

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ ДІАГНОСТУВАННЯ МОТОРНОГО МАСТИЛА

Наведені результати досліджень щодо визначення методу, який сприяє ресурсозберігаючій експлуатації суднових дизелів. Зазначено, що під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту постійне стає завдання забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів, що на них встановлені та виконують функції головних та допоміжних двигунів. Виникнення цього завдання зумовлюється процесами тертя та зношування, що виникають та відбуваються під час зворотно-поступального руху поршня у циліндрі дизеля та обертального руху колінчатого валу. У першому випадку відбувається знос у трибологічній системі поршневі кільця – втулка циліндра, у другому – у трибологічній системі колінчатий вал – вкладиш підшипника ковзання. Найбільш зручним та ефективним методом контролю стану поверхонь тертя, що входять до складу вищевказаних трибологічних систем, є аналіз та діагностування моторного мастила, яке використовуються у циркуляційній системі мащення. З метою повного аналізу хімічних елементів, що знаходяться у мастилі, виконують його аналіз у берегових дослідницьких лабораторіях, для цього, як правило, використовується спектральний аналіз. Недоліком контролю показників у береговій дослідницькій лабораторії є певна затримка у отриманні його результатів. В деяких випадках це може сприяти несвоєчасному прийняттю управлінських рішень або виконанню відповідних технологічних операцій. Через це, як додатковий спосіб контролю експлуатаційних характеристик мастила безпосередньо на судні та, відповідно, більш швидкого отримання результатів, виконувався аналіз спектрів горіння моторного мастила. З цією метою використовувався спектральний газовий аналізатор FlirX6530sc з вбудованою інфрачервоною камерою контролю. При цьому забезпечувався контроль так самих характеристик (*Wear Elements* та *Contaminant Elements*), визначення яких виконувалось у береговій дослідницькій лабораторії. Збіг результатів діагностування стану моторного мастила, що виконувалось за допомогою запропонованого спектральний газового аналізатору та результатів, що були отримані під час досліджень у берегової лабораторії, дозволяє рекомендувати метод визначення експлуатаційних характеристики моторного мастила за допомогою судового спектральний газового аналізатору як метод попереднього аналізу. Результати, які при цьому можуть бути отримані, з високою точністю характеризують показники моторного мастила. Безпосередньо метод діагностування моторного мастила за допомогою газового аналізу сприяє забезпеченню ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів.

Ключові слова: діагностування, знос, контактні поверхні, мащення, морський транспорт, моторне мастило, система мащення, судовий дизель, тертя, технічний стан

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Експлуатація суден морського та внутрішнього водного транспорту нерозривно пов'язана з забезпеченням надійності роботи судової енергетичної установки та, насамперед, суднових дизелів – головного, що забезпечує рух судна, та допоміжних, завдяки яким механічна енергія, що генерується двигуном внутрішнього згорання, перетворюється є електричну та далі забезпечує роботу суднових машин, механізмів та іншого обладнання [1-3]. З надійністю та ефективністю роботи суднових дизелів також визначає живучість судна, його морехідні якості та ходові характеристики [4-6]. Разом з забезпеченням надійності суднових дизелів виникає завдання забезпечення їх ресурсозберігаючої експлуатації [7-9]. При цьому під ресурсозбереженням розуміють не лише зниження витрати палива та мастила, але також зменшення незворотних витрат енергії та збільшення тривалості знаходження суднових дизелів у належному технічному стані [10-12]. Через це

контроль та діагностування технічного стану суднових дизелів (як головного, також і допоміжних) є актуальним завданням, розв'язання якого забезпечується представниками суднової машинної команди та гарантується рівнем їх професійної кваліфікації. Автономність плавання морських суден накладає додаткові вимоги до надійності суднових дизелів та іншого суднового обладнання, що суттєво відрізняє умови експлуатації засобів морського транспорту від інших, в першу чергу залізничного та автомобільного [13-15].

Під час експлуатації суднових дизелів, як головної складової енергетичної установки, виникають дефекти їх основних вузлів. При цьому основну небезпеку представляють дефекти циліндрової групи та підшипників руху [16-18].

Типовими дефектами циліндрових втулок суднових дизелів є підвищений або нерівномірний знос та задири її поверхні. Через підвищені температурні напруги в поверхнях циліндрових втулок також можуть виникати тріщини, найбільш характерним місцем утворення яких є її верхня частина.

Основною причиною підвищеного зносу циліндрових втулок є розрив або порушення цілісності плівки мастила на відносно невеликій площі дзеркала циліндра, які виникають як результат окислення мастила у тонкому шарі. Крім цього, мастильна плівка піддається дії випускних газів та твердих продуктів неповного згоряння палива.

