявних досліджень щодо очистки та підготовки судових палив (різних видів та марок) перед його спалюванням у камері згоряння судового дизельного двигуна демонструє традиційні методи очистки судового палива, якими є відстоювання, сепарація, фільтрація, призначенням яких є видалення різних механічних домішок, води і золи. Дане завдання було сформовано у результаті аналізу впливу різних шкідливих домішок, які є у судовому паливі, на експлуатаційні показники роботи судового дизельного двигуна та методів і засобів паливопідготовки, які використовуються більшістю СЕУ на судах [1, 3-6].

У цьому випадку забруднюючі частинки в паливі осідають, не стикаючись між собою, і на кожну з них діють сила тяжіння або власна вага, підйомна сила середовища та сила опору середовища.

Відстоювання це найпростіший метод очищення судового палива різних марок, але з бігом часу поступово втрачає своє значення і застосовується переважно для палив з в'язкістю до 20 сСт. На даний час один з загальноприйнятих та використовуваних методів очищення судового палива на судні є сепарація, ефективність очищення даним методом різна з огляду на різні марки судових палив та їхній фракційний склад, а також відрізняється для різних партій палива. Основний вплив на ефективність очищення палива методом

сепарації має груповий склад, співвідношення дистильованих та залишкових компонентів, прийняте при його компаундуванні, і вибраний режим сепарації. Під час сепарації відділення домішок здійснюється за рахунок відцентрової сили [1, 4-9].

Результати досліджень [1-3, 5-7, 10-11] показують, що малов'язке паливо має більший ступінь очищення, ніж високов'язке. Так, вміст механічних домішок при сепарації палив з в'язкістю 50...100 сСт стає меншим на 70...80%, а з 180...380 сСт – на 50...60%, паливо, яке має в'язкість більше ніж 380 сСт, – на 20...40%. Вміст води після процесу сепарації в малов'язких паливах зменшується на 100%, середньо в'язких – на 95...100%, а високов'язких – на 75...85%. Приведені значення зниження наявності механічних домішок і води у судовому паливі, супроводжуються втратою паливної частини самого палива, а саме важких компонентів (смола та асфальтени). Дані втрати мають можливість досягати 2...3%, знижуючи теплотворну здатність палива (яка зазвичай становить близько 40–42 МДж/кг), що є суттєвим недоліком сепарації [2-3, 8, 11-12]. Сепарація середньо та високов'язких судових палив загалом проводиться при підігріві у проміжках 80...92°C, що супроводжується посиленням окисних процесів, за рахунок чого підвищується вміст смолистих речовин [2-4, 6, 10]. Очищення палива шляхом фільтрації здійснюється по всьому шляху його прямування з танків до двигуна. Засоби фільтрації палива при цьому діляться на дві основні групи: фільтраційні установки, що самоочищаються, та паливні фільтри [2, 6, 10-11].

В системах паливопідготовки на судні, наряду з загальноприйнятими, використовують альтернативні методи та способи очистки палива для забезпечення збільшення якості високосірчистих палив. До них належить гомогенізація, застосування водопаливних емульсій та присадок в суднове паливо. Суттєвий внесок у розвиток гомогенізації палива та застосування в судових умовах внесла школа українських вчених, яку очолював професор Фомін Ю.Я. Основним завданням, рішення якого забезпечувалося під час гомогенізації судового палива, є збереження теплотворної здатності судових палив, важке суднове паливо (HFO, IFO 380) має теплотворність 40,5...41,0 МДж/кг, дизельне паливо (MGO/MDO) – 42,5...43,5 МДж/кг, це забезпечує енергію для судових двигунів. Широкого застосування у СЕУ гомогенізатори так і не набули, хоча й виготовлялися у малих серіях вітчизняними і зарубіжними виробниками [1, 4, 7-8]. Присадки до судових палив також не знайшли широкого застосування та у більшості використовуються фірмами, які їх виготовляють та мають у власності судна морського флоту різного призначення [1-3, 9, 11-12]. За рахунок використання паливних присадок покращується процес згоряння судового палива у двигуні, але вплив на зношення циліндро-поршневої групи (ЦПГ) та економічні і екологічні експлуатаційні показники роботи судового дизеля є досить неоднозначними.

Ультразвукова обробка суднового палива також розглядалася як варіант модернізації систем паливопідготовки СЕУ [1, 6, 10-11, 13-14]. Даний вид паливопідготовки суднового палива СЕУ розглядався за рахунок створення стійких сумішей палив, які мають різну щільність і структурний склад, його застосування для зниження концентрації сірковмісних компонентів з паралельним впливом на корозійне зношування і екологічні параметри роботи суднового дизельного двигуна під час його експлуатації не вивчалися.

Незважаючи на дослідження, проведені окремими науковими співробітниками й організаціями, більшість із яких стосується оптимізації використання стандартних способів паливопідготовки, не виконано глибокого аналізу альтернативних способів удосконалення систем паливопідготовки суднових двигунів у цілому.

### Мета статті

Дослідження присвячене огляду особливостей експлуатації та покращенню існуючих систем паливопідготовки. Воно полягає в тому, щоб продемонструвати операції щодо покращення процесу очистки суднового палива, яке використовується головною енергетичною установкою судна, за рахунок модернізації системи паливопідготовки. Одним з напрямків удосконалення системи паливопідготовки двигунів СЕУ є інтеграція в їх конструкцію сучасних технологій, які дозволять підвищити адаптованість до умов експлуатації СЕУ, покращать очистку важкого палива від каталітичних частинок і покращать продуктивність самої системи. Розглянуто можливості вдосконалення існуючих систем паливопідготовки двигунів СЕУ з урахуванням простоти експлуатації, економічності та сумісності з існуючими системами очистки палива енергетичних установок суден.

### Виклад основного матеріалу

Доволі багато наукових та експлуатаційних джерел вказують на збільшення концентрації каталітичних частинок у важкому судновому паливі, яке використовується більшістю суднових двигунів [1, 6, 7, 9-10, 15]. DNV Petroleum Services (DNVPS) підтверджує ці твердження, на рис. 1 приведено концентрації каталітичних частинок різних марок суднового палива. З огляду на природоохоронне світове законодавство було збільшено попит на використання низькосірчистих видів суднових палив. Це спонукало світові нафтопереробні заводи збільшити виробництво сумішей важкого та дизельного суднового палива, але, як відомо, сам процес змішування палив є одним з джерел появи каталітичних частинок у суднових паливах. Спочатку зони емісійного контролю впровадили саме в Північній Європі з 2006...2007 років. Дана тенденція спостерігається при зміні правил та появи нових Зон емісійного контролю. Легші марки суднового палива характеризуються меншою концентрацією каталітичних частинок

проти інших важких марок палива (HFO – Heavy Fuel Oil чи судновий мазут) з більшою в'язкістю. Найпоширеніша марка палива RMG 380 сСт або (IFO 380) містить у своєму складі каталітичні частки у діапазоні 1...110 ppm Al+Si, а RMG 700 (Residual Marine Grade) до 400 ppm Al+Si [1-3, 5-6, 8-9, 11]. Концентрація каталітичних частинок більша у марках суднових палив, які мають більш високу в'язкість.

Каталітичні частинки є дуже твердими частинками, які зазвичай складаються зі сполук кремнію та алюмінію. Їхня присутність у судновому паливі є наслідком каталітичного крекінгу.

