

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»

Сагін Сергій Вікторович



УДК 629.5.016+621.43.018.2

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ НА СУДНАХ
З МІНІМАЛЬНО НЕМИНУЧИМИ НЕЗВОРОТНИМИ ВТРАТАМИ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки (МОН) України.

Науковий консультант: **Голіков Володимир Антонович,**
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри технічної експлуатації флоту
Національного університету «Одеська морська
академія» МОН України,
заслужений працівник народної освіти України.

Офіційні опоненти: **Вичужанін Володимир Вікторович,**
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри інформаційних технологій
Одеського національного політехнічного
університету МОН України;

Пузир Володимир Григорович,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри експлуатації та ремонту рухомого
складу Українського державного університету
залізничного транспорту МОН України;

Федорович Олег Євгенович,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерних наук і
інформаційних технологій Національного
аерокосмічного університету ім. М. Е. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут» МОН України,
лауреат державної премії в галузі науки і техніки.

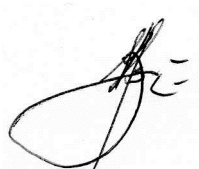
Захист відбудеться 19 грудня 2019 р. о 11-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 1, зала засідань Вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 2 та за електронною адресою:

<http://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>

Автореферат розісланий 19 листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор



Нікольський В. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Морській та річковій транспорт є однією з важливих галузей у морегосподарському комплексі України. Експлуатація суден спрямована на отримання прибутку, який залежить від організації перевезень, вибору економічно вигідних і безпечних морських та/або річкових шляхів, забезпечення максимальної швидкості судна, збереженості та своєчасної доставки вантажів, комфортних умов праці екіпажу та відпочинку пасажирів, зниження витрат на паливно-мастильні матеріали. Підвищення ефективності експлуатації суден за рахунок зростання прибутку можна здійснити за двома напрямками: перший – збільшення доходів (підвищенням тарифів за надані послуги, збільшенням провізної спроможності засобу транспорту, скороченням терміну виконання транспортної послуги); другий – зниження транспортних витрат до мінімально неминучих.

Водночас створення умов для високоефективної експлуатації засобів транспорту повинно забезпечувати їх енергетичну ефективність, надійність роботи, підтримання екологічних вимог. Витратна частина транспортного процесу, який забезпечується завдяки експлуатації суднового пропульсивного комплексу (СПК), пов'язана з роботою технічних засобів судна; зростанням собівартості перевезень; незапланованим підвищенням ходового часу судна; збільшенням кількості баластних переходів, а також переходів з неповним завантаженням судна; додатковими витратами енергії (а отже, і палива) на компенсацію негативних внутрішніх та зовнішніх дій, які знижують швидкісні показники судна, при цьому кожний елемент СПК (корпус судна, рушій, валопровід, двигун) має власну структуру і розглядається як окрема система.

Невід'ємною частиною транспортної роботи є втрати, які відносно морських та річкових засобів транспорту виникають у двигуні, корпусі судна, рушії та валопроводі. При цьому частина цих втрат у загальному процесі енергоперетворення на суднах (відповідно до I та II законів термодинаміки) відноситься до неминучих незворотних. Ці втрати неможливо обернути у рушійну силу СПК або у теплову енергію ні шляхом вдосконалення конструкції або профілю корпусу судна, ні шляхом підвищення корисної тяги гребного гвинта, ні шляхом оптимізації інерційних характеристик лінії передачі та валопроводу, ні шляхом вдосконалення робочого циклу, що здійснюється у двигуні. Мінімальний рівень цих втрат забезпечує максимальний пропульсивний коефіцієнт корисної дії (ККД) морського або річкового судна як засобу транспорту та зниження витрати палива на одиницю часу або пройденого шляху.

Більшість мінімально неминучих незворотних втрат складають механічні втрати в трибологічних системах (ТС): поршневі кільця – втулка циліндра, колінчастий вал – вкладиш підшипника, плунжер – втулка паливного насоса високого тиску (ПНВТ), а також втрати енергії, що пов'язані з інерцією елементів СПК, які здійснюють обертальний чи поступальний рух (у тому числі валопроводу та гвинта з приєднаною масою води) та безпосередньо з інерцією судна (яка у тому числі пов'язана з виникненням поздовжніх та поперечних коливань його корпусу під дією збурень та зовнішніх завад).

З наведеного переліку втрат енергії під час здійснення судном механічної роботи з перевезення вантажу (яка у кінематичному вигляді характеризується його швидкістю) керованому впливу підлягають лише механічні втрати. Саме вони є вагомою складовою мінімально неминучих незворотних втрат, яка визначає пропульсивний ККД СПК.

Виникнення механічних втрат у засобах транспорту передовсім пов'язане з безпосереднім контактом поверхонь, працездатність яких забезпечується гідродинамічним або граничним станом робочої рідини. Відомі енергетичні моделі, що базуються на апіорних розробках наукової школи Поповського Ю. М. (яким спільно з Дерягіним Б. В. та Алтоїзом Б. А.) було відкрито та зафіксовано факт існування особливої термодинамічної фази ізотропних рідин, що виникає під дією поверхневих сил) та подальших дослідженнях Ханмамедова С. А., Заблоцького Ю. В., Кіріяна С. В. (якими були встановлені аномальні характеристики теплопровідності, в'язкості, діелектричної проникності та ряду інших характеристик граничних шарів рідини), не передбачали шляхи керованого впливу на процес тертя та можливість керованого зниження рівня мінімально неминучих незворотних втрат із подальшою мінімізацією їх величин.

Це свідчить про наявність **нерозв'язаної комплексної наукової проблеми** – управління процесами енергоперетворення на судах із мінімально неминучими незворотними втратами, підтверджуючи її актуальність. Розв'язання цієї проблеми є особливо актуальним в умовах експлуатації дизелів як однієї зі складових морського та річкового засобу транспорту, у яких змащувальний матеріал (паливо чи мастило), що характеризується аномалією деяких фізичних властивостей граничних шарів, знаходиться під дією високого зовнішнього тиску, а також поступального чи обертального руху механізмів, який він поділяє.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Важливість розв'язання проблеми щодо управління мінімально неминучими незворотними втратами морських та річкових засобів транспорту насамперед визначається вимогами Додатку VI конвенції MARPOL, а також резолюціями Міжнародної морської організації МЕРС.203 (62) і МЕРС.213 (63) до енергетичної ефективності суден у процесі підвищення їх ефективності експлуатації.

Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 року (Наказ Президента України №5/2015 від 12 січня 2015 року); положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року; Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 року «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (Наказ Президента України від 20.05.2008 року № 463/2008); а також у рамках наступних держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Підвищення ефективності робочих процесів судових енергетичних установок на базі сучасних технічних і інформаційних технологій» № ДР 0116U002390 (2014–2017 рр.), «Розвиток систем і методів удосконалення технічної експлуатації судових енергетичних установок на підставі сучасних інформаційних технологій» № ДР 0110U005910 (2017–2019 рр.), «Прогнозування експлуатаційного технічного стану судової

пропульсивної установки на основі контролю її вібраційно-коливальних характеристик» № ДР 0119U001654 (2018–2021 рр.), у яких автор дисертації брав участь як відповідальний за виконання теми та виконавець.

Мета дослідження – підвищення ефективності технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза про те, що підвищення ефективності технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту забезпечується організацією процесу генерації та трансформації механічної енергії з мінімально неминучими незворотними втратами.

Для досягнення мети і підтвердження наукової гіпотези під час проведення досліджень розв'язувалися такі завдання.

Комплексне завдання наукового дослідження – мінімізація неминучих незворотних втрат під час забезпечення процесу трансформації теплотворної здатності палива в кінетичну енергію кривошипно-шатунного механізму та пов'язаних з ним споживачів енергії морських та річкових засобів транспорту, яке складається з **трьох головних завдань дослідження**:

- управління мінімально неминучими втратами енергії під час обертального руху контактних вузлів судових дизелів морських та річкових засобів транспорту (у ТС колінчастий вал – мастильний матеріал – вкладиш підшипника);

- управління мінімально неминучими втратами енергії під час поступального руху контактних вузлів судових дизелів морських та річкових засобів транспорту (у ТС поршневе кільце – мастильний матеріал – втулка циліндра);

- управління мінімально неминучими втратами енергії в умовах високих динамічних навантажень (у ТС плунжер – мастильний матеріал – втулка паливного насоса високого тиску).

Об'єкт дослідження: процес експлуатації СПК як засобу транспорту.

Предмет дослідження: процеси енергоперетворення, що виникають під час генерації та трансформації механічної енергії у СПК.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі поєднані теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні методи (дедукції, експертних оцінок, системного аналізу) використовувалися під час знаходження рішень абсолютно нових нерозв'язаних проблем, які раніше не досліджувались, або рішення яких неможливо було використовувати з урахуванням особливостей експлуатації морських та річкових засобів транспорту. Експериментальні методи (у тому числі методи планування експерименту та регресивного аналізу експериментальних даних) використовувалися для перевірки адекватності та достовірності математичних моделей, а також для визначення закономірностей перебігу процесів генерації та трансформації теплотворної здатності палива в корисну роботу, а також вивчення динаміки змін експлуатаційних та реологічних характеристик основних складових ТС судових дизелів морських та річкових засобів транспорту. Чисельними методами (теорії ймовірності та математичної статистики) здійснювалося зіставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що підвищення ефективності технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту досягається управлінням мінімально неминучими незворотними втратами енергії шляхом оптимізації триботехнічних характеристик контактних поверхонь судових двигунів (як одного з компонентів СПК), а також реологічних характеристик та наноструктури мастильних матеріалів, що забезпечують їхнє функціонування.