До основних можливих причин задири, що виникають на поверхнях циліндрових втулок, відносять порушення режимів мащення, невідповідність структури металу поршневих кілець та втулки, зміна геометрії головки поршня, несправності паливної апаратури та пов'язані з цим порушення у впорскуванні палива в циліндр [19-21].

Зі всіх деталей циліндрової групи аварійні пошкодження, дефекти та відмови поршнів є найбільш небезпечними, через те, що у більшості випадків призводять до важких аварій всього двигуна. До характерних дефектів поршневої групи суднових дизелів відносяться: вигорання денця поршню та утворення тріщин, знос та пошкодження поршневих кілець, відкладення нагарів у поршневих канавках, на поверхні поршневих кілець та на головці поршню.

На інтенсивні зноси та поломки поршневих кілець приходиться найбільша кількість несправностей циліндрової групи суднових дизелів. Працездатність верхнього поршневого кільця визначає наработку циліндра до чергового вскриття та освідчення. За умовою гарного прилягання кільця до відповідної поршневої канавки під роботи дизеля нагрівання кільця є незначне. Його перегрів виникає під час прориву випускних газів скрізь зазори, що виникають у сполученнях кільця зі поршнем та циліндрової втулкою. При цьому існують постійні зазори між головкою поршня та втулкою циліндра, у замку кільця, а також між кільцем та поршневою канавкою. Найбільшому зносу піддаються кромки поршневих кілець та зазор у замку кільця [22-24].

Підшипники у суднових дизелях відносяться до найбільш відповідальним вузлам. Їх несправність або дефекти призводять до раптової відмови всього двигуна. Під час експлуатації дизелів більшому навантаженню піддаються рамові підшипники, але більша кількість пошкоджень припадає на головні / крейцькопфні підшипники для двотактних двигунів та трибосполученню поршневого пальця – верхня голівка шатуна для чотиритактних двигунів. Для цих з'єднань характерні такі дефекти як розтріскування шару антифрикційного матеріалу, відшаровування однієї поверхні антифрикційного матеріалу від іншої, вичавлювання антифрикційного матеріалу з трибосполучення. Вказані підшипникові вузли працюють у важких умовах, які додатково ускладнюються під час зміни зовнішніх збурень [25-28]. Качувальний характер їх переміщень щодо цапфи на невеликий кут і малі окружні швидкості не дозволяють забезпечити гідродинамічні умови мащення [29-31]. Крім того, у більшості суднових дизелів сила тиску газів на поршень на всіх кутах повороту колінчатого валу залишається більшою ніж сили інерції, що ускладнює подачу мастила під шийку крейцькопфа або під поршневий палець. Особливо важки умови під час роботи цих підшипникових вузлів виникають під час реверсу та пуску двигуна.

До основних пошкоджень мотильових та рамових підшипників суднових дизелів відносяться пошкодження антифрикційного шару їх тонкостінних вкладишів (розтріскування, відшаровування, вичавлювання), потрапляння та залишення у зазорі між вкладишем та валом дрібних металевих домішок та продуктів нагару, повертання вкладишів підшипників [32-34]. Основною причиною цих

дефектів стає порушення режимів мащення – раптовий або поступовий перехід від гідродинамічного тертя до граничного (під час якого контактні поверхні поділені між собою кількома молекулярними шарами мастильного матеріалу) або сухого (в разі виникнення якого між поверхнями повністю відсутній шар мастила).

Деякі вказані дефекти також характерні колінчатому валу дизеля – найбільш відповідальному та самому дорогому елементу судового дизеля. Також до несправностей колінчатого валу відносяться втомні тріщини, провертання шийок валу у місцях їх запресування, подряпини, натири або задири шийок. Втомні тріщини є самим розповсюдженим та небезпечним видом пошкодження колінчатих валів. Більша частина поломки колінчатих валів відбувається як результат деформації фундаментних рам або нерівномірного зносу мотильових та рамових підшипників. Несправності, поломки або дефекти колінчатого валу призводять до аварійної зупинки дизеля, що стає причиною втрати ходу судна або тимчасового чи тривалого знеструмлення. Обидва явища сприяють виводу судна з експлуатації. Виникнення подібних аварійних випадків в районах інтенсивного судноплавства погрожує навігаційної безпеки. Додаткові природні перешкоди, що можуть виникнути та співпасти з ситуацією втрати руху та управління судном (наприклад, підвищені прибережні течії, поривчатий вітер, зміна ландшафту морського дна) наносять ще одну негативну дію та разом з відмовою головного двигуна та втратою маневреності судна можуть призвести до посадки судна на міліну або навалюванню судна на берегову лінію чи портові споруди [35-37].