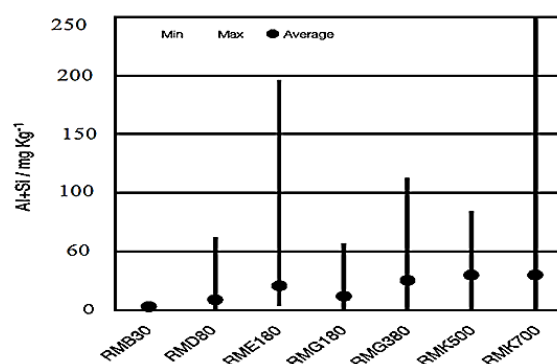


Рис. 1 – Середній показник концентрації каталітичних частинок різних марок суднового палива

Присутність каталітичних частинок небажана, оскільки вони можуть спричинити важке абразивне зношування деталей двигуна, якщо їх не видалити з допомогою системи підготовки палива типу – Alfa Laval AB, BP Marine Ltd & MAN B&W Diesel A/S, або інших. Концентрація частинок вимірюється у частинах на мільйон (ppm). Каталітичні частинки утворюються в результаті розпаду каталізатора, головним чином через абразивне зношування в процесі рециркуляції каталізатора в установці для каталітичного крекінгу. Існують дві причини, що зумовлюють необхідність визначати концентрацію каталітичних частинок у нафтовому паливі. По-перше, необхідно перевірити, чи відповідає перероблена нафта стандарту палива ISO 8217 і, відповідно, чи вона має прийнятний рівень вмісту каталітичних частинок. Другою причиною є необхідність забезпечити постійне підвищення якості палива, що використовується на борту судна, та мінімізувати знос деталей двигуна [1, 6, 10]. ISO 8217 є загальноприйнятим стандартом якості палива. Нова версія стандарту обмежує концентрацію каталітичних частинок у нафтовому паливі, що є на ринку, до 60 ppm Al+Si (алюміній плюс кремній). Виробники морських двигунів в даний час передбачають концентрацію 15 ppm як максимально допустимий рівень вмісту каталітичних частинок в паливі до впорскування. Тому перед тим, як паливо надійде в двигун, необхідно провести належні процедури підготовки палива на борту судна, включаючи сепарацію та фільтрацію, що дозволить знизити

рівень вмісту каталітичних частинок. ISO 10478 є стандартизованим методом визначення вмісту алюмінію та кремнію в нафтовому паливі. Вимір вмісту каталітичних частинок як частина звичайних процедур, що проводяться на судні, є відносно новою, але дуже актуальною концепцією з урахуванням недавнього збільшення частоти негативних наслідків присутності каталітичних частинок у паливі. Незважаючи на те, що неозброєним оком каталітичні частинки практично неможливо побачити, вони досить тверді, щоб сильно пошкодити металеві поверхні двигуна (Alfa Laval, MAN B&W Diesel, 2008) [8, 11-12]. Усі каталітичні частинки, що залишилися в паливі після його очищення у сепараторі, можуть спричинити абразивне зношування та пошкодження двигуна, що може призвести до втрати ефективності роботи та створити небезпечні умови експлуатації. Ось чому вміст каталітичних частинок має бути знижено настільки, наскільки це можливо, за рахунок системи паливопідготовки. Абразивні частинки, потрапляючи в камеру згоряння двотактних двигунів, викликають знос. Тут вони можуть застрягати між поверхнями ковзання, наприклад, між поршневим кільцем і гільзою циліндра або між поршневим кільцем та канавкою кільця.

Досвід показує, що навіть дуже невелика кількість каталітичних частинок може бути шкідливою для двигуна. Тому необхідно вжити всіх заходів для зниження ризику потрапляння каталітичних частинок у двигун. Рекомендується підтримувати максимально низький рівень каталітичних частинок перед подачею до двигуна. Максимальний рівень 15 ppm прийнятний протягом короткого періоду часу, але нормальний рівень має бути нижчим 5 ppm.

Розробники двигунів стверджують, що каталітичні частинки розміром менше ніж 4 мкм є менш шкідливими, ніж великі частинки (СІМАС, Документ № 51, 2013). Проте що вища концентрація каталітичних частинок, то вище ризик створення небезпечних умов роботи. Двигуни, які страждають від високого вмісту каталітичних частинок, швидше за все, вимагатимуть більш частого технічного обслуговування, при цьому підвищується ризик їх ушкодження. Низький рівень вмісту каталітичних частинок можна досягти, постійно забезпечуючи високий рівень очищення палива [1, 6, 8-10, 12, 14]. Наприклад, при бункеруванні палива з вмістом Al+Si 80 ppm його необхідно очистити на борту до 15 ppm, а при бункеруванні палива з вмістом Al+Si 30 ppm – до 6 ppm,

Системи очищення палива на судах складні та вимагають пильної уваги. Важливо, щоб вони були спроектовані та виготовлені таким чином для забезпечення кращого очищення суднового палива. У деяких випадках виявляється, що встановлений паливний сепаратор і підігрівач дуже малі, подача пари в обігрівач обмежена або регулювання температури відбувається дуже повільно. Усі ці фактори знижують ефективність очищення палива [1-6, 8-10, 14]. Система очищення повинна бути спроектована для оптимальної роботи як за

високих, так і за низьких витрат при стабільно високих температурах.

Різні он-лайн системи діагностики, такі як Kittiwake LinerScan та NanoNord Catguard, попереджають про підвищений знос та високий вміст каталітичних частинок. У поєднанні з підвищенням обізнаності та навчанням машинної команди, а також моніторингом та оптимізацією роботи сепараторів, ризик зносу двигуна, спричиненого каталітичними частинками, може бути значно знижений. Крім того, для задоволення потреб в оптимальному очищенні палива можливе використання розробленої системи покращення процесу сепарації, а саме нове компонування бортової системи паливопідготовки та підвищення ефективності роботи сепаратора [1, 3-6, 10, 13, 16-17]. У зв'язку зі зростанням числа випадків пошкодження двигунів через каталітичні частинки організація PrimeServ компанії MAN Diesel & Turbo (MDT) створила «функцію з усунення несправностей, пов'язаних з каталітичними нейтралізаторами», яка пропонує послуги з дослідження стану циліндрів на борту, включаючи проведення лабораторного аналізу пошкоджених поверхонь гільз циліндрів та поршневих кілець [2-6, 10-13].

В роботі для підтвердження запропонованої модернізації системи паливопідготовки використано представлені дослідження, які було проведено підрозділом PrimeServ компанії MAN Diesel & Turbo (MDT). Було проведено багато досліджень, за рахунок яких можливо здобути більш детальні знання про зв'язок між затримкою дрібних каталітичних частинок на деталях двигуна та випадків їх пошкоджень [2, 4, 6, 10]. Каталітичні частки легко розпізнаються в лабораторних умовах за допомогою стереомікроскопа, який надає можливість виміряти розмір кожної з частинок на поверхні деталі (рис. 2).