У результаті розв'язання головних та допоміжних завдань сформовані наступні **наукові положення**:

- механізм енергоперетворення на судах з мінімально неминучими незворотними втратами залежить від трибологічних процесів, що відбуваються в підшипникових вузлах на лінії трансформації енергії кривошипно-шатунний механізм – колінчастий вал – споживач потужності; при цьому необхідно враховувати, як триботехнічні характеристики самих вузлів тертя, так і функціональні та реологічні властивості мастила, що входить до ТС метал – мастильний матеріал – метал;

- анізотрія структури орієнтаційно впорядкованого шару мастила поблизу твердої металевої поверхні призводить до виникнення стратифікації його в'язкості, що на режимах пуску та реверсу забезпечує підвищення, а на динамічно сталих режимах – зниження несучої здатності мастильного шару та відповідного зростання контактних навантажень;

- мінімізація неминучих втрат під час перетворення теплотворної здатності палива на ефективну потужність, що розвивається засобом транспорту, забезпечується підвищенням пружно-демпфуючих властивостей робочих речовин (палива та мастила), які виконують функції змащувального матеріалу в контактних поверхнях двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Наукові положення обґрунтовані **науковими результатами**.

Вперше:

- встановлено, що основним показником, який характеризує рівень мінімально неминучих незворотних втрат у гідродинамічному та граничному режимі мащення, є стратифікація в'язкості мастильного матеріалу, що забезпечує функціонування ТС циліндро-поршневої групи (ЦПГ), кривошипно-шатунного механізму (КШМ) та паливної апаратури високого тиску. У діапазоні зсувних навантажень $100 \dots 350 \text{ с}^{-1}$, які характерні для основних експлуатаційних режимів роботи вищевказаних ТС судових ДВЗ морських та річкових засобів транспорту, стратифікація в'язкості знаходиться в межах $0,88 \dots 1,09$ її номінального значення;

- встановлена експериментальна залежність енергетичних втрат від стратифікації в'язкості шару моторного мастила, що поділяє контактні поверхні деталей ЦПГ та КШМ ДВЗ морських та річкових суден;

- оцінка рівня стратифікації в'язкості визначена «реологічною стійкістю», як відхиленням в'язкості у граничному шарі мастильного матеріалу від об'ємної в'язкості за умов відсутності та наявності зсувних напружень, які відповідають номінальному навантаженню;

- збільшення реологічної стійкості забезпечує зниження механічних втрат, підвищує механічний ККД, зменшує потужність механічних втрат та сприяє

перебігу процесу енергоперетворення з мінімально неминучими незворотними втратами;

- оцінка рівня вільної енергії граничних шарів вуглеводних рідин, яка характеризує здатність утворювати на металевій поверхні наноструктуровану анізотропну фазу, визначається «оптичною щільністю» як відношенням відповідних максимумів спектрів поглинання орієнтаційно впорядкованих шарів;

- встановлено, що дисипація енергії в ТС суднових ДВЗ, розділених багатофазним шаром мастильного матеріалу, визначається величиною лінійного зносу контактуючих поверхонь, а безпосередньо процеси дисипації енергії представлені у вигляді верифікованої математичної моделі;

- підтримання мінімально неминучих втрат енергії у морських та річкових засобах транспорту досягається поліпшенням триботехнічних характеристик ТС суднових ДВЗ шляхом забезпечення самоорганізації впорядкованості наноструктури граничних шарів робочих рідин (палива і мастила);

- встановлено механізм організації впорядкованої наноструктури моторних палив, який дозволяє покращити триботехнічні характеристики прецизійних пар паливної апаратури високого тиску ДВЗ морських та річкових суден.

Удосконалено:

- математичну модель контактної взаємодії поверхонь тертя, яка враховує особливості мастильного матеріалу, якій знаходиться у неньтонівському стані;

- методику та технологію еліпсометричних вимірювань товщини тонких плівок наноструктурованих шарів вуглеводних рідин (палива та мастила);

- методику та технологію проведення спектрофотометричних досліджень орієнтованої структури мікронних шарів технологічних рідин, що утворюються поблизу металевих поверхонь;

- принцип розподілу навантаження на паралельно працюючі електричні генератори суднової електростанції морських та річкових суден з урахуванням можливої зміни реологічних характеристик моторного мастила, що забезпечує процес мащення дизель-генераторів;

- технологію визначення лінійного та об'ємного зносу окремих деталей основних ТС ДВЗ морських та річкових суден для спрощення процедури та підвищення точності вимірювань.

Набули подальшого розвитку:

- метод визначення оптимальної концентрації поверхнево-активних речовин у базовому мастилі та технологія підтримання цієї концентрації в циркуляційних та циліндрових системах мащення суднових морських та річкових суден протягом експлуатаційного періоду їх роботи, що стримує відхилення реологічних характеристик моторного мастила від допустимих значень;

- технологія визначення оптимального часу нанесення органічних покриттів на поверхні плунжерів ПНВТ, що забезпечило процес утворення наноструктурованого шару органічного покриття з максимальною товщиною;

- процедура визначення реологічних кривих за допомогою ротаційного віскозиметру, що сприяло зменшенню дисперсії неузгодженості експериментальних значень;

- послідовність виміру в'язкості вуглеводних рідин у радіальному напрямку, що забезпечило відхилення експериментальних значень від аналогічних показників, що отримані аналітично за допомогою математичного моделювання;

- теоретичні та експериментальні методи визначення втрат індикаторної потужності, яка розвивається у циліндрі ДВЗ, та теплової енергії, яка витрачається на отримання цієї потужності, що підвищило точність розрахунку механічного коефіцієнта корисної дії та потужності механічних втрат.

Наукова значимість дослідження полягає в підвищенні ефективності роботи засобів транспорту під час генерації та трансформації енергії шляхом управляючого впливу на наноструктуровані граничні змащувальні шари робочих речовин.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що на основі виконаних досліджень розроблено та впроваджено:

- математичну модель, яка дозволяє досліджувати процеси контактної взаємодії поверхонь, розділених шаром мастильного матеріалу, що знаходиться у ньютонівському, або неньютонівському стані;

- систему стабілізації реологічних характеристик мастильних матеріалів, що використовуються у вузлах тертя ДВЗ морських та річкових суден;

- систему підтримання впорядкованої наноструктури у граничному мастильному шарі, яка забезпечує його пружно-демпфуючі властивості та сприяє зменшенню рівня дисипації енергії в ТС суднових дизелів;

- технологію покращення триботехнічних властивостей прецизійних деталей паливної апаратури високого тиску;

- методику визначення реологічних характеристик мастильних матеріалів в умовах змінних зсувних навантажень.

Основні впровадження:

- технологія забезпечення мінімально неминучих втрат енергії під час поступального руху у вузлах тертя суднових дизелів та метод модифікації прецизійних пар паливної апаратури високого тиску суднових дизелів – у період 2018...2019 рр. під час здійснення менеджменту на судах, які знаходяться в операційному управлінні ТОВ «Незалежний морський сюрвей»; це сприяло підвищенню енергетичних та економічних показників роботи суднових середньо-обертових дизелів 12V32/40 MAN-B&W та суднових високо-обертових дизелів Volvo Penta TMDA 163A, зокрема 1,2...4,4 %-ому зниженню питомої витрати палива та 7,8...12,6 %-ому зниженню витрати мастила на випал на основних експлуатаційних режимах роботи дизелів, а також 1,7...2,9 кратному зниженню зносу поршневих кілець та вкладишів підшипників, та забезпечило зниження фінансових витрат від 100 до 250 \$/добу під час експлуатації морських суден у територіальних водах України та від 200 до 600 \$/добу під час здійснення подібної експлуатації в територіальних водах країн Європейського Союзу та Світового океану (акт від 12.04.2019 р.);

- блок дозування поверхнево активних присадок до моторного мастила та метод визначення оптимального доливання мастила в систему мащення – у складі суднових пропульсивних комплексів суден «Дунай», «Київська», «Куяльницька»,

«Ізмаїльська» ТОВ СМД-ІНВЕСТ у період з 2016 по 2019 рр.; що сприяло зменшенню витрати моторного мастила, а також дозволило поліпшити експлуатаційні показники систем мащення та технічний стан суднових дизелів та забезпечило зменшення трудомісткості робіт з моточищення дизелів (відповідно до акту ТОВ СМД-ІНВЕСТ);

- технологія підвищення гідравлічної щільності елементів паливної апаратури високого тиску суднових дизелів – на суднах «White Eagle» та «White Pearl» ТОВ «Marine Crew Management»; що забезпечило поліпшення експлуатаційних характеристик і технічного стану плунжерів паливних насосів високого тиску та розпилювачів форсунок суднових середньообертових дизелів «Pielstik» 8-PC2.5L400 та Cummins KTA19 та сприяло 1,8...3,3 %-му зниженню витрати палива та 2,8...8,5 %-му зниженню витрати мастила суднових дизелів, що виконують функції головних та допоміжних двигунів (відповідно до акту ТОВ «Marine Crew Management»);