Виявлення цих дефектів не може бути здійснено візуальним шляхом. Єдиним варіантів їх визначення є виконання безперервного моніторингу або періодичного діагностування експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується у циліндрових, або циркуляційних системах мащення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Функціональним призначенням систем мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту є зниження теплових та механічних напружень між контактуючими поверхнями, а також видалення продуктів зносу, нагароутворення та інших забруднень із зони контакту. Саме потрапляння цих речовин до вузького зазору між контактними парами тертя призводить до погіршення їх геометрії, збільшенню площі контакту та відповідному підвищенню коефіцієнту тертя, температури та зносу поверхонь. Вказані послідовності характерні для всіх основних контактних вузлів судових дизелів та їх пар тертя: трибосполучень поршневе кільце – канавка поршню, поршневе кільце – втулка циліндра, вкладиш підшипника – колінчатий вал [38-40].

Вивченню контактних взаємодій, що виникають під час експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, присвячено багато досліджень. Перш за все це пов'язано зі взаємозв'язком процесів мащення та тертя з надійністю роботи всіх без виключення судових машин та механізмів. Зміна процесів мащення та тертя у трибологічних системах судових дизелів призводить до зміни (у більшості випадків підвищення) градієнтів температури, а також підвищенню інтенсивності зношування та безпосередньому зносу контактних поверхонь [41-43].

Експериментально встановлено, що для матеріалів, що мають порівняно досконалі пружні властивості і в умовах, коли температура їх істотно не змінюється, коефіцієнт тертя не залежить від швидкості. У цьому випадку досконала пружність виключає гістерезисні втрати та забезпечує незалежність від швидкості деформаційної компоненти коефіцієнта тертя. Одночасно з цим, висока теплостійкість забезпечує незалежність адгезійної взаємодії [44, 45]. У випадку недосконалого пружного контактування зі зростанням швидкості коефіцієнт тертя переходить через максимум і може мати другий екстремум – мінімум. Максимум коефіцієнта тертя розміщений у зоні швидкостей, що забезпечують найбільші втрати гістерезу. За умовою малих швидкостей деформації релаксаційні процеси звужують гістерезисну петлю, через це коефіцієнт тертя знижується. У разі великих швидкостей температура, що виникає у зоні контакту, зменшує адгезійну взаємодію і гістерезисні втрати через скорочення часу релаксації. Внаслідок цього знижується коефіцієнт тертя. Подальше підвищення швидкості ковзання призводить до нового підвищення температури матеріалів, що труться, зниження їх твердості, зростання впровадження і деформаційної компоненти сили тертя: коефіцієнт тертя знову може зростати. При порівняно високих тисках, коли

під час малих швидкостей можливе суттєве підвищення температури, зона максимуму коефіцієнта тертя може бути відсутньою [46, 47].

В разі пластичного контакту швидкість ковзання може впливати на тертя через швидкість поширення пластичної деформації. Під час збільшення швидкості ковзання пластична деформація локалізується у меншому приповерхневому обсязі та коефіцієнт тертя знижується.

Внаслідок підвищення температури під час зростання швидкості ковзання змінюються міцність та характер адгезійних зв'язків у мастильному матеріалі, який подається до зони тертя. Зі збільшенням температури змінюється міцність, товщина та природа захисної контактної плівки мастильного матеріалу. У зоні малих швидкостей достатня захисна мастильна плівка не встигає утворюватися і передеформування перетворюється на мікрорізання, що відповідає зростаючій складової залежності коефіцієнт тертя – швидкість. При подальшому підвищенні швидкості (отже температури) зниження адгезійної міцності фрикційних зв'язків призводить до зменшення висоти нерівностей і вигладжування поверхні тертя. Внаслідок цього зі зростанням швидкості ковзання шорсткість переходить через максимум, відповідно впливаючи на коефіцієнт тертя. При малих значеннях швидкості ковзання її вплив чинника, що змінює міцність матеріалу, незначно [48, 49].