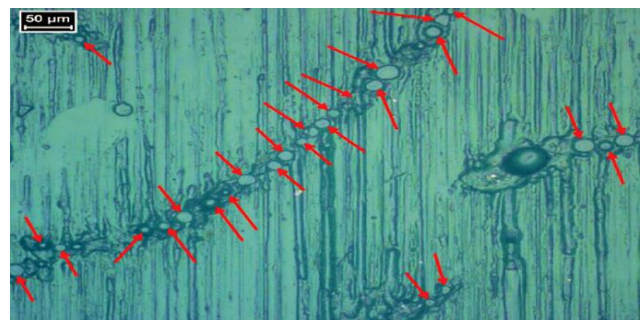


Рис. 2 – Фото каталітичних часток на поверхні гільзи циліндрів

Згідно досвіду, менше ніж 200 каталітичних частинок на  $\text{см}^2$ , які є на поверхні гільзи циліндрів, є нормальним та нешкідливим рівнем. Якщо буде збільшення більш 200 каталітичних часток на  $\text{см}^2$  ( $\text{CF}/\text{cm}^2$ ), збільшиться швидкість зносу. Якщо вміст каталітичних частинок більше, ніж 1000 на  $\text{см}^2$  ( $\text{CF}/\text{cm}^2$ ), результатом є надмірний знос гільзи циліндрів та знос поршневих кілець протягом кількох днів. У крайніх

випадках було виявлено понад 5000 на  $\text{cm}^2$  ( $\text{CF}/\text{cm}^2$ ) [2-3, 6, 10-11].

За три роки роботи під час пошуків та усунення несправностей, пов'язаних з каталітичними домішками, служба MDT's PrimeServ була задіяна загалом 226 разів на судах для діагностики стану циліндрів, через високий знос та поломку поршневих кілець. З вини неякісного палива та можливого відкладення каталітичних домішок. Лише у 16% цих випадків у гільзі циліндрів було виявлено менше 200  $\text{CF}/\text{cm}^2$ . Був зроблений висновок, що каталітичні дрібні частинки не були причиною проблем зі станом циліндрової втулки. Але у 59% випадків вкраплення каталітичних дрібних частинок перевищували 200  $\text{CF}/\text{cm}^2$ , а в середньому становили 1400  $\text{CF}/\text{cm}^2$ . В решті 25% цих випадків було виявлено каталітичну частинку, але водночас мікроструктура поверхні з закритим графітом через подряпини, що є цілком нормальним непрямим ушкодженням під впливом каталітичних частинок [2, 3, 6, 10]. Це означає, що каталітичні частинки були задіяні у 190 з 226 випадків або у 84% усіх випадків. Іншими словами, каталітичні частинки складають значну частину висвітлених випадків високого зносу гільз циліндрів. Оскільки дані базуються на випадках усунення несправностей, що виникають через високий знос, поломки поршневих кілець, невідповідність палива специфікації, результати нічого не говорять про те, якою мірою каталітичні частинки сприяють прийнятним або

дещо підвищеним рівням зносу. Звичайно, знос від дрібних каталітичних частинок не є постійним процесом, він пропорційний вмісту дрібних каталітичних частинок в паливі, яке потрапляє до камери згоряння двигуна [2-3, 6, 10, 13].

Пошкодження від дрібних каталітичних частинок рідко є результатом роботи на неякісному паливі. Більшість сортів палива, що постачаються на судна, відповідає вимогам специфікації ISO 8217. Дрібні каталітичні частинки мають тенденцію осідати в танках та можуть потрапляти в двигун у високих концентраціях під час хитавиці або за непогоди. Таке явище може призвести до пошкодження суднового двигуна внаслідок потрапляння дрібних каталітичних частинок. Знос від каталітичних частинок можна легко виявити, вимірвавши вміст заліза у відібраному маслі з циліндрів. Вміст заліза у відібраному маслі з працюючих циліндрів зазвичай становить від 100 до 200  $\text{mg}/\text{kg}$ . У разі сильного ураження каталітичними частинками вміст заліза може зрости до 1000...2000  $\text{mg}/\text{kg}$  [2-3, 6, 10].

На рис. 3 продемонстровано графічне зображення впливу каталітичних частинок на судновому двигуні MAN-B&W серії ME, задокументований з допомогою обладнання Kittiwake LinerSCAN, яке вимірює вміст частинок заліза. Зверніть увагу, що до впливу каталітичних частинок рівень заліза був нижче 100  $\text{mg}/\text{kg}$ . Під час дії він досягнув піку понад 2500  $\text{mg}/\text{kg}$  [2-3, 6, 10, 12].

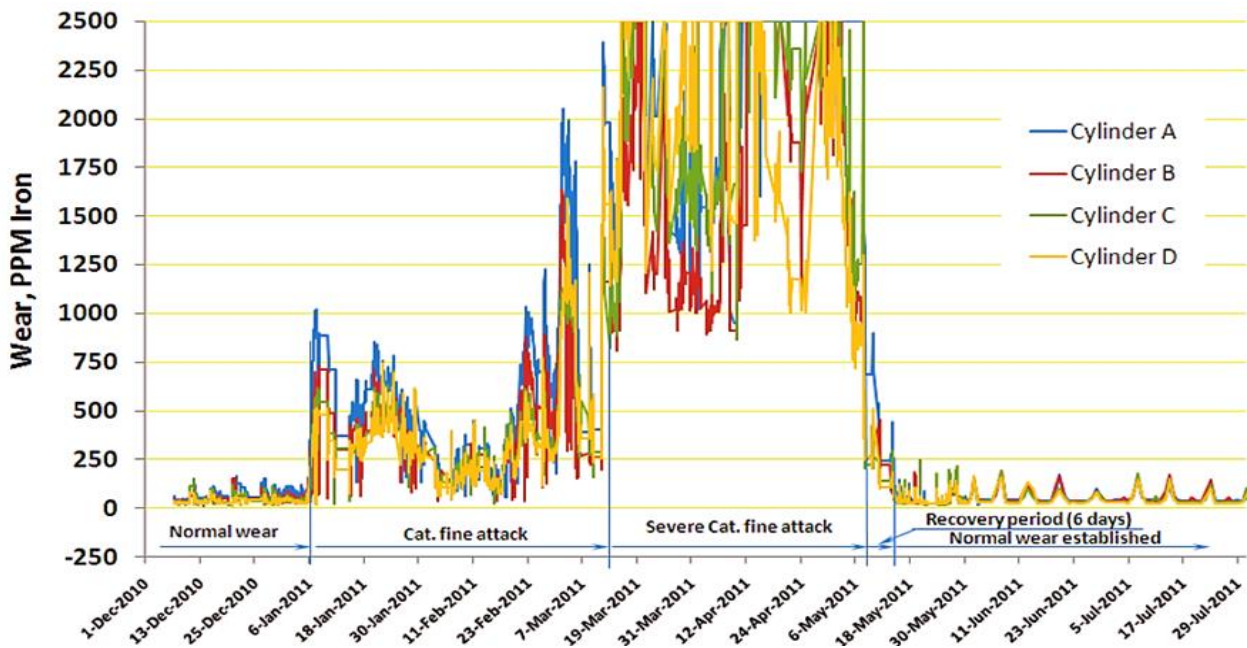


Рис. 3 – Вплив каталітичних частинок на судновому двигуні MAN-B&W S типу ME, виявлене за допомогою обладнання Kittiwake LinerSCAN

Чим менші дрібні каталітичні частинки, тим важче їх відокремити від суднового палива за допомогою сепараторів. Мінімальна товщина масляної плівки між

поверхнею гільзи циліндрів та поршневими кільцями у верхній мертвій точці (ВМТ) становить до 0,5  $\mu\text{m}$ .