- технологія додавання поверхнево-активних речовин у циркуляційну систему мащення та методика контролю остаточної концентрації поверхнево-активних речовин в об'ємі системи мащення – при експлуатації суднових середньообертових дизелів 6EY22AW Yanmar, що входять до складу допоміжної енергетичної установки морських суден «Ocean Haven» та «Ocean Treasure» ТОВ «Каалбай Шиппінг Україна»; що забезпечило: 18...27 %-е зниження масового зносу вкладишів підшипників, 6,3...10,8 %-е зниження витрати мастила на випал, 1,3...2,5 %-е зниження питомої витрати палива, 3,9...14,7 %-е зниження потужності механічних втрат (акт від 17.03.2017 р.);

- технологія підвищення гідравлічної щільності елементів паливної апаратури високого тиску – під час експлуатації суднових дизелів Wartsila Marine Engines морського судна “Pacific Mistral” та STX MAN Marine Engines судна “Pacific Scirocco”, що забезпечило 1,3...2,7 %-е зниження питомої витрати палива, (відповідно до акту судноплавної компанії “Pacific Drilling”);

- у навчальний процес Національного університету «Одеська морська академія» (акт від 31.05.2019 р.).

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень і рекомендацій. Наукові положення та результати, що отримані в дисертаційному дослідженні достовірні, оскільки базуються на проведеному інформаційному пошуку, розробленій математичній моделі, збігу аналітичних та експериментальних значень досліджених параметрів, а також актах впровадження на енергетичних комплексах морських засобів транспорту.

Особистий внесок автора. У дисертаційному дослідженні викладено авторський підхід до розв’язання важливої науково-прикладної проблеми – забезпечення мінімального рівня незворотних втрат енергії, що неминуче виникають у пропульсивних комплексах морських та річкових засобів транспорту. Наукові положення, теоретичні визначення, технологічні розробки та науково-практичні рекомендації, що висвітлені у роботі та виносяться на захист, отримані автором особисто (під час проведених ним наукових досліджень у Національному університеті «Одеська морська академія», а також на морських суднах, що належать українським та закордонним судноплавним компаніям) та

викладені у його наукових працях. З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертації використані тільки ті положення, які належать автору особисто: [1, 6, 10, 29] – проведення експериментальних досліджень та обробка отриманих результатів; [2, 13] – розробка схеми експериментальної установки, проведення експерименту, аналіз та оформлення результатів; [3, 17] – проведення експериментальних досліджень з визначення оптимальної концентрації поверхнево-активних речовин; [4, 24, 26, 33, 36, 37, 47] – розробка технології проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів; [5, 53, 54] – розробка алгоритму підготовки циркуляційної змащувальної системи дизеля у випадку виникнення екстремальних умов експлуатації; [7] – переустаткування штатної суднової циркуляційної змащувальної системи, проведення експерименту, аналіз отриманих результатів; [8, 16, 35, 43] – проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів; [9] – проведення інформаційного пошуку; [11, 12, 15, 22, 44, 45] – проведення досліджень на судових двигунах внутрішнього згоряння, обробка та аналіз отриманих результатів; [14] – проведення експериментальних досліджень, обробка отриманих результатів; [18, 51, 52] – аналіз зміни основних реологічних характеристик мастильних матеріалів судових дизелів; [23, 25, 57] – постановка експерименту, обробка й аналіз результатів; [30] – дообладнання суднової системи підготовки палива, проведення експерименту, аналіз отриманих результатів; [31, 59] – аналіз працездатності елементів паливної апаратури високого тиску, проведення експериментальних досліджень, обґрунтування заходів щодо підвищення ефективності судового енергетичного комплексу; [32] – складання математичного опису процесу зміни реологічних характеристик моторних мастил під час експлуатації мастильної системи судового дизеля; [34, 41] – визначення динаміки зміни параметрів робочого процесу судових дизелів; [38] – проведення інформаційного пошуку, проведення експерименту, аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень за темою дисертаційної роботи неодноразово доповідалися на ряді міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, зокрема: V Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» 10.11.2011-11.11.2011. – Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова; науково-технічній конференції «Енергетика суден. Експлуатація та ремонт», 05.04.2011-07.04.2011. – Одеса, ОНМА; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсон – 2011, ХДМА; науково-технічній конференції «Суднові енергетичні установки. Експлуатація та ремонт», 21.03.2012 – 23.03.2012. – Одеса, ОНМА; науково-технічній конференції «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», 20.03.2013- 22.03.2013. – Одеса; ОНМА; VI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2014» (27-29 травня 2014 р., м. Херсон) – Херсон; ХДМА; III Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування», 19-21 листопада 2014 р. – Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова; VII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та

інноваційні технології на транспорті – MINTT-2015» (26-28 травня 2015 р., м. Херсон) – Херсон, ХДМА, 2015; науково-технічній конференції «Річковий та морський флот : експлуатація і ремонт», 23.03.2017 – 24.03.2017 – Одеса, НУ «ОМА»; VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика : стан та проблеми». – Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова, 2017 р.; X Міжнародній науково-практичній конференції MINTT-2018, 29-31 травня 2018 р. – Херсон, ХДМА; Міжнародній науково-технічній конференції «Річковий та морський флот : експлуатація і ремонт», 22.03.2018–23.03.2018 р. – Одеса, НУ «ОМА»; науково-технічній конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 21.03.2019–22.03.2019 – Одеса, НУ «ОМА»; 10-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 12-13 вересня 2019 р. – Херсон, ХДМА; XIIIth International Research and Practice Conference «Science and Education», Munich, November 2nd–3rd, 2016. – Munich, Germany; XVIth International Research and Practice Conference «European Science and Technology», Munich, March 14th–15th, 2017. – Munich, Germany; International Conference «Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration», August 31, 2019, Beijing, China.

Публікації. За темою дисертації здобувачем опубліковано 67 наукових праць, з яких 28 – у наукових фахових виданнях України (що входять до переліку наукових фахових видань України, які рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук); 9 – в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 13 – в інших іноземних виданнях (7 – у наукових журналах, та 6 – у збірках матеріалів наукових конференцій); 17 – у збірниках за матеріалами міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 402 сторінки, зокрема: основний текст – 323 сторінки з анотацією на 25 сторінках, список використаних джерел із 312 найменувань на 41 сторінці, додатки – 8 сторінок, 84 рисунки, 34 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми, сформульовані мета та комплексне завдання наукового дослідження, визначені наукова новизна й практичне значення отриманих результатів, показано особистий внесок автора в їх отриманні, охарактеризовані повнота викладення матеріалів дослідження у публікаціях, апробація результатів дослідження та їх впровадження.

У **першому розділі** «Основні напрямки зниження неминучих втрат енергії під час експлуатації енергетичних комплексів морських і річкових засобів транспорту» на основі традиційного філософського методу сходження від «загального» через «часткове» до «особистого» здійснено огляд результатів наукових досліджень, які спрямовані на зниження неминучих втрат енергії під час експлуатації енергетичних комплексів морських та річкових засобів транспорту.

Головною мотивацією цих досліджень є сьогоденна наявність **запитів практики**:

- на забезпечення необхідного рівня мінімально неминучих незворотних втрат енергії під час перетворення теплотворної здатності палива (яке є початковим джерелом енергії) на кінетичну енергію поступового руху КШМ та обертального руху колінчастого валу та на корисну роботу пов'язаних з цими елементами споживачів енергії морських та річкових засобів транспорту;
- на підвищення енергетичної ефективності суднового пропульсивного комплексу річкових та морських засобів транспорту;
- на забезпечення перебігу гідродинамічного або граничного режиму мащення основних ТС (насамперед поршневе кільце – мастильний матеріал – втулка циліндра, колінчастий вал – мастильний матеріал – вкладиш підшипника, плунжер – мастильний матеріал – втулка ПНВТ) судових ДВЗ (які встановлені на морських та річкових засобах транспорту) без контактних взаємодій;
- на підтримання та можливість поновлення реологічних характеристик моторного мастила, що використовується у циркуляційних системах мащення судових дизелів річкових та морських засобів транспорту;
- на попередження підвищеного зносу деталей ЦПГ та підшипників ковзання ДВЗ морських та річкових засобів транспорту з одночасним підвищенням зносостійкості та ресурсу цих деталей;
- на впровадження в енергетичні комплекси річкових та морських суден методів, що сприяють підвищенню паливної економічності засобів транспорту в умовах експлуатації;
- на зменшення втрат індикаторної потужності, яка розвивається в циліндрах двигунів внутрішнього згоряння засобів транспорту, та теплової енергії, що витрачається на отримання цієї потужності.