Складний комплекс процесів, що перебігають на фрикційному контакті, призводить до складної та неоднозначної залежності коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування від швидкості ковзання, яка по суті є їх залежністю від температури. Великий вплив на тертя і знос оказує градієнт механічних властивостей і конструкція фрикційного з'єднання. Роль конструкції фрикційного з'єднання під час тертя настільки велика, що конструктивні параметри вузла тертя (площа тертя, взаємне перекриття, форма і розміри контактуючих елементів, жорсткість конструкції та інші) виділяються в число основних визначальних факторів поряд з параметрами режиму тертя і властивостями матеріалів, що труться. Вплив конструктивних параметрів вузла тертя на фрикційні характеристики опосередковано і виявляється головним чином через зміну площі фактичного контакту, вплив на утворення і вміст продуктів зносу між поверхнями, що труться, а також через тепловий режим, дію середовища, що оточує вузол тертя. Інтенсивність зношування зі збільшенням номінальної площі поверхні за незмінних інших факторів, що впливають на тертя, має тенденцію до збільшення.

Експериментально встановлено та теоретично обґрунтовано, що із зменшенням загальної конструктивної жорсткості контакту елементів пари тертя коефіцієнт тертя зростає внаслідок збільшення площі фактичного дотику. Реальним засобом зниження жорсткості є розбиття загальної площі тертя на окремі елементи, що самостійно навантажуються [50, 51].

Численні дослідження переконують, що в умовах тертя, коли можливе суттєве підвищення температури, вплив зміни конструкції та розмірів фрикційного з'єднання на тертя і знос виявляється через тепловий режим і градієнт механічних властивостей, що виникає внаслідок нагрівання елементом пари тертя.

Конструктивні макрогеометричні параметри фрикційного з'єднання впливають на всі основні характеристики теплового режиму тертя: розподіл теплових потоків, поверхневу температуру, температурний градієнт і об'ємний розподіл температури в тілах, що труться. Через ефективний коефіцієнт тертя конструкція впливає на загальну генерацію теплоти, а через жорсткість елементів, що труться – на рівномірність генерації теплоти і межах номінальної площі контакту. Маса елементів, що труться, теплопоглинаючий об'єм, розміри поверхні тертя і тепловіддаючої поверхні є факторами, що визначають розподіл теплоти і тілах, що труться, поверхневу температуру та інші характеристики температурного поля [52, 53].

Важливою конструктивною характеристикою вузла тертя є коефіцієнт взаємного перекриття. Він являє собою відношення площі тертя елементів, що труться. Великий вплив цього показника на тертя пояснюється тим, що від його значення суттєво залежать тепловий режим, напружений стан і можливість проникнення оточуючого середовища на поверхню тертя, утримання або видалення продуктів зносу. Неповне взаємне перекриття забезпечує можливість тепловіддачі із відкритих ділянок поверхні тертя; при повному перекритті вся теплота йде в глиб тіл, що труться. Тому зі зменшенням взаємного перекриття є тенденція до зниження середньої поверхневої температури та

зростання температурного градієнта. Тобто менше взаємне перекриття при постійному тиску забезпечує більш легкий тепловий режим тертя (температуру і градієнт температури).

Практика підтверджує, що для багатьох важконавантажених фрикційних пристроїв зменшення коефіцієнта взаємного перекриття призводить до підвищення коефіцієнта тертя та більшої стабільності у разі зміни температури. Зміна взаємного перекриття може суттєво впливати на напружений стан тіл, що труться, і виникнення окисних плівок.

Оточуюче середовище під час тертя розглядається як фактор, що впливає на розвиток фізико-хімічних явищ у зоні тертя і, отже, на тертя та зношування.

Встановлено, що форма та розміри вузла тертя, коефіцієнт взаємного перекриття є факторами, що впливають на надходження мастильного матеріалу до зони фрикційного контакту. Для цього пропонується метод моделювання фізико-хімічних явищ, що залежать від дії оточуючого середовища під час тертя різних антифрикційних та фрикційних матеріалів; критерії моделювання та масштабні коефіцієнти переходу, що отримані з умов подібності процесів тертя, зношування та теплоутворення [54, 55].

При цьому складання математичних моделей більш характерно для прогнозування стану контактних поверхонь та поведінки мастильного матеріалу під час проектування та початкових етапів експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Збільшення тривалості експлуатації дизелів призводить до виникнення у трибологічних системах внутрішніх факторів, які не можливо запрограмувати або змодельовати на етапів проектування. Також важливим чинником, що зумовлює певну обмеженість математичних моделей процесів мащення, стану мастильного матеріалу та утворення продуктів зносу, є випадковість процесів тертя. Це зумовлює пошук додаткових шляхів визначення технічного стану контактних поверхонь судових дизелів.