Отже, дуже дрібні каталітичні частинки, що потрапляють між поршневим кільцем та гільзою циліндра,

сприятимуть зносу в зоні ВМТ. Для перевірки даних результатів спеціалісти MAN Diesel & Turbo (MDT) додали через продувочні вікна двигуна 4T50ME дрібні тверді частинки оксиду кремнію (1,4 та 8 мкм) та виміряли результуючий знос, згідно наявності продуктів зносу в злитому маслі. Для випробувань були обрані частинки SiO<sub>2</sub>, тому що вони майже ж такі тверді, як дрібні каталітичні частинки, та мають чітко виражену форму і розподіл розмірів. Результати випробування наведено в таблиці 1. Вміст заліза у зразках відібраного масла було проаналізовано за допомогою ICP (Inductive Coupled Plasma, індуктивно зв'язаної плазми) після озолення та кислотного розкладання зразка [2-3, 6, 10, 12-13, 17].

Таблиця 1

Результати тесту ICP

Розмір частинок SiO <sub>2</sub>	Залізо (Fe), виміряне у відібраному циліндровому маслі за допомогою ICP (Inductive Coupled Plasma)
без частинок SiO <sub>2</sub>	52
1 мкм	60
4 мкм	117
8 мкм	415

Результати показують нормальний рівень кількості заліза у відібраному маслі з циліндрів при введенні частинок SiO<sub>2</sub> розміром 1 мкм через продувне повітря та значне збільшення вмісту заліза при введенні частинок SiO<sub>2</sub> розміром 4 мкм та 8 мкм. Ці результати показують, що суднове паливо, яке надходить до двигуна, також має бути очищено від дуже дрібних каталітичних частинок. Збільшення вмісту каталітичних домішок у паливі спостерігалось після впровадження європейських зон ECA, і така ж тенденція спостерігалась у 2012 році та далі при поставках важкого палива з США. Паливо з високим вмістом каталітичних домішок можна знайти у всіх марках важкого палива. Однак у середньому легші марки палива мають нижчу концентрацію каталітичних частинок порівняно з марками з вищою в'язкістю. Варто зазначити, що близько 40% найпопулярнішої марки палива RMG380 містить каталітичні частинки у діапазоні 21...40 мг/кг Al+Si, а близько 20% палива марки RMG380 містять 41...80 мг/кг Al+Si [1, 4, 6, 10, 12, 13, 17].

Беручи до уваги проведені дослідження і отримані результати, існує гостра потреба в покращенні ефективності очищення важкого палива на борту судна через зростання кількості каталітичних частинок у важкому паливі та збільшення кількості зареєстрованих випадків пошкодження суднових двигунів. Загальна ефективність очищення на сучасних судах часто виявляється занадто низькою. Вимога MDT наполягає, що система очищення повинна бути здатною знизити вміст каталітичних частинок Al+Si з 80 мг/кг у бункерному паливі до максимуму 15 мг/кг перед подачею до двигуна. Вміст каталітичних частинок Al+Si у

бункерному паливі з вмістом менше 80 мг/кг має бути знижено перед подачею до двигуна. Це означає, що загальна ефективність очищення має становити щонайменше 80...85% [3, 6, 10, 13-15, 17].

Дослідження, які проводяться компанією DNV Petroleum Services з 2009 року по теперішній час, на основі отриманих результатів перевірки паливної системи (FSC), показали, що в середньому системи очищення суднового палива видаляють 72% каталітичних частинок з палива, яким букерується судно. З огляду на ці дані необхідно приділяти більше уваги системі очищення палива на борту судна та вдосконалювати її загалом [2-4, 6, 10, 17]. Було зроблено висновок при опрацюванні отриманих даних про те, що для підвищення ефективності очищення важкого палива від каталітичних частинок на судні необхідно враховувати три основні фактори: температура сепарації; витрати через сепаратор; експлуатація та конструкція паливних танків. Підвищення температури важкого палива, що проходить через сепаратор, призведе до зниження його в'язкості, що позитивно позначиться на ефективності проведеної сепарації. Наприклад, для важкого палива з в'язкістю 37,5 мм<sup>2</sup>/с при 98°C підвищення температури до 120°C призведе до збільшення в'язкості до 18,8 мм<sup>2</sup>/с. Це значне зниження в'язкості призведе до значного полегшення відокремлення каталітичних частинок від важкого палива [1-8, 10-11, 18].

З огляду на можливість регулювання витрати палива через паливний сепаратор, який у стандартному виконанні розрахований на 100% витрати палива двигуном і має постійні значення для різних запасів суднового палива, слід зазначити, що у сучасних умовах експлуатації суднових двигунів, які рідко працюють на 100% навантаження, зменшення витрати палива під час його проходження через сепаратор (контроль і регулювання витрати палива) відносно витрати палива судновим двигуном дозволить підвищити ефективність роботи сепараційної установки, оскільки паливо у сепараторі знаходиться довше та сепаруватиметься краще. Оскільки сьогодні судна переважно рухаються на малих швидкостях, існує потенціал для збільшення ефективності сепарації суднового палива за рахунок застосування автоматичного керування потоком залежно від фактичної витрати палива двигуном.

Використання систем онлайн-моніторингу і виявлення каталітичних частинок відкриває можливості для покращення контролю та оптимізації роботи бортових суднових систем паливопідготовки [4, 6, 9-10, 12, 17-19].

Ситуація, яка склалася на даний час з оптимізацією та покращенням способів очистки суднового палива, спонукає до пошуку нових методів очистки та оптимального використання вже встановленого суднового сепараційного обладнання для покращення видалення каталітичних частинок з важкого палива та захисту суднових двигунів від зношування. Безперервне керування потоком – простий і ефективний спосіб для підтримання оптимальної продуктивності сепарації

під час очистки та підготовки палива перед подачею його до камери згоряння двигуна. Беручи до уваги, що більшість суден постійно не працюють на максимально допустимій швидкості, існує можливість знизити витрати та збільшити ефективність сепарації судового палива на судні під час експлуатації.

Сьогодні рекомендується використовувати всю встановлену продуктивність відцентрових сепараторів та паралельно запускати резервні сепаратори; ручне керування потоком інколи використовується. Системи автоматичного керування потоком відцентрового сепаратора досі рідкісні, ведуться роботи з проектування даних систем, які автоматично регулюють витрату сепаратора в залежності від навантаження двигуна [1, 9-12, 15, 17-18]. У даній роботі, з огляду на розглянуті особливості та приведені результати досліджень різних судових організацій, пропонується приклад модернізації системи паливопідготовки за рахунок

застосування системи керування насосами з частотно-регульованим приводом на лінії судової паливопідготовки, що дозволяє відрегулювати витрату палива, яке проходить через сепараційну установку, відповідно до фактичного навантаження на судовий двигун; її можливо використовувати на стандартних паливних сепараційних установках для покращення очистки палива від каталітичних частинок.

Частотно-регульований привід використовується для керування швидкістю електродвигуна паливного насоса, що дозволяє проводити регулювання подачі відповідно до фактичного навантаження двигуна. Під час регулювання фіксованої витрати, при якій потік перекривається, застосування змінної витрати зменшує енергоспоживання насоса, а також сепараційної установки. Регулювання витрати двигуна, працюючого на 75% навантаження, збільшить ефективність сепарації (рис. 4).