Конструкційні та технологічні заходи, що забезпечують зниження неминучих втрат енергії під час експлуатації морських та річкових засобів транспорту (як безпосередньо морського судна так і суднового ДВЗ), розглядалися в різних роботах. Підвищення енергетичної ефективності судових пропульсивних комплексів вивчалось провідними українськими вченими Будашком В. В., Голіковим В. А., Голіковим В. В., Горбом С. І., Онищенком О. А., Радченком Р. Н., Сербіним С. І., Тимошевським Б. Г., Ткачем М. Р. Вони розробили, запропонували і впровадили в судову енергетику комплекс теоретичних розв'язань, технологічних і конструктивних ідей, які сприяють не тільки підвищенню ефективного ККД теплових двигунів і пропульсивного ККД СЕУ, а й енергетичній ефективності судна.

На підставі аналізу сучасних концепцій розвитку судових дизелів (як джерела енергії засобів транспорту), що забезпечують мінімальний рівень неминучих незворотних втрат енергії у СПК встановлено **наявність наступних нерозв'язаних проблем** під час трансформації вхідної енергії (яка забезпечується шляхом згоряння палива) у вихідну ефективну потужність дизеля та пов'язаного з ним споживача енергії (гребного гвинта або генератора електричного струму) морських та річкових засобів транспорту:

- порушення (за відповідних умов) режимів мащення основних ТС судових ДВЗ морських та річкових засобів транспорту;

- збільшення витрати моторного мастила на випал;
- збільшення питомої витрати палива на отримання необхідного значення ефективної потужності;
- підвищення зношування основних контактних поверхонь судових ДВЗ (поршневих кілець, вкладишів підшипників, плунжерів ПВНТ) морських та річкових засобів транспорту;
- підвищення часу встановлення сталого швидкісного режиму зі зміною навантаження на дизель;
- погіршення експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується у системах циркуляційного мащення ДВЗ морських та річкових засобів транспорту;
- відхилення у негативній бік реологічних характеристик моторного мастила під час тривалого або короткочасного переходу режиму мащення з гідродинамічного на граничний;
- погіршення технічного стану контактних поверхонь деталей та вузлів ТС дизелів морських та річкових засобів транспорту;
- підвищення значень потужності механічних втрат та пов'язане з цим зменшення ефективної потужності двигунів внутрішнього згоряння морських та річкових засобів транспорту.

Аналіз досвіду проектування й експлуатації СПК, що забезпечують мінімально неминучі незворотні втрати, показує, що їх вдосконалення доцільно вести за наступними напрямками:

- підвищення стійкості роботи деталей КШМ (в ТС поршневі кільця – мастильний матеріал – втулка циліндра) і підшипників руху (мотильових і рамових, що працюють у режимі гідродинамічного, а особливо граничного мащення);
- зниження втрат енергії за рахунок підвищення пружно-демпфуючих властивостей мастильного матеріалу, що забезпечує процеси мащення та охолодження КШМ і підшипників, а також працездатний стан колінчастого вала і лінії валопроводу;
- мінімізація гідравлічних втрат і контактних навантажень у паливній апаратурі високого тиску;
- підвищення ресурсу контактних поверхонь основних трибосполучень дизеля, вала і гребного гвинта;
- розвиток методів діагностики технічного стану вузлів і деталей дизеля, а також функціональних характеристик робочих рідин, що забезпечують отримання корисної роботи;
- удосконалення методів, що сприяють зниженню термічних і динамічних навантажень на рухомі і нерухомі деталі дизеля і валопроводу.

Реалізація цих завдань повинна враховувати не тільки специфіку забезпечення перебігу робочого процесу в циліндрі дизеля з максимальною тепловою й енергетичною ефективністю, але й особливості функціонування основних контактних вузлів дизеля в умовах гідродинамічного і граничного мащення.

Застосовувані на даний час на морських і річкових суднах заходи, що забезпечують необхідний рівень мінімально неминучих незворотних втрат, ґрунтуються на зниженні витрат енергії на подолання механічних втрат; підтримці економічності роботи теплових двигунів; виконанні заданих швидкісних і потужнісних характеристик СПК. При цьому суворо виконуються нормативних вимог з технічної експлуатації суднових технічних засобів, а також – положення міжнародних і національних нормативних актів і документів щодо захисту довкілля.

Оцінка енергетичної ефективності роботи засобів транспорту (зокрема морських суден), а також прогнозування їх безаварійної роботи здійснюється виходячи із загальноприйнятих методик; досвіду і практики їх експлуатації; статистики відмов і аварійних ситуацій; які не враховують особливості роботи основних контактних вузлів тертя ДВЗ (як одного з компонентів СПК) – деталей КШМ і підшипників колінчастого вала, у разі постійної зміни теплових, механічних і динамічних навантажень в умовах постійно мінливої реології робочих рідин. Ці зміни відображаються на експлуатаційних, реологічних і триботехнічних характеристиках робочих рідин (передусім палива і моторного мастила) і призводять до некерованої дисипації корисної енергії.

Виниклі таким чином протиріччя між нормативними способами визначення енергетичних показників судна і дійсним характером розподілу корисної енергії у всьому комплексі її передачі від джерела виникнення до споживача, істотно ускладнюють теоретичний опис та аналітичні розрахунки щодо визначення мінімально неминучих незворотних втрат енергії. Виникаючі при цьому некеровані процеси дисипації енергії в ТС суднових дизелів вимагають їх комплексного вивчення.

Експериментальні дослідження в цьому напрямку ускладнюються неминучістю проведення теплотехнічного контролю практично всіх основних конструкційних вузлів двигуна, а також необхідністю врахування великого діапазону зміни зовнішніх температурних режимів. Тому для розробки достовірних методик оцінки процесу енергоперетворення на суднах із мінімально неминучими незворотними втратами доцільно використовувати аналітичні методи, які дають можливість отримати розрахункові значення не прямих показників енергоефективності (теплових потоків в комплексі теплотворна здатність палива – ефективне тепловиділення в робочому циклі), а непрямих параметрів використання енергії (корисної потужності і втрат на тертя). При цьому дані аналітичні методи повинні враховувати особливості стану робочих рідин (палива і мастила).

На підставі проведеного аналізу обґрунтована актуальність науково-прикладної проблеми – енергоресурсозбереження у пропульсивних комплексах річкових та морських засобів транспорту шляхом управління мінімально неминучими незворотними втратами енергії.

У **другому розділі** «Методологія наукового дослідження процесу забезпечення мінімально неминучих незворотних втрат енергії під час експлуатації морських і річкових засобів транспорту» наведено методологію

наукового дослідження процесу забезпечення мінімально неминучих незворотних втрат під час експлуатації морських та річкових засобів транспорту.

Розроблення технічних заходів щодо мінімізації неминучих незворотних втрат енергії обмежується сукупністю конфліктних факторів і ситуацій, основними з яких є:

- одночасне зростання буксирувальної потужності СПК та втрат механічної енергії в КШМ і пов'язаних із ним споживачах енергії;

- необхідність тимчасового підвищення динамічних та теплових навантажень ЦПГ та КШМ дизеля у випадку екстреного збільшення швидкісного режиму роботи СПК або при зростанні зовнішніх дій на корпус судна (сили вітру, хвилювання моря, глибини фарватерів), а також погіршенні стану корпусу судна та гребного гвинта (підвищенні шорсткості, обростанні, кавітаційному зносі);

- підтримання стійкості швидкісного режиму дизеля із постійною зміною навантаження під час постачання енергії споживачам для виконання підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт;

- підвищення рівня технічної експлуатації морських та річкових засобів транспорту в умовах погіршення експлуатаційних характеристик робочих речовин, що забезпечують процес трансформації енергії від його джерела до споживачів;

- забезпечення гідродинамічного режиму мащення в трибосполученнях ДВЗ під час постійного зростання їх питомої потужності та масових характеристик деталей руху (підшипників, колінчастого валу, валопроводу, а також гвинта або генератора струму);

- необхідність вивчення закономірностей змінювання технічного стану засобів транспорту за умови їх експлуатації з використанням змащувальних матеріалів, які є неньютонівською рідиною;

- підвищення площі дзеркала циліндрової втулки за необхідності зменшення кількості моторного мастила, яке подається для її мащення;

- зменшення зазору між колінчастим валом та підшипником за необхідності забезпечення гідродинамічного режиму мащення;

- зростання тиску нагнітання ПНВТ у разі погіршення експлуатаційних характеристик суднових моторних палив;

- необхідність створення сучасних технологій підтримання або поновлення реологічних характеристик мастильних матеріалів та можливості їх впровадження в структуру морських засобів транспорту;

- затребуваністю у нанотехнологіях при створенні умов для високоефективного використання засобів транспорту з одночасною складністю цього процесу та обмеженням в його управлінні, що обумовлюються людським фактором.

На базі аналізу стану проблеми обґрунтовано вибір напрямку наукового дослідження, заснований на проведеній експертній оцінці можливих варіантів розв'язання завдання забезпечення мінімально неминучих незворотних втрат енергії під час отримання корисної роботи в суднових енергетичних установках за наступними критеріями: актуальність, наукова новизна, економічна

ефективність, можливість використання в умовах морського судна, відповідність паспорту спеціальності, а також основним напрямкам і науковій школі.

За результатами експертних оцінок найбільш оптимальним і доцільним слід визнати спосіб удосконалення теоретичного опису і розробки практичних рекомендацій щодо зниження мінімально неминучих незворотних втрат за рахунок підтримки реологічних характеристик робочих рідин (мастила і палива), що забезпечують функціонування енергетичних установок річкових і морських транспортних засобів, у зв'язку з цим саме на його розвиток спрямоване наукове дослідження і тема дисертації, яка відповідає окремим положенням Транспортної стратегії України на період до 2030 року та паспорту спеціальності 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту (пп. 1, 2, 4, 6, 7, 8, 11, 12).