Найбільш розповсюдженим варіантом діагностування технічного стану трибосполучень судових дизелів, а саме циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників та поверхонь колінчатого валу, є аналіз моторного мастила, що забезпечує мащення цих вузлів. Для судових двотактних дизелів, що компонується системами циліндрового та циркуляційного мащення, виконується аналіз циркуляційного (лубрикаторного) мастила, при цьому проби мастила відбираються з підпоршневого простору дизеля. Для чотиритактних дизелів, що мають одну загальну систему циркуляційного мащення (що забезпечує подачу моторного мастила до циліндрової групи та до підшипників ковзання) виконуються аналіз мастила, проби якого відбираються з картера дизеля. Виконання цих аналіз відбувається у судовій експрес лабораторії або у берегових дослідницьких лабораторіях. У першому випадку виконується визначення основних експлуатаційних характеристик моторного мастила – його в'язкості, загального лужного числа та рівню механічних домішок, які потрапили до його обсягу. У другому – виконується більш повний аналіз моторного мастила, з визначенням вмісту окремих хімічних елементів, що характеризують знос контактних поверхонь та потрапляння до мастила забруднюючих речовин, що утворюються під час згоряння палива. Недолік першого методу – обмежена інформація щодо стану моторного мастила. Недолік другого – відносна тривалість часу від відправлення проб мастила до дослідницької лабораторії до моменту отримання результатів аналізу.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті було визначення можливості проведення безпосередньо на судні під час здійснення навігаційних переходів поширеного аналізу стану та експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в системах мащення судових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на спеціалізованому судні дедвейтом 9600 тонн до складу енергетичної установки якого входили судові дизелі 6R26 Wartsila. Основні характеристики дизелів наведені у табл. 1.

Під час експлуатації дизелів з метою забезпечення процесу мащення його основних елементів використовувалось моторне мастило Castrol 15W20.

Таблиця 1 – Основні характеристики суднового дизеля 6R26 Wartsila

Показник, позначення, розмірність	Чисельне значення
Діаметр циліндру, d , мм	260
Хід поршню, s , мм	320
Частота обертання, n , об/хв	900
Швидкість поршню, v , м/с	9,6
Середній ефективний тиск, p_e , МПа	2,55
Механічний коефіцієнт корисної дії у діапазоні навантаження 90...95 %, η_m , %	0,89...0,90
Коефіцієнт корисної дії генератору, $\eta_{ег}$, %	0,95...0,96
Діапазон в'язкості палива, рекомендованого до використання, ν , сСт за 50°C	до 730
Питома витрата палива для експлуатаційних режимів, що відповідають діапазону навантаження 35...95 %, b_e , г/(кВт·год)	192...186
Ефективна потужність, N_e , кВт	1950
Напрямок обертання колінчатого валу відносно відбору потужності	правий

Зміна експлуатаційних характеристик мастила контролювалась членами суднової машинної команди за допомогою діагностичного обладнання фірми Unitor. При цьому визначались кінематична в'язкість, загальне лужне число, вміст води та загальний вміст механічних домішок. Періодичність контролю вказаних показників коливалась в діапазоні 4...24 години та залежала від експлуатаційних режимів роботи дизелів та результатів попередніх вимірювань. Експрес діагностування експлуатаційних характеристик мастила дозволяло робити висновки о роботі очисного обладнання (мастильних фільтрів та мастильного сепаратору), перебігу робочого процесу (вдосконаленості процесів згоряння), ефективності роботи та налаштування паливної апаратури високого тиску, а також технічному стані контактних поверхонь дизеля (поршневих кілець, циліндрових втулок, вкладишів підшипників ковзання). За результатами експрес аналізу приймалися рішення щодо зміни режимів мащення та охолодження, переналаштування паливної апаратури, а також поповнення об'єму моторного мастила.

Після кожних 500 годин експлуатації виконувався відбір проб моторного мастила з метою його подальшого аналізу у береговій дослідницькій лабораторії. Основними показниками, які при цьому визначались, були компоненти мастила, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля та відносяться до категорії Wear Elements (якими є Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb), а також такі, що характеризують забруднення моторного мастила та відносяться до категорії Contaminant Elements (якими є B, Na, Si, V, Mo, Ni). Як правило, визначення та відсотковий вміст цих елементів у моторному мастилі виконується шляхом спектрального аналізу.

Як було вказано раніше, недоліком контролю показників у береговій дослідницькій лабораторії є певна затримка отримання його результатів. В деяких випадках це може сприяти несвоєчасному прийняттю управлінських рішень або виконанню відповідних технологічних операцій.

Через це, як додатковий спосіб контролю експлуатаційних характеристик мастила безпосередньо на судні та, відповідно, більш швидкого отримання результатів, виконувався аналіз спектрів горіння моторного мастила. З цією метою використовувався спектральний газовий аналізатор FliX6530sc з вбудованою інфрачервоною камерою контролю. При цьому забезпечувався контроль так самих характеристик (Wear Elements та Contaminant Elements), визначення яких виконувалось у береговій дослідницькій лабораторії. Результати виконаних досліджень наведено на рис. 1, 2.