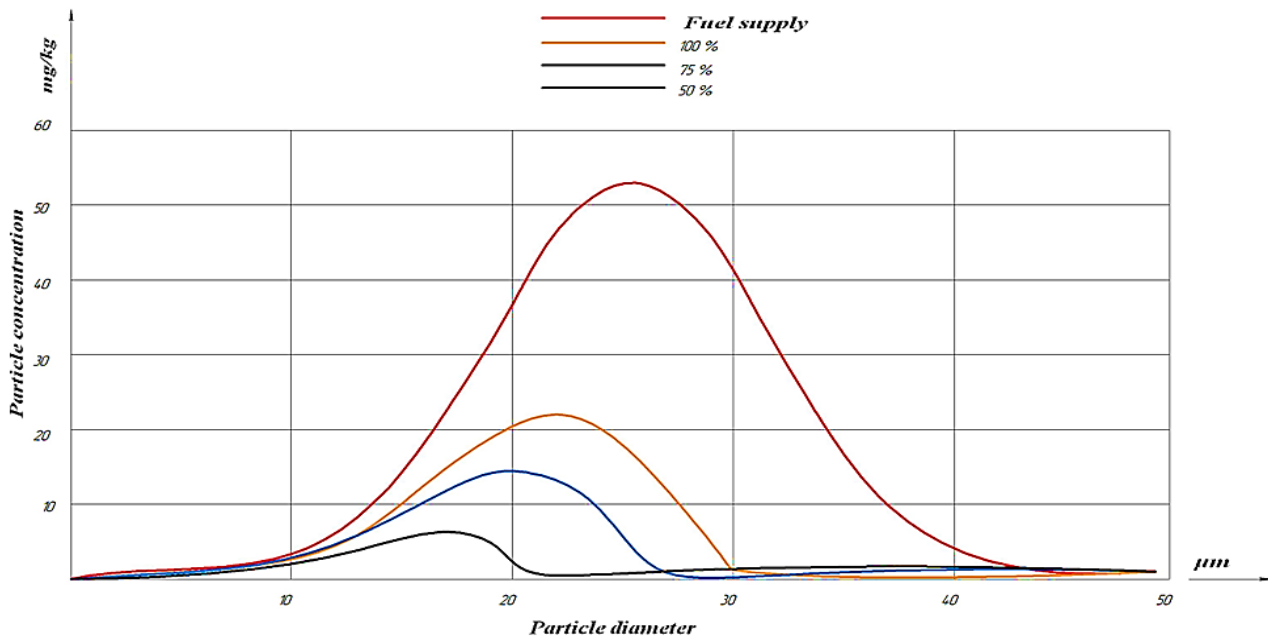


Рис. 4 – Вплив витрати на ефективність сепарації палива

Для покращення роботи системи паливопідготовки та процесу сепарації палива пропонуємо модернізувати режим подачі палива до сепараційної установки під час її експлуатації. Зменшення та утримання на даному рівні подачі палива до сепараційної установки є гарним рішенням для підтримання більш ефективного режиму сепарації важких сортів судового палива. Ця вимога конструктивно виконується за рахунок встановлення додаткового насоса на лінії паливопроводу, біля відстійної цистерни з змонтованим регульованим клапаном. Згідно економічних міркувань система є недоцільною через те, що насос працює з повною продуктивністю та потужністю. Існує спосіб регулювання та керування подачею палива до сепараційної установки за рахунок зменшення продуктивності самого

насосу, що призводить до зменшення його потужності. Максимальна продуктивність сепаратору у відсотках від номінального значення приведена в таблиці 2.

В системі паливопідготовки судового двигуна MAN-B&W 6S80ME-C встановлено сепараційні установки фірми Alfa-Laval типу S816 [1, 4, 6-8, 10, 15-18], які не обладнані системою регулювання подачі палива до сепаратора залежно від потреби палива судовим двигуном.

Пропонується застосування частотно-регульованого приводу для керування подачею палива до сепараційної установки під час її експлуатації з необхідною продуктивністю для надання таких переваг:

- зменшення утворення відстою у судових цистернах запасу палива;

- підвищення гнучкості роботи сепараційної установки, допускається очищення палива густиною 1010 кг/м<sup>3</sup> при 15°C та в'язкістю 700 сСт;
- зменшується трудомісткість обслуговування сепараційної установки та системи у цілому;
- зменшується виникнення аварійних сигналів, відсутній водяний затвор;
- збільшується теплота згоряння палива, підвищується економічність використання головного та допоміжних судових двигунів;
- керування насосами згідно фактичної їх потреби покращує енергоспоживання. За рахунок зменшення швидкості на 20% зменшується енергоспоживання вдвічі.

Пропонується встановлення частотного перетворювача (регулятора) виконати згідно приведеної схеми (рис. 5).

Таблиця 2

Рекомендована продуктивність сепаратора

В'язкість сСт при 50 °С	Максимальна продуктивність, у % від номінальної	Температура сепарації, °С
30	62	90...98
40	62	85...98
60	47	85...98
100	45	90...98
180	31	90...98
380	26	98
460	22	98
600	18	98