Застосування системного аналізу дозволило сформулювати мету; висунути гіпотезу; визначити комплексне завдання дослідження, здійснити її декомпозицію на ряд головних і далі на сукупність допоміжних завдань, вказаних у загальній характеристиці автореферату.

Для розв'язання комплексного завдання у роботі сформульовані та розв'язані наступні наукові завдання: розробка математичної моделі процесу дисипації енергії з урахуванням її розповсюдження в анізотропному середовищі зі змінною реологією робочих рідин; розробка концептуального підходу до оцінки анізотропії енергетичних втрат із граничним і гідродинамічним режимами роботи ТС суднових пропульсивних комплексів; визначення рівня дисипації енергії в ТС суднових дизелів, розділених багатозфазним шаром мастильного матеріалу; визначення діапазону стратифікації в'язкості мастильного матеріалу, що розділяє поверхні під час їх обертального і поступального руху; забезпечення самоорганізації наноструктури граничних шарів робочих рідин (палива і мастила), що дозволяють поліпшити триботехнічні характеристики ТС суднових дизелів, гарантуючи у такий спосіб підтримання мінімально неминучих незворотних втрат; управління реологічними характеристиками робочих рідин, що забезпечують перебіг процесу перетворення енергії з мінімально неминучими незворотними втратами; визначення резервів зниження енергетичних втрат із поступальним переміщенням у ТС паливної апаратури високого тиску; підвищення пружних властивостей моторних палив, що дозволяють поліпшити триботехнічні характеристики прецизійних пар паливної апаратури високого тиску; управління триботехнічними характеристиками контактних поверхонь ТС ПНВТ.

Розв'язання комплексного завдання дисертаційного дослідження виконано шляхом синтезу наукових положень, що отримані під час розв'язання головних завдань. Описаний замкнений цикл наукового дослідження системно представлений у вигляді технологічної карти дослідження.

Третій розділ «Управління процесом енергоперетворення під час обертального руху контактних вузлів» присвячено розв'язанню першого головного завдання. Першим кроком для цього постала розробка математичної моделі процесу поширення енергії під час контактної взаємодії твердих тіл, розділених анізотропним мастильним матеріалом.

Мінімально неминучі втрати, що виникають під час перетворення потенційної енергії палива на корисну роботу та обертальний рух споживачів енергії, залежать від контактних взаємодій, що відбуваються в цих ТС. Причому якісні і кількісні показники процесу енергоперетворення змінюються залежно від характеристик мастильного матеріалу, який є складовою частиною цих трибологічних систем.

Процеси енергоперетворення, які виникають у суднових ДВЗ, а також тривалість їх надійної та безаварійної роботи суттєво залежать від роботи пар ковзання, що забезпечують обертальний або поступальний рух деталей дизеля. Тому дослідження нормальних і дотичних напружень, визначення площ контакту в парах ковзання, вивчення впливу якості мастил на вказані характеристики є фундаментальними завданнями для прогнозування рівня мінімально неминучих незворотних втрат та довговічності роботи суднових ДВЗ.

До розв'язання вказаного завдання застосуємо метод фундаментальних розв'язків, або функцій впливу. Для цього скористаємося фундаментальними розв'язками для циліндра радіуса R_1 , і для нескінченного тіла з циліндричною порожниною радіусу R_2 , які завантажені стискаючими радіально зосередженими силами P в умовах деформації, спрямованої перпендикулярно осі симетрії циліндра радіусом R_2

Припустивши, що контактний тиск $p(\psi)$ збігається із зовнішнім тиском на пару тертя, і скориставшись принципом суперпозиції, переміщення граничних точок межі циліндра $u_1(\psi)$ і циліндричної порожнини $u_2(\psi)$ залежно від кута ψ , з урахуванням фундаментальних розробок Штаермана І. Я. відносно розв'язання контактної задачі Герца, представимо у вигляді згортки

$$u_1(\psi) = R_1 \int_{-\psi_0}^{\psi_0} p(\varphi) \left\{ k_1 \sin|\psi - \varphi| - 2\theta_1 \left[1 + \cos(\psi - \varphi) \ln \left(\frac{|\psi - \varphi|}{2} \right) \right] \right\} d\varphi \quad (1)$$

$$u_2(\psi) = R_2 \int_{-\psi_0}^{\psi_0} p(\varphi) \left\{ -2\theta_2 \cos(\psi - \varphi) \ln \left(\frac{|\psi - \varphi|}{2} \right) - k_2 \sin|\psi - \varphi| \right\} d\varphi \quad (2)$$

Подання (1), (2) доповнюються наведеними у дисертації залежностями, що враховують гладке примикання елементів пари на кінцях площі контакту та умову силової рівноваги, що дає можливість відносно невідомого контактного напруження $p(\psi)$ отримати наступне інтегральне рівняння

$$\int_{-\psi_0}^{\psi_0} p(\varphi) \left\{ 2\chi_1 \cos(\psi - \varphi) \ln \left(\frac{|\psi - \varphi|}{2} \right) - \chi_2 \sin|\psi - \varphi| \right\} d\varphi + \mu_1 \int_{-\psi_0}^{\psi_0} p(\varphi) d\varphi = \\ = \alpha \cos \psi - \delta(1 - \cos \psi), \quad \psi \in (-\psi_0; \psi_0),$$

де $\mu_1 = \theta_j R_j$, $\chi_1 = \mu_1 + \mu_2$, $\chi_2 = k_1 R_1 - k_2 R_2$,

яке можливо привести до наступного інтегрально-диференційного рівняння з ядром Гілберта

$$\mu_0 p(\psi) + \int_{-\psi_0}^{\psi_0} p'(\varphi) \operatorname{ctg}(\psi - \varphi) d\varphi = \gamma, \quad \psi \in (-\psi_0; \psi_0),$$

$$\text{де } \mu_0 = -\frac{\chi_2}{\chi_1}, \quad \gamma = -\frac{\mu_2}{\chi_1} \int_{-\psi_0}^{\psi_0} p(\varphi) d\varphi - \frac{\delta}{2\chi_1}.$$

У дисертаційному дослідженні його розв'язання виконано застосуванням методу ортогональних многочленів, згідно з яким контактне напруження подаємо так:

$$p(\psi) = \frac{\sqrt{2(\cos 2\psi - \cos 2\psi_0)}}{\cos \psi} \sum_{j=1}^{\infty} b_j U_{2j-2} \left(\frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi_0} \right),$$

де $U_j(x)$ – многочлени Чебишева другого роду;
або у вигляді наступного апроксимаційного двочлена

$$p(\psi) = k_1 \cos \left(\frac{\pi \psi}{2\psi_0} \right) + k_2 \cos \left(\frac{3\pi \psi}{2\psi_0} \right). \quad (3)$$

Коефіцієнти k_1, k_2 в поданні (3) і кут ψ_0 можуть бути визначені безпосередньо із умови силової рівноваги.

Наявність анізотропії мастильного шару в трибологічній системі суттєво впливає на процес енергоперетворення та на зміну динаміки цього процесу. Існуючі методи дослідження цих процесів базуються на рівняннях Нав'є-Стокса і різних їх спрощень. Зокрема, тиск у мастильному шарі вважається розподіленим рівномірно за товщиною шару (принцип Максвелла), тобто не залежить від радіусу: $p=p(\psi, z, t)$. У цьому випадку рух тонких мастильних шарів між поверхнями ТС, що забезпечує поступальний чи обертальний рух пари ковзання, можна описати наступним рівнянням Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{R_2 \partial \psi} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial \rho}{R_2 \partial \psi} \right) + \frac{\partial}{R_2 \partial z} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial \rho}{R_2 \partial z} \right) = 6\omega R_1 \frac{\partial(\rho h)}{R_2 \partial \psi} + 12 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t},$$

де ψ, z, t – відповідно кругова і повздовжня координати і час процесу; ρ – густина мастила, кг/м^3 ; μ – динамічна в'язкість; $h=h(\psi, z, t)$ – товщина мастильного шару; ω – кутова швидкість обертання, рад/с ; R_1, R_2 – відповідно радіуси тіла обертання і зовнішнього нерухомого циліндричного тіла, м.

Під час вивчення процесу енергоперетворення, що виникає у ТС за наявності мастильного шару між парами тертя, виникає необхідність дослідити рух

мастильного шару саме на ділянці безпосереднього контакту внутрішнього та зовнішнього елементів пари ковзання.

З урахування співвідношення Баруса

$$\mu = \mu_0 e^{\xi p(\psi)},$$

яке враховує, що мастило є нестисливою рідиною, питомий тиску $p(\psi)$ в мастильному шарі

• для ньютонівських мастил

$$p(\psi) = 6\mu_0\omega_0 \frac{\varepsilon_0 r_0}{\delta_0^2} \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{(\cos \alpha - \cos \psi_0)}{(1 + \varepsilon_0 \cos \alpha)^3} d\alpha, \quad \psi_1 < \psi < \psi_2; \quad (4)$$

• для неньютонівських мастил

$$p(\psi) = -\frac{1}{\xi} \ln \left(6\xi\mu_0\omega_0 \frac{\varepsilon_0 r_0}{\delta_0^2} \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{(\cos \alpha - \cos \psi_0)}{(1 + \varepsilon_0 \cos \alpha)^3} d\alpha \right), \quad \psi_1 < \psi < \psi_2. \quad (5)$$

Отримані вирази (4), (5) дозволяють знайти вирази для ключових характеристик роботи пари ковзання.