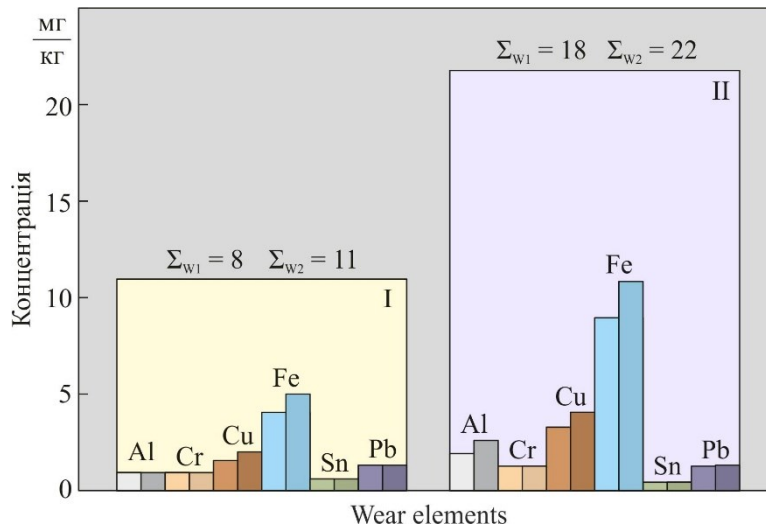


Рисунок 1 – Вміст механічних домішок у моторному мастилі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: I – після 500 годин; II – після 1000 годин

На рис. 1, 2 з парних стовпчиків, що відповідають вмісту у моторному мастилі механічних домішок (Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb) та забруднюючих речовин (B, Na, Si, V, Mo, Ni), перший відповідає вимірюванням, які виконувались у береговій дослідницькій лабораторії, другий – які виконувались на судні з використанням спектрального газового аналізатору FlirX6530sc.

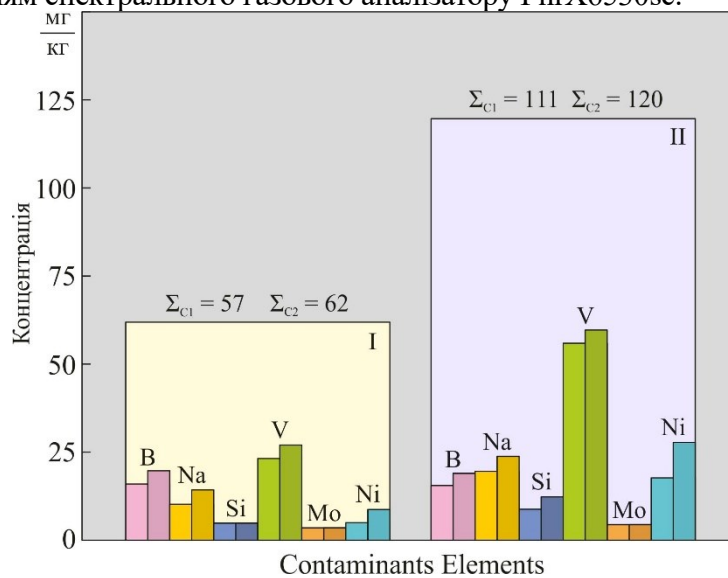


Рисунок 2 – Вміст забруднюючих речовин у моторному мастилі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: I – після 500 годин; II – після 1000 годин

Під час дослідження також контролювались та підтримувались в рекомендованому фірмою-виробником діапазоні всі основні показники роботи дизелів 6R26 Wartsila та систем, що забезпечують їх функціонування.

Висновки. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту постійне стає завдання забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів, що на них встановлені та виконують функції головних та допоміжних двигунів. Виникнення цього завдання зумовлюється процесами тертя та зношування, що виникають та відбуваються під час зворотно-поступального руху поршня у циліндрі дизеля та обертового руху колінчатого валу. У першому випадку

відбувається знос у трибологічній системі поршневі кільця – втулка циліндра, у другому – у трибологічній системі колінчатий вал – вкладиш підшипника ковзання.