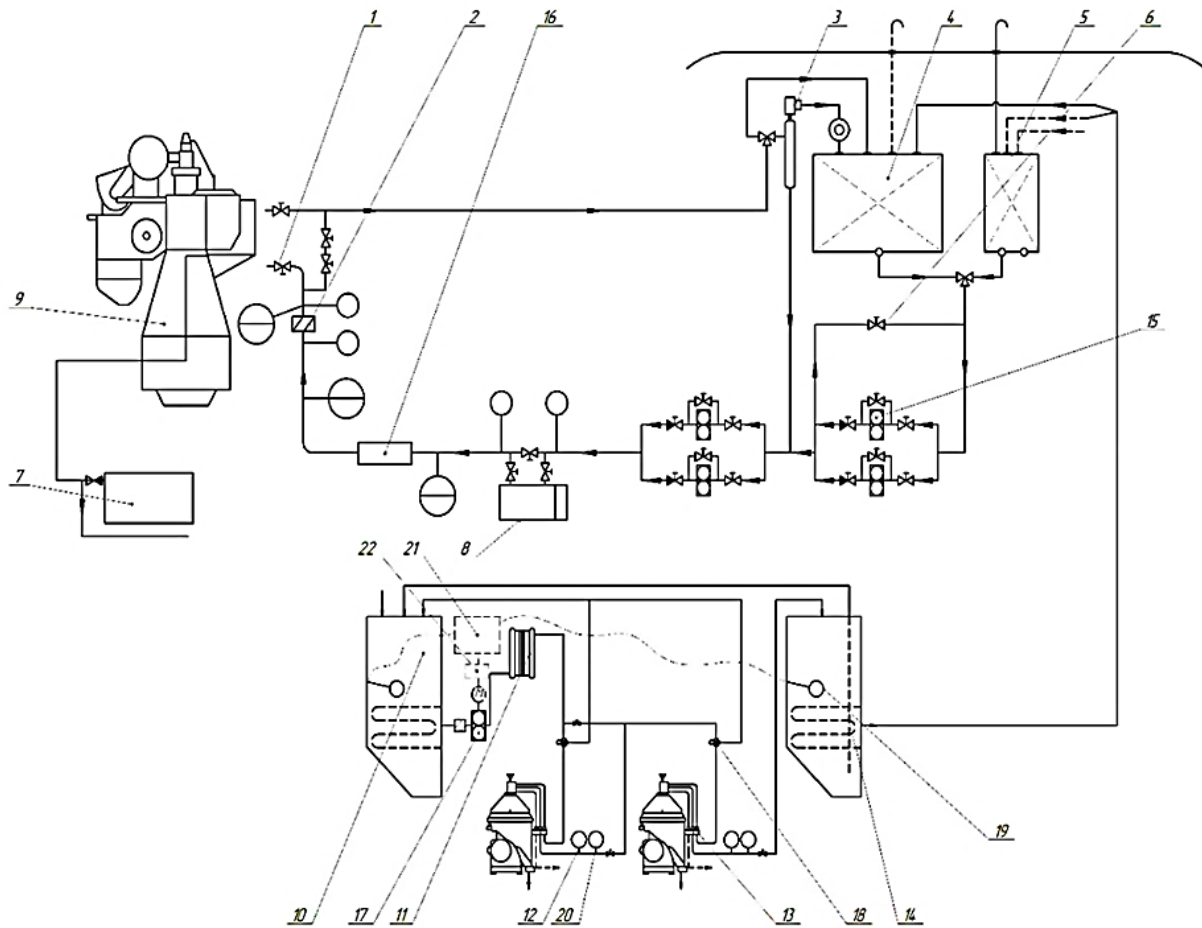


Рис. 5 – Паливна система судового двигуна: 1 – клапан з дистанційним керуванням; 2 – фільтр паливний; 3 – деаераційний клапан; 4 – розхідна цистерна важкого палива; 5 – розхідна цистерна дизельного палива; 6 – клапан; 7 – дренажна цистерна; 8, 11 – підігрівач; 9 – головний судовий двигун; 10 – відстійна цистерна; 12 – манометр; 13 – сепараційна установка; 14 – розхідна цистерна; 15 – насос; 16 – віскозиметр; 17 – насос; 18 – регулювальний клапан; 19 – датчик рівня палива; 20 – температурний датчик; 21 – система контролю рівня палива; 22 – частотно-регульований привід

Керування частотно-регульованим приводом насоса відбувається за допомогою датчика рівня А2, який знаходиться у витратній цистерні, та алгоритму необхідної продуктивності сепаратора, запрограмованого у частотному перетворювачі, залежно від положення датчика рівня рідини палива. Залежно від положення датчика рівня у паливній витратній цистерні частотний перетворювач програмується згідно продуктивності сепаратору від 18% до 100%. Продуктивність сепаратора залежно від виду палива (в'язкості палива) наведена у табл. 2. Це необхідно для забезпечення режимів роботи сепаратора залежно від потужності головного двигуна. Частотно-регульований привід орієнтований на показники датчика рівня у витратній цистерні, необхідності його під'єднання до блоку керування головним двигуном немає. Це надає можливість реалізації даної модернізації на двигунах різних типів, з електронним керуванням чи з аналоговим. Звідси висновок, що система паливopідготовки є незалежною від самого двигуна. Алгоритм роботи системи представлено у вигляді таблиці 2, де наведено продуктивність сепаратора в залежності від положення датчика рівня палива у витратній цистерні («MAX» та «MIN»).

Частотно-регульований привід має можливість аварійного запуску і зупинки, за рахунок цього забезпечується надійність роботи паливного сепаратора у випадку порушення показників датчика рівня.

Використання системи керування насосами з частотно-регульованим приводом на паливній лінії дозволяє відрегулювати витрату палива у паливних сепараторах згідно навантаження суднового двигуна. Під час зниження подачі палива до сепараційної установки поділ фракцій стає більш ефективним, менше енергії споживається подаючими насосами і самими сепараторами. Ефективність сепарації збільшується, тому що паливо в барабані сепаратора залишається довше, це дозволяє відокремлювати частки з нижчою швидкістю осадження з нафтопродуктів [1, 2, 5-6, 10, 12, 16-18].

Додатковим параметром, який може бути змінений для підвищення ефективності сепарації палива, є в'язкість нафтопродукту [3, 4, 6]. У міру підвищення температури палива його в'язкість зменшується. Якщо температура знижується до 90°C, витрата палива повинна знизитися до 72% номінальної витрати, для підтримання ефективності сепарації на тому ж рівні, при 98°C, а за досягнення температури 85°C витрату необхідно буде понизити до 50%.

На рис. 6 продемонстровано режим роботи паливної сепараційної установки до модернізації і після. Показано режим максимальної продуктивності паливного сепаратора після модернізації, а також приведене поле режимів роботи паливного сепаратора; для наочності додано графічні дані витрати палива головним двигуном на різних режимах.

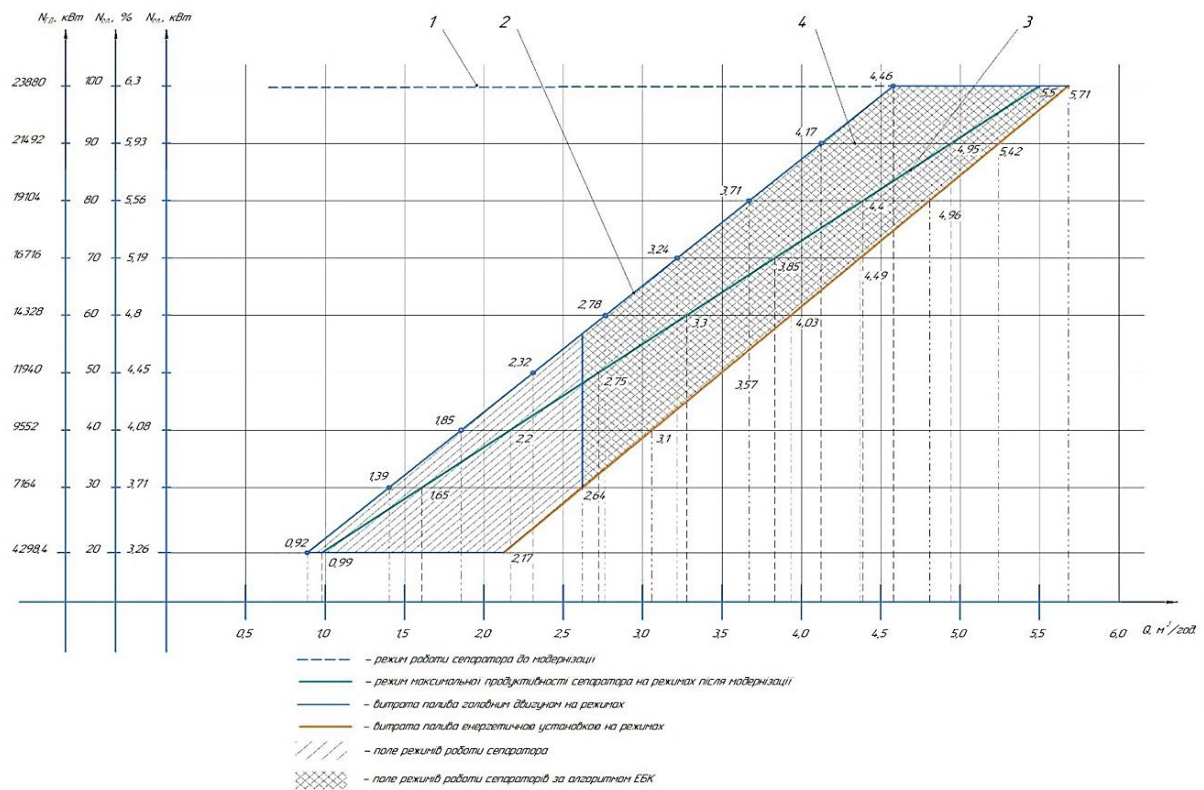


Рис. 6 – Результати розрахунків потужності електродвигуна в залежності від необхідної продуктивності паливного сепаратора: 1 – режим роботи сепаратора до модернізації; 2 – режим максимальної продуктивності сепаратора на режимах після модернізації; 3 – поле режимів роботи сепаратора; 4 – витрата палива головним двигуном на режимах