Зокрема, питоме (за довжиною пари ковзання) загальне навантаження P , у робочій зоні пари ковзання (у несучому мастильному шарі) можна подати так:

$$P = R_1 \int_{\psi_1}^{\psi} \cos(\pi - (\psi + \psi_0)) p(\psi) d\psi.$$

Остання рівність, з урахуванням подання (4), для ньютонівського мастила дозволяє отримати наступну формулу:

$$P = R_1 6\mu_0\omega_0 \frac{\varepsilon_0 r_0}{\delta_0^2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \cos(\pi - (\psi + \psi_0)) d\psi \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{(\cos \alpha - \cos \psi_0)}{(1 + \varepsilon_0 \cos \alpha)^3} d\alpha.$$

Для неньютонівського мастила отримаємо таку формулу:

$$P = \frac{R_1}{\xi} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \cos(\psi + \psi_0) \ln \left(6\xi\mu_0\omega_0 \frac{\varepsilon_0 r_0}{\delta_0^2} \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{(\cos \alpha - \cos \psi_0)}{(1 + \varepsilon_0 \cos \alpha)^3} d\alpha \right) d\psi.$$

Введемо наступні безрозмірні коефіцієнти, які називають коефіцієнтом навантаження (або коефіцієнтом, що враховує незворотні втрати) пари ковзання:

• для ньютонівських мастил

$$\Phi_P = \Phi_P(\varepsilon_0, \psi_1, \psi_2) = -3\varepsilon_0 \int_{\psi_1}^{\psi_2} \cos(\psi + \psi_0) d\psi \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{(\cos \alpha - \cos \psi_0)}{(1 + \varepsilon_0 \cos \alpha)^3} d\alpha, \quad (6)$$

• для неньютонівських мастил

$$\Phi_{P,\Theta} = \Phi_{P,\Theta}(\varepsilon_0, \psi_1, \psi_2, \Theta) = \int_{\psi_1}^{\psi_2} \cos(\psi + \psi_0) \ln \left(2\Theta \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{(\cos \alpha - \cos \psi_0)}{(1 + \varepsilon_0 \cos \alpha)^3} d\alpha \right) d\psi, \quad (7)$$

$$\text{де } \Theta = 3\xi\mu_0\omega_0 \frac{\varepsilon_0 r_0}{\delta_0^2}.$$

З урахуванням формули (6) загальне навантаження в робочій зоні пари ковзання для ньютонівських мастил подаємо так:

$$P = 2R_1\mu_0\omega_0 \frac{r_0}{\delta_0^2} \Phi_P.$$

Для неньютонівського мастила, з урахування співвідношення (7), отримаємо наступну формулу:

$$P = \frac{R_1}{\xi} \Phi_{P,\Theta}.$$

Як критерії надійності роботи ТС суднових дизелів, що забезпечують процес енергоперетворення з мінімально неминучими незворотними втратами, оберемо критерій Зоммерфельда, який визначає умову наявності достатнього мастильного шару в робочій зоні ТС, тобто визначає, чи тертя в робочій зоні є рідинним або граничним.

В основі критерію Зоммерфельда лежить безрозмірний числовий параметр, який визначають так:

$$\overline{So} = \frac{p_s \delta_0^2}{\mu \omega_0},$$

де $p_s = P(2R_1)^{-1}$ – середній питомий тиск.

За допомогою числа Зоммерфельда $\overline{So}$ визначається нижня межа допустимої динамічної в'язкості, за якою виникає достатній мастильний шар у робочій зоні пар ковзання суднових ДВЗ, а саме

$$\mu \geq \frac{p_s \delta_0^2}{\omega_0 \overline{So}}. \quad (8)$$

Подальшим кроком теоретичного дослідження була визначена модель, що описує механізм утворення орієнтаційно впорядковано пристінного шару (ОВПШ) вуглеводних рідин поблизу поверхні металевго тіла. Встановлено, що у зв'язку з двосторонньою дією на граничний мастильний шар Ван-дер-Ваальсових сил, теоретичний опис явищ, які відбуваються в наноструктурованих шарах вуглеводневих рідин, що поділяють металеві поверхні тертя, необхідно виконувати з урахуванням моделі Ландау-де-Жена, яка (на відміну від інших) враховує не тільки товщину граничного мастильного шару, але й ступінь впорядкованості молекул анізотропної фази (параметр порядку орієнтаційної впорядкованості).

Теоретичними дослідженнями встановлено, що здатність вуглеводних рідин утворювати біля металевих поверхонь ОВПШ, які сприяють підвищенню пружно-демпфуючих властивостей рідини та протидіють контактним напруженням, визначається вільною енергією ОВПШ

$$F_0 = \rho k_B T z_0 \int d^2 a_1 f(a_1 \cdot n) \ln f(a_1 \cdot n) - \\ - \frac{1}{2} \rho^2 z_0 \int d^2 a_1 \int d^2 a_2 f(a_1 \cdot n) f(a_2 \cdot n) \int d^3 r_{12} V_{12}(a_1, a_2, r_{12}) - \\ - \rho \int d^2 a_1 f(a_1 \cdot n) \int_0^{z_0} dz V_s(a_1, z); \quad (9)$$

де ρ – повна густина всіх молекул; k_B – стала Больцмана; T – температура; z_0 – відстань до металевої поверхні; a_1, a_2 – одиничні вектори орієнтації ізолюваних молекул і молекулярних асоціатів у ОВПШ; f – функція розподілення молекул за кутом нахилу відносно напрямку вектора-директора у шарі; n – вектор переважного розташування довгих осей молекул, r_{12} – відстань між молекулами, V_{12} – об'єм, що займає орієнтаційно впорядкований наноструктурований граничний змащувальний шар (ГЗШ); V_s – загальний об'єм рідини.

У рівнянні (9) перший доданок є орієнтаційною ентропією, другий доданок описує взаємодію молекул між собою, а третій – взаємодію молекул із поверхнею. Розкладемо ефективну взаємодію молекул між собою і з поверхнею підкладки в ряд за поліномами Лежандра

$$\rho \int d^3 r_{12} V_{12}(a_1, a_2, r_{12}) = J_{12}^{(0)} + J_{12}^{(2)} P_2(a_1 \cdot a_2) + \dots, \\ \frac{1}{z_0} \int_0^{z_0} dz V_s(a_1, z) = +J_s^{(0)} - J_s^{(2)} P_2(a_1 \cdot \vec{k}) + \dots; \quad (10)$$

де $J_{12}^{(0)}$, $J_{12}^{(2)}$, $J_s^{(0)}$, $J_s^{(2)}$ – позначення, що враховують інтенсивність взаємодії молекул (1) і димерів (2), а також з металевою поверхнею (S) у поліномах Лежандра 0-го та 2-го порядку; P_2 – поліноми Лежандра 2-го порядку; $\vec{k}$ – одиничний вектор, перпендикулярний до металевої поверхні.

Рівняння (9) і (10) доповнюються наведеними у дисертації залежностями, що враховують переважне гомеотропне розташування молекул (яке характерне саме для технічних вуглеводних рідин), у результаті отримаємо такий вираз для вільної енергії:

$$\frac{F_0}{\rho_0 z_0} = k_B T \int d^2 a_1 f(a_1 \cdot n) \ln[f(a_1 \cdot n)] - \frac{1}{2} J_{12}^{(2)} S_0^2 + J_2^{(2)} S_0 P_2(a_1 \cdot n),$$

який дозволяє визначити параметр орієнтаційної впорядкованості молекул наноструктурованого шару:

$$S_0 = \int d^2 a P_2(a \cdot n) f(a \cdot n).$$

Для практичного застосування теорії утворення ОВПШ та оцінки його енергетичної ефективності є важливим значення саме параметра орієнтаційної впорядкованості S , який можна визначити за допомогою оптичних методів дослідження.

Відмінність від нуля орієнтаційного параметра порядку S у діапазоні товщини ОВПШ призводить до анізотропії оптичних характеристик (зокрема коефіцієнтів заломлення та поглинання світла). Це надає можливість визначити S з виразу $S = 1 - \mu_s / \mu_{iso}$, де μ_s , μ_{iso} – коефіцієнти поглинання лінійно поляризованого світла пристінного шару та ізотропної рідкої фази, та розрахувати товщину ОВПШ d_s .