2. Найбільш зручним та ефективним методом контролю стану поверхонь тертя, що входять до складу вищевказаних трибологічних систем, є аналіз та діагностування моторного мастила, яке використовуються у циркуляційній системі мащення. Експрес аналіз моторного мастила, що виконується у судновій лабораторії, дозволяє визначити зміну в'язкості та загального лужного числа, а також загальний вміст механічних домішок, що потрапляють у мастило як результат зносу контактних поверхонь. З метою більш повного аналізу хімічних елементів, що знаходяться у мастилі, виконують його аналіз у берегових дослідницьких лабораторіях, для цього, як правило, використовується спектральний аналіз.

3. Недоліком контролю показників у береговій дослідницькій лабораторії є певна затримка у отриманні його результатів. В деяких випадках це може сприяти несвоєчасному прийняттю управлінських рішень або виконанню відповідних технологічних операцій. Через це, як додатковий спосіб контролю експлуатаційних характеристик мастила безпосередньо на судні та, відповідно, більш швидкого отримання результатів, виконувався аналіз спектрів горіння моторного мастила. З цією метою використовувався спектральний газовий аналізатор FlirX6530sc з вбудованою інфрачервоною камерою контролю. При цьому забезпечувався контроль так самих характеристик (Wear Elements та Contaminant Elements), визначення яких виконувалось у береговій дослідницькій лабораторії.

4. Збіг результатів діагностування стану моторного мастила, що виконувався за допомогою запропонованого спектральний газового аналізатору та результатів, що були отримані під час досліджень у берегової лабораторії, дозволяє рекомендувати метод визначення експлуатаційних характеристики моторного мастила за допомогою судового спектральний газового аналізатору як метод попереднього аналізу. Результати, які при цьому можуть бути отримані, з високою точність характеризують показники моторного мастила. Безпосередньо метод діагностування моторного мастила за допомогою газового аналізу сприяє забезпеченню ресурсозберігаючої експлуатації судових дизелів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
2. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
3. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
4. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
5. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
6. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
7. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.

8. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
9. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2025. – № 127. – P.165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
10. 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” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
11. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
12. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
13. Левченко О.В., Двудіт З.П., Козленко О.В. Особливості управління персоналом підприємств залізничного транспорту // Ефективна економіка. – 2020. – № 6. – С. 1-7. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7985>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.6.72
14. Двудіт З.П., Левченко О.В., Деркач Д.М. Формування маркетингових рішень у системі управління підприємством // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку. – 2020. – Вип. 2(1). – С. 21–28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>
15. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // Drones. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
16. Мацкевич Д.В., Сагін 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. – С.109-118.
17. Сагін 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. – С.102-104.
18. Petrychenko O., Levynskyi 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. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
19. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol.12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
20. 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/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
21. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
22. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації судових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.

23. 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>.
24. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
25. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2023. – № 2(38). – С. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
26. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Проблеми економіки та управління.* – 2021. – № 1. – С. 1-12. <https://ena.lpnu.ua/items/c18bd237-03e6-4ae1-947c-6a2300e013e2>.
27. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
28. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
29. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки.* – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
30. Сагин С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту.* – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
31. 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. – С.116-125.
32. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
33. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник.* – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. [doi: 10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).
35. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. 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. – С. 79-89.
37. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies.* – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
38. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2022. – Вип. 44. – С. 121-131. [doi: 10.31653/smf44.2022.121-131](https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131).

39. Кривий М. О., Сагін С. В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – С. 18-24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24.
40. Sagin S., Sagin A., Zablotskiy Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
41. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
42. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – С. 68-81.
43. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – С. 46-56.
44. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
45. 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/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
46. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – С. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.
47. Заблоцкий Ю. В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – С. 83-92.
48. Поповский А.Ю., Сагін С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
49. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
50. Сагін С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
51. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових середньооборотних дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.
52. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
53. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
54. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – С. 84-103.
55. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

REFERENCES

1. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
2. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
3. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
4. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
5. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
6. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
7. Sagin S.V. Reducing energy losses in precision steam of fuel equipment of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142
8. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in medium-speed marine diesel engines by optimizing the operation of circulating lubrication systems // *Herald of the Odessa Maritime University*. – 2020. – Vol. 1(61). – P. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
9. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. – 2025. – № 127. – P.165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
10. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
11. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // *Water transport*. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
12. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnostics of the reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
13. Levchenko O.V., Dvulit Z.P., Kozlenko O.V. Features of Human Resource Management at Railway Transport Enterprises // *Efektivna ekonomika*. – 2020. – Vol. 6. – P. 1-7 <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7985>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.
14. Dvulit Z.P., Levchenko O.V., Derkach D.M. Formation of marketing decisions in the enterprise management system // *Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia ta problemy rozvytku*. – 2020 – Vol. 2(1). – P. 21–28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>
15. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // *Drones*. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
16. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // *Ship power plants*. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.
17. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants*. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.