Використання частотно-регульованого приводу, а також можливість вибору оптимального режиму роботи сепаратору, дозволить:

- покращити якість сепарації різних сортів суднового палива;
- збільшити гнучкість роботи сепараційних установок під час очистки різних сортів суднового палива;
- зменшити витрату електроенергії на систему паливopідготовки;
- частотно-регульований привід дозволяє керувати електродвигуном насосу для регулювання подачі відповідно до навантаження суднового двигуна;
- зміна витрати суднового двигуна, працюючого на 75% свого навантаження, збільшить якість очистки суднового палива різних сортів.

### Висновки

Розглянуто загальноприйняті технологічні засоби, які застосовуються для очистки важкого палива від каталітичних домішок у системах паливopідготовки суднових двигунів. Досліджено основні вимоги до систем паливopідготовки двигунів суднових енергетичних установок в різних умовах експлуатації та проведено аналіз існуючих методів та способів очищення важкого суднового палива від каталітичних домішок для його використання в судновій енергетичній установці. Запропоновано концептуальний проєкт для вдосконалення існуючих систем паливopідготовки двигунів суднових енергетичних установок з урахуванням простоти експлуатації, економічності та сумісності з існуючими системами очищення палива енергетичних установок суден морського флоту, що демонструє можливість підвищення ефективності експлуатації системи паливopідготовки та покращення сепарації важкого палива для зменшення кількості каталітичних частинок, які містяться у важкому паливі. Доведено, що безперервне керування витратою це простий та ефективний спосіб забезпечення оптимальної продуктивності сепарації важкого палива. Враховуючи те, що судна не завжди працюють на максимально допустимій швидкості, а також проєктній швидкості, це дозволить знизити витрату та підвищити ефективність сепарації палива.

### Перелік використаних джерел

- [1] Особливості експлуатації лубрикаторної системи мащення суднових малооборотових двигунів / Погорлецький Д. С., Грицук І. В., Худяков І. В., Самарін О. Є. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 167-178. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310707>.
- [2] SL2017-638. Cylinder Liner Life. Integrated Cylinder Lubricant Feed Rate. MAN B&W Two-stroke Engines : Service Letter / MAN Energy Solutions. 2017. 11 p. URL: [https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2017-638.pdf?sfvrsn=607695b4\\_4](https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2017-638.pdf?sfvrsn=607695b4_4) (дата звернення: 09.12.2025).
- [3] MAN B&W S80ME-C8.2-GI IMO Tier II : Project Guide. Edition 0.5. Copenhagen : MAN Diesel & Turbo, 2014.
- [4] Bashan V., Demirel H., Celik E. Evaluation of critical problems of heavy fuel oil separators on ships by best-worst method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2022. Vol. 236, iss. 4. Pp. 868-876. DOI: <https://doi.org/10.1177/14750902221097268>.
- [5] Особливості використання датчика концентрації заліза у маслі для безперервного моніторингу технічного стану суднового дизельного двигуна / І. В. Худяков та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 114-121. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288180>.
- [6] Onboard Fuel Oil Cleaning, the ever neglected process. How to restrain increasing Cat-fine damages in two-stroke Marine Engines / H. Rolsted, C. Rojgaard, O. Jensen, M. Englund. URL: <https://nanonord.com/wp-content/uploads/2023/08/onboard-fuel-oil-journal.pdf> (дата звернення: 18.12.2025).
- [7] The Standard. A Master's Guide to: Using Fuel Oil Onboard Ships. ABS, 2012. 74 p.
- [8] ISO 8217:2017. Petroleum products – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels. Sixth edition. 2017. 23 p.
- [9] Sagin S. V., Solodovnikov V. G. Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines. *Modern Applied Science*. 2015. Vol. 9. No. 5. Pp. 269-278. DOI: <https://doi.org/10.5539/mas.v9n5p269>.
- [10] ISO 8217:2024. Products from petroleum, synthetic and renewable sources – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels. Seventh edition. 2024. 52 p.
- [11] The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook : Technical reference booklet. 2018 Edition. URL: [https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/refuel/Bluebook\\_en.pdf](https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/refuel/Bluebook_en.pdf) (дата звернення: 09.11.2025).
- [12] Особливості протидії низькотемпературній корозії гільзи циліндрів суднових малооборотових двигунів / Д. С. Погорлецький та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 122-130. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288181>.
- [13] CIMAC: Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulphur Distillate Diesel. 2013. 23 p.
- [14] Sagin S. V., Semenov O. V. Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors. *American Journal of Applied Sciences*. 2016. Vol. 13. No. 2. Pp. 200-208. DOI:

<https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.200.208>.

- [15] Солодовніков В. Г. Вплив сірчистих сполук палива на робочий процес судових дизелів. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : зб. матер. III Міжнар. наук.-техніч. конфер., м. Миколаїв, 19-21 листопада 2014 р.
- [16] Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations onboard ships: The case of HFO purifier overhauling / Kandemir C., Celik M., Akuz E., Aydin O. *Applied Ocean Research*. 2019. Vol. 88. Pp. 317-325. DOI:

<https://doi.org/10.1016/J.APOR.2019.04.019>.

- [17] Сагін С. В., Заблоцький Ю. В. Використання паливних присадок у судових дизелях. *Суднові енергетичні установки*. 2012. № 30. С. 180-186.
- [18] Chybowski L., Myśków J., Kowalak P. Analysis of fuel properties in the context of the causes of three marine auxiliary engines failure – a case study. *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 150. Article 107362. DOI: [https://doi.org/10.1016/j-eng-failanal.2023.107362](https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2023.107362).