Спектральні дослідження проводилися для мастил Castrol Vection 15W40 і Shell Rimula R4X 15W40 у діапазоні товщини 0...60 мкм (що відповідало технологічному зазору в ТС вал – мастильний шар – вкладиш підшипника суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A); для мастил Castrol TLX PLUS 404 і Shell Navigo Terepo 40/40 у діапазоні товщини клиноподібного зазору 0...80 мкм (що відповідало технологічному зазору в ТС вал – мастильний шар – вкладиш підшипника суднового дизеля MAN-B&W V32/40). Значення параметра порядку S і товщини ОВПШ d_s досліджених моторних мастил наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики орієнтаційно впорядкованих ГЗШ моторних мастил

Марка моторного мастила	Характеристика	
	Параметр порядку, S	Товщина ГЗШ, d_s , мкм
Shell Rimula R4X 15W40	0,58...0,59	14,7...15,0
Castrol Vection 15W40	0,63...0,64	17,1...17,5
Shell Navigo Terepo 40/40	0,48...0,49	13,7...14,1
Castrol TLX PLUS 404	0,55...0,56	16,0...16,3

Подальшими дослідженнями були визначені аномальні характеристики в'язкості ГЗШ. Ряд попередніх досліджень, виконаних за цим напрямком

Б. А. Алтоїзом, Ю. М. Поповським, О. Ю. Поповським, проводилися не з технічними мастилами, а з ароматичними вуглеводнями. Питання стратифікації в'язкості моторних мастил, що знаходяться між металевими поверхнями, досліджував С. В. Кіріян, ним же було запропоновано методику вимірювання в'язкості в тонких граничних шарах за допомогою ротаційного віскозиметра. За допомогою даної методики нами були вивчені зміни реологічних характеристик моторних мастил у діапазоні товщини, що відповідає зазорам у парах тертя судових дизелів.

Встановлені в результаті проведених досліджень залежності в'язкості ν від швидкості зсуву γ' (рис. 1) підтверджують «неньютонівський» характер течії мастильного матеріалу у вузькому зазорі пари тертя вал – вкладиш підшипника.

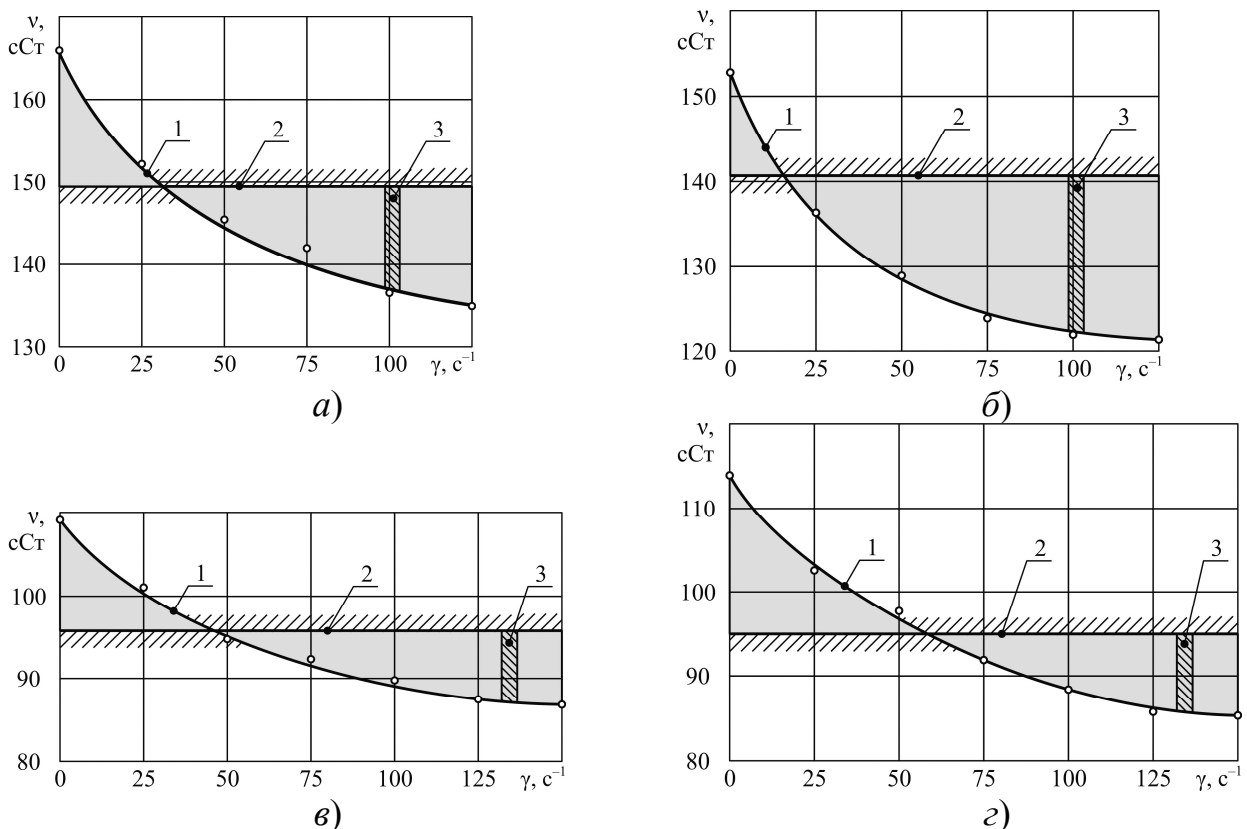


Рис. 1. Залежність в'язкості моторного мастила від швидкості зсуву із товщиною мастильного шару 40 мкм:

1 – в'язкість граничного мастильного шару; 2 – об'ємна в'язкість; 3 – зона номінального навантаження

а) мастило Castrol TLX PLUS 404; б) мастило Shell Navigo Tepeo 40/40;

в) мастило Castrol Vection 15W40; г) мастило Shell Rimula R4X 15W40

Для оцінки адекватності розробленої математичної моделі виконувалися експериментальне визначення в'язкості моторного мастила для різного зазору у контактній парі (а відповідно – і різної товщини шару мастила), а також її аналітичний розрахунок за виразом (8) з урахуванням критерію Зомерфельда. Результати оцінки наведено на рис. 2 та підтверджують адекватність моделі дійсному процесу і можливість її використання для моделювання процесів трансформації механічної енергії.

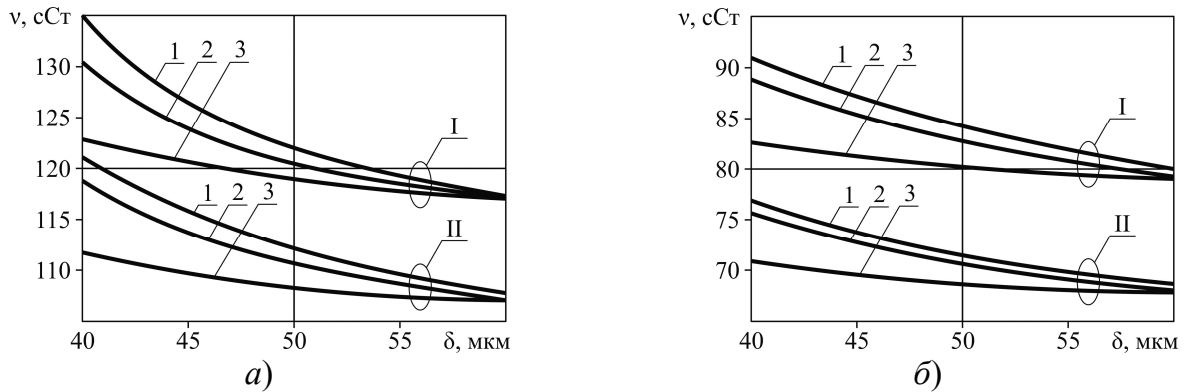


Рис. 2. Залежність в'язкості моторного мастила від зазору в контактній парі для різних швидкостей зсуву: I – $\gamma' = 100 \text{ с}^{-1}$; II – $\gamma' = 130 \text{ с}^{-1}$; 1 – експериментальне визначення; 2, 3 – аналітичне визначення для неньютонівської та ньютонівської рідини відповідно; а) мастило Castrol TLX PLUS 404; б) мастило Castrol Vection 15W40

Слід зазначити, що за відсутності зсувних навантажень, а також із початковим рухом контактуючих поверхонь, в'язкість граничного мастильного шару на 10...12 % перевищує об'ємну в'язкість мастила. Цей ефект особливо важливий для пускових режимів роботи судових ДВЗ, особливо тих, що мають навішені мастильні насоси, які в початковий період роботи дизеля ще не здатні створити необхідний тиск мастила в трибосполученні. Для оцінки рівня стратифікації моторного мастила введемо поняття «реологічна стійкість» (діапазон реологічної стійкості), під яким будемо розуміти відхилення в'язкості ГЗШ від об'ємної в'язкості за відсутності зсувних напружень та із зсувним напруженням, що відповідає номінальному навантаженню.