18. Petrychenko O., Levynskyi 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. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
19. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
20. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
21. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // *Automation of ship facilities*. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
22. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 48. – P. 100-113. [doi: 10.31653/smf48.2024.100-113](https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113).
23. 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>.
24. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
25. Sagin S.V., Sagin S.S. Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – P. 187–197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
26. Dvulit Z. P., Tymoshchuk O.M., Levchenko O.V. Improvement of business processes in modern shipping companies in the field of international sea freight transportation // *Management and entrepreneurship in Ukraine: the stages of formation and problems of development*. – 2021. – № 1. – P. 1-12. <https://ena.lpnu.ua/items/c18bd237-03e6-4ae1-947c-6a2300e013e2>.
27. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
28. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
29. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67-71.
30. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.
31. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
32. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
33. Poberezhnyi R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – № 45. – P. 5–16. [doi: 10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).
35. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

36. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // Automation of ship facilities. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
37. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – C. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
38. Zablotskiy Yu.V., Sagin A.S. Determination of dynamic loads during the change of lubrication modes of precision pairs of fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2022. – Vol. 44. – P. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.
39. Kryvyi M. O., Sagin S. V. Determination of the influence of properties of engine oils on pressure distribution in friction pairs of marine diesel engines // Ship power plants. – 2021. – Vol. 43. – P. 18-24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24.
40. Sagin S., Sagin A., Zablotskiy Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
41. Levynskiy M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Automation of ship technical facilities. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
42. Sagin S.V., Zablotskiy Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
43. Zablotskiy Yu.V., Solodovnikov V.G. Reducing energy losses in fuel equipment of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 46-56.
44. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
45. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org.10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
46. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Analysis of operational characteristics of motor oils of marine diesels // Ship plants. – 2021. – Vol. 43. – P. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.
47. Zablotskiy Yu.V. A study of the influence of organic coatings on the operation of high-pressure fuel system components of marine diesel engines // Ship power plants. – 2015. – Vol. 35. – P. 83-92.
48. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship facilities. – 2014. – №20. – P. 74-83.
49. Sagin S.V., Zablotskiy Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
50. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
51. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in marine medium-speed diesel engines // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.
52. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
53. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
54. Sagin S.V., Zablotskiy Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
55. Sagin S.V., Zablotskiy Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.

Razinkin R.O.

ENSURING RESOURCE-SAVING OPERATION OF MARINE DIESEL ENGINES BY DIAGNOSING ENGINE OIL

The results of research on determining a method that contributes to the resource-saving operation of marine diesel engines are presented. It is noted that during the operation of marine and inland waterway vessels, the task of ensuring the resource-saving operation of diesel engines installed on them and performing the functions of main and auxiliary engines becomes a constant task. The emergence of this task is due to the processes of friction and wear that arise and occur during the reciprocating motion of the piston in the diesel cylinder and the rotational motion of the crankshaft. In the first case, wear occurs in the tribological system of the piston rings - cylinder sleeve, in the second - in the tribological system of the crankshaft - plain bearing liner. The most convenient and effective method of monitoring the condition of the friction surfaces that are part of the above-mentioned tribological systems is the analysis and diagnosis of motor lubricant used in the circulating lubrication system. In order to fully analyze the chemical elements contained in the lubricant, its analysis is performed in shore research laboratories, for this, as a rule, spectral analysis is used. The disadvantage of monitoring indicators in a shore research laboratory is a certain delay in obtaining its results. In some cases, this may contribute to untimely adoption of management decisions or performance of relevant technological operations. Therefore, as an additional method of monitoring the operational characteristics of the lubricant directly on the vessel and, accordingly, faster obtaining of results, an analysis of the combustion spectra of motor lubricant was performed. For this purpose, a FlirX6530sc spectral gas analyzer with a built-in infrared control camera was used. At the same time, control of the same characteristics (Wear Elements and Contaminant Elements), the determination of which was performed in the shore research laboratory, was ensured. The coincidence of the results of diagnosing the condition of motor oil, which was carried out using the proposed spectral gas analyzer, and the results obtained during research in the shore laboratory, allows us to recommend a method for determining the operational characteristics of motor oil using a ship spectral gas analyzer as a method of preliminary analysis. The results that can be obtained in this case characterize the performance of motor oil with high accuracy. The method of diagnosing motor oil using gas analysis directly contributes to ensuring resource-saving operation of ship diesel engines.

Keywords: contact surfaces, diagnostics, friction, lubrication system, lubrication, marine diesel, maritime transport, motor oil, technical condition, wear