## IMPROVEMENT OF THE FUEL PREPARATION SYSTEM OF ENGINES OF POWER PLANTS OF NAVY VESSELS

<b>Pohorletskyi D.S.</b>	<i>PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1256-8053">https://orcid.org/0000-0002-1256-8053</a>, e-mail: <a href="mailto:dimon150582@gmail.com">dimon150582@gmail.com</a>;</i>
<b>Gritsuk I.V.</b>	<i>D.Sc. (Engineering), professor, Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-7065-6820">https://orcid.org/0000-0001-7065-6820</a>, e-mail: <a href="mailto:gritsuk_iv@ukr.net">gritsuk_iv@ukr.net</a>;</i>
<b>Khudiakov I.V.</b>	<i>PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-8900-7879">https://orcid.org/0000-0002-8900-7879</a>, e-mail: <a href="mailto:igor.khudiakov563@gmail.com">igor.khudiakov563@gmail.com</a>;</i>
<b>Filipishyna L.M.</b>	<i>D.Sc. (Economic Sciences), professor, Pervomaisk Polytechnic Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding (NUS), Pervomaisk, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-9552-1367">https://orcid.org/0000-0001-9552-1367</a>, e-mail: <a href="mailto:ontariofilpi@ukr.net">ontariofilpi@ukr.net</a>;</i>
<b>Samarin O.E.</b>	<i>PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-2690-7298">https://orcid.org/0000-0002-2690-7298</a>, e-mail: <a href="mailto:samarin162@gmail.com">samarin162@gmail.com</a></i>

*This article examines issues and current challenges related to improving the quality of heavy marine fuel purification by removing catalytic impurities – which cause wear in the cylinder-piston group of marine two-stroke engines – through the optimization of the fuel system and automatic fuel flow control via a separation unit. The objective of this work is to demonstrate the possibility of improving the standard fuel purification systems currently in use (which lack the ability to regulate fuel flow through a separator) in marine power plant engines, with the aim of creating an effective system to enhance the purification process of heavy marine fuels from catalytic impurities. As a result of analyzing methods and approaches to improving the purification of heavy marine fuels, the feasibility of introducing an additional system for automatic control of fuel flow through a separation unit into existing fuel preparation systems has been substantiated, depending on fuel flow and the load of the marine engine. This paper proposes a method for improving the purification of marine heavy fuel oil and outlines the structure of a modernized fuel preparation system. This system is intended for use in standard fuel purification systems that lack the ability to regulate fuel flow through the separator and operate at 100% of the engine's fuel consumption. The impact of the automatic separator capacity control system was investigated, and the optimal operating mode of the separation unit was selected based on fuel flow and ship engine load. This situation prompts a search for alternative methods to optimally utilize existing and installed ship separator equipment to improve the removal of catalytic particles from various grades of heavy marine fuel and protect ship engines from wear. Continuous flow control is a simple and effective way to ensure optimal fuel separation and purification performance.*

**Key words:** fuel preparation system; ship power plant; fuel purification; catalytic additives; operational parameters.

### References

- [1] D. Pohorletskyi, I. Gritsuk, I. Khudiakov, and O. Samarin, "Osoblyvosti ekspluatatsii lubrykatornoj systemy mashchennia sudnovykh maloobertovykh dyvuniv" ["Features of the operation of the lubrication system for lubricating ships' low-speed engines"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, vol. 48, pp. 167-178, 2024. doi: **10.31498/2225-6733.48.2024.310707**. (Ukr.)
- [2] SL2017-638. Cylinder Liner Life. Integrated Cylinder Lubricant Feed Rate. MAN B&W Two-stroke Engines : Service Letter / MAN Energy Solutions. 2017. 11 p. [Online]. Available: [https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2017-638.pdf?sfvrsn=607695b4\\_4](https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2017-638.pdf?sfvrsn=607695b4_4). Accessed on: December 09, 2025.
- [3] *MAN B&W S80ME-C8.2-GI IMO Tier II : Project*

- Guide, 0.5 ed., Copenhagen, Denmark: MAN Diesel & Turbo, 2014.
- [4] V. Bashan, H. Demirel, and E. Celik, "Evaluation of critical problems of heavy fuel oil separators on ships by best-worst method," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2022, vol. 236, iss. 4, pp. 868-876. doi: **10.1177/14750902221097268**.
- [5] I. Khudiakov, I. Gritsuk, D. Pohorletsky, V. Chernenko, and A. Polishuk, "Osoblyvosti vykorystannia datchyka kontsentratsii zaliza u masli dlia bezperervnogo monitorynhu tekhnichnoho stanu sudnovoho dyzelnoho dvyhuna" ["Use of iron in oil concentration sensor for continuous monitoring of marine diesel engine technical condition"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, vol. 46, pp. 114-121, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.46.2023.288180**. (Ukr.)
- [6] H. Rolsted, C. Rojgaard, O. Jensen, and M. Englund, Onboard Fuel Oil Cleaning, the ever neglected process. How to restrain increasing Cat-fine damages in two-stroke Marine Engines. [Online]. Available: <https://nanonord.com/wp-content/uploads/2023/08/onboard-fuel-oil-journal.pdf>. Accessed on: December 18, 2025.
- [7] *The Standard. A Master's Guide to: Using Fuel Oil Onboard Ships*. ABS, 2012. 74 p.
- [8] *Petroleum products – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels*, ISO 8217:2017, 6th edition, 2017.
- [9] S. V. Sagin, and V. G. Solodovnikov, Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines, *Modern Applied Science*, vol. 9, no. 5, pp. 269-278, 2015. doi: **10.5539/mas.v9n5p269**.
- [10] *Products from petroleum, synthetic and renewable sources – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels*, ISO 8217:2024, 7th edition, 2024.
- [11] The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook : Technical reference booklet. 2018. [Online]. Available: [https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/refuel/Blue-book\\_en.pdf](https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/refuel/Blue-book_en.pdf). Accessed on: November 09, 2025.
- [12] D. Pohorletsky, I. Gritsuk, I. Khudiakov, V. Chernenko, and A. Polishuk, "Osoblyvosti protyidii nyzkotemperaturnii korozii hilzy tsylindriv sudnovykh maloobertovykh dvyhuniv" ["Features of low-temperature corrosion protection of cylinder sleeves of ship low-speed engines"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, vol. 46, pp. 122-130, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.46.2023.288181**. (Ukr.)
- [13] *Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulphur Distillate Diesel*. CIMAC, 2013.
- [14] S. V. Sagin, and O. V. Semenov, "Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 13, no. 2, pp. 200-208, 2016. doi: **10.3844/ajassp.2016.200.208**.
- [15] V. H. Solodovnikov, "Vplyv sirchystykh spolyuk palyva na robochyi protses sudnovykh dyzeliv" ["The influence of fuel sulfur compounds on the working process of marine diesel engines"], in *Proc. of the III Int. Sci.-Techn. Conf. «Current state and problems of engine engineering»*, Nov. 19-21, 2014. (Ukr.)
- [16] C. Kandemir, M. Celik, E. Akyuz, and O. Aydin, "Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations onboard ships: The case of HFO purifier overhauling," *Applied Ocean Research*, vol. 88, pp. 317-325, 2019. doi: **10.1016/J.APOR.2019.04.019**.
- [17] S. V. Sahin, and Yu. V. Zablotskyi, "Vykorystannia palyvnykh prysadok u sudnovykh dyzeliakh" ["Use of fuel additives in marine diesel engines"], *Sudnovi enerhetychni ustanovky – Ship power plants*, № 30, pp. 180-186, 2012. (Ukr.)
- [18] L. Chybowski, J. Myśków, and P. Kowalak, "Analysis of fuel properties in the context of the causes of three marine auxiliary engines failure – a case study," *Engineering Failure Analysis*, vol. 150, article 107362, 2023. doi: **10.1016/j.engfailanal.2023.107362**.

Стаття надійшла 12.01.2026

Стаття прийнята 05.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

**Цитуйте цю статтю як:** Покращення роботи системи паливопідготовки двигунів енергетичних установок суден морського флоту / Д. С. Погорлецький та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 167–178. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359954>.