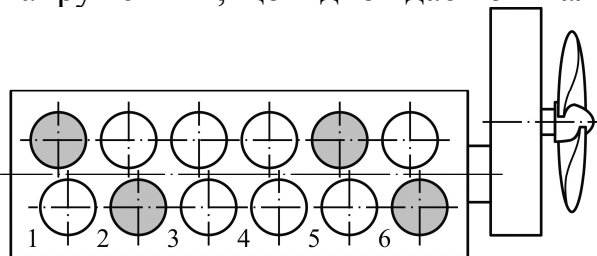


Рис. 3. Схема визначення зносу вкладишів підшипників судового дизеля 12V32/40 MAN-B&W

З метою визначення впливу реологічної стійкості мастила на ТС елементів трибологічних системи вал – мастильний матеріал – вкладиш, після закінчення регламентного терміну експлуатації підшипникових вузлів проводилася оцінка зносу їх несучих поверхонь. З цією метою визначався знос вкладишів підшипників за схемою, наведеною на рис. 3. Стан вкладишів

підшипників, на яких визначався знос, для дизеля, що експлуатується на моторному мастилі Castrol TLX PLUS 404, наведені на рис. 4; для дизеля, що експлуатується на моторному мастилі Shell Navigo Tereо 40/40 – на рис. 5. З огляду на нерівномірність навантаження на різні циліндри дизеля технічний стан підшипникових вузлів відрізняється один від одного. Це зокрема проявляється в неоднаковому зносі вкладишів підшипників. При цьому вкладиші підшипників циліндрів, розташованих ближче до споживача навантаження (гвинта або генератора), мають більший знос порівняно з вкладишами, більш віддаленими від гвинта. Під час експериментів знос вкладиша для «кормового» підшипника (для циліндра № 6) приймався за 100 %; знос інших вкладишів перераховувався щодо цього значення у відносних одиницях. Результати розрахунків наведені на рис. 6.



циліндр № 1



циліндр № 2



циліндр № 5



циліндр № 6

Рис. 4. Стан вкладишів підшипників дизеля 12V32/40 MAN-B&W,
що експлуатується на моторному мастилі Castrol TLX PLUS 404
(параметр порядку $S=0,43...0,45$; товщина ГЗШ $d_s=11,3...11,7$ мкм;
реологічна стійкість $v=8,7$ %)



циліндр № 1



циліндр № 2

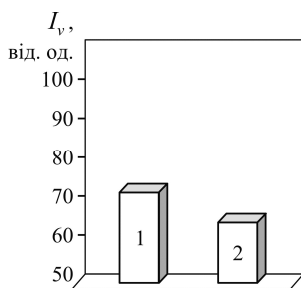


циліндр № 5

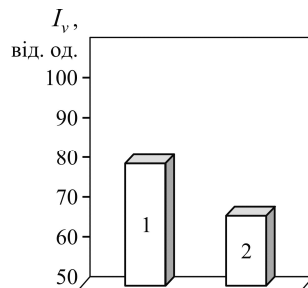


циліндр № 6

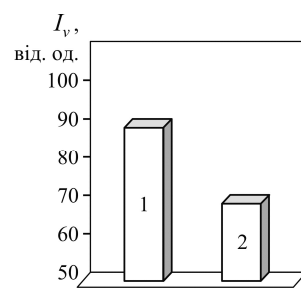
Рис. 5. Стан вкладишів підшипників дизеля 12V32/40 MAN-B&W,
що експлуатується на моторному мастилі Shell Navigo Tepeo 40/40
(параметр порядку $S=0,38...0,41$; товщина ГЗШ $d_s=9,8...10,4$ мкм;
реологічна стійкість $v=6,2$ %)



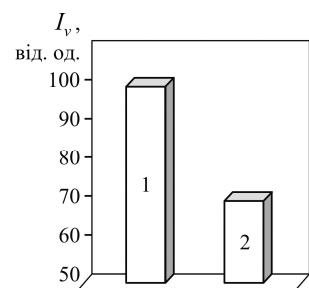
циліндр № 1



циліндр № 2



циліндр № 5



циліндр № 6

Рис. 6. Знос вкладишів підшипників суднового дизеля
12V32/40 MAN-B&W:

- 1 – експлуатація на моторному мастилі Shell Navigo Tepeo 40/40;
2 – експлуатація на моторному мастилі Castrol TLX PLUS 404

Аналогічні результати були отримані під час дослідження моторних мастил BP ENERGOL DS3-154 та MOBIL Mobilgard412, що використовуються в системі мащення суднового ДВЗ 9M43С фірми МаК. Технічний стан вкладишів під час використання моторних мастил з різними показниками ОВПС та реологічної стабільності наведено на рис. 7, 8.



Рис. 7. Стан вкладишів підшипників дизеля 9М43С фірми МаК, що експлуатується на моторному мастилі MOBIL Mobilgarg412 (параметр порядку ГЗШ $S=0,42...0,46$, товщина ГЗШ $d_s=12,3...12,5$ мкм, реологічна стійкість $v=9,3$ %)



Рис. 8. Стан вкладишів підшипників дизеля 9М43С фірми МаК, що експлуатується на моторному мастилі BP ENERGOL DS 3-154 (параметр порядку ГЗШ $S=0,36...0,39$, товщина ГЗШ $d_s=10,3...10,5$ мкм, реологічна стійкість $v=7,5$ %)

Дані з визначення зносу (у відносних одиницях) вкладишів підшипників суднового дизеля 9М43С фірми МаК під час його експлуатації на моторних мастилах з різними показниками орієнтованої наноструктури граничного шару і реологічної стійкості наведені на рис. 9.

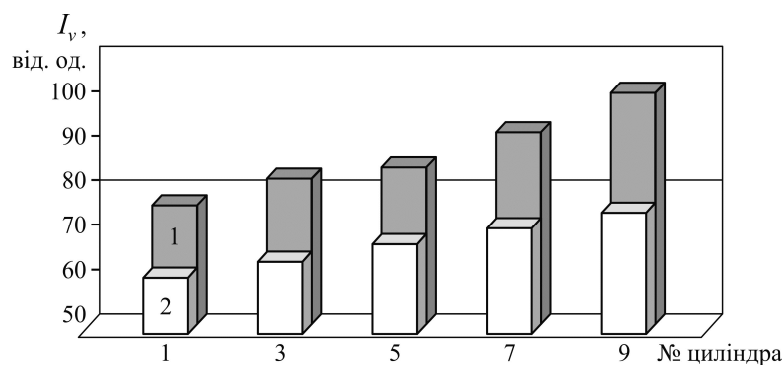


Рис. 9. Знос вкладишів підшипників суднового дизеля 9М43С фірми МаК:
1 – експлуатація на моторному мастилі BP ENERGOL DS 3-154;
2 – експлуатація на моторному мастилі MOBIL Mobilgarg412

Четвертий розділ «Управління процесом енергоперетворення під час зворотно-поступального руху кривошипно-шатунного механізму» присвячено розв'язанню другого головного завдання.

Процеси теплопередачі в змащувальному матеріалі мають найважливіше значення для сучасної техніки. Тому вони цікавили і продовжують привертати увагу великої кількості дослідників. З експериментального боку теплопередача вельми ретельно вивчена в найрізноманітніших, у тому числі і в досить складних, умовах. Однак розробка теоретичних уявлень і знаходження кількісних значень теплових потоків у потоці мастильного матеріалу поки що далекі від завершення.

КШМ суднових дизелів забезпечує передачу зворотно-поступального руху поршня, що переміщається у втулці циліндра, в обертальний рух колінчастого вала і пов'язаного з ним споживача енергії. Зворотно-поступальний рух поршня й отримання корисної роботи замкнутого термодинамічного циклу пов'язане з виникненням як механічних, так і теплових втрат в КШМ. Механічні втрати в ТС поршень (поршневі кільця) – мастильний матеріал – втулка циліндр виникають через мінімізації зазору в зазначеній парі тертя і можуть призвести до підвищеного зносу контактних поверхонь. Теплові втрати пов'язані з різноспрямованістю градієнтів температури і призводять до термічних навантажень як у контактній парі поршень (поршневі кільця) – втулка, так і в змащувальному матеріалі, який розділяє і забезпечує функціонування цих поверхонь.

Механічні і теплові незворотні втрати взаємопов'язані між собою. Зростання контактних, механічних навантажень збільшує теплову напруженість. Збільшення теплових втрат сприяє погіршенню мастильної здатності робочих рідин, що призводить до підвищення втрат енергії на тертя. Для зменшення незворотних втрат, що виникають під час зворотно-поступального руху КШМ, необхідно здійснювати управління тепловими потоками в змащувальному матеріалі, що забезпечує цей рух.

Визначення ефективності процесу енергоперетворення під час поступального руху (також, як і у випадку обертального руху) доцільно виконувати непрямыми методами. Для цього попередньо шляхом визначення спектрів поглинання оцінювався рівень вільної енергії ГЗШ.

Визначення спектрів поглинання за різних температур досліджуваних вуглеводневих рідин виконувалися для наступних моторних мастил:

- Shell Rimula R4X 15W40, Castrol Vection 15W40 (дані ММ використовувалися в системі змащування суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A);

- Shell Navigo Tepeo 40/40, Castrol TLX PLUS 404 (використовувалися в системі мащення суднового дизеля 12V32/40 MAN-B&W);

- Texaco Special HT 70, Castrol CL 70 (використовувалися в системі мащення суднового дизеля 12K98ME-C7 DOOSAN-MAN-B&W).

Результати вимірювань проілюстровані на рис. 10.

Аналогічно поняттю «реологічна стійкість», введеного в розділі 3, для спектральних характеристик ММ введемо визначення «спектральна щільність», під якою в даному випадку будемо розуміти відношення максимум спектрів поглинання за температур 20 і 80°C (рис. 10) – $K_E = I_{\max}^{20} / I_{\max}^{80}$. Значення даного параметра для досліджуваних ММ наведено в табл. 2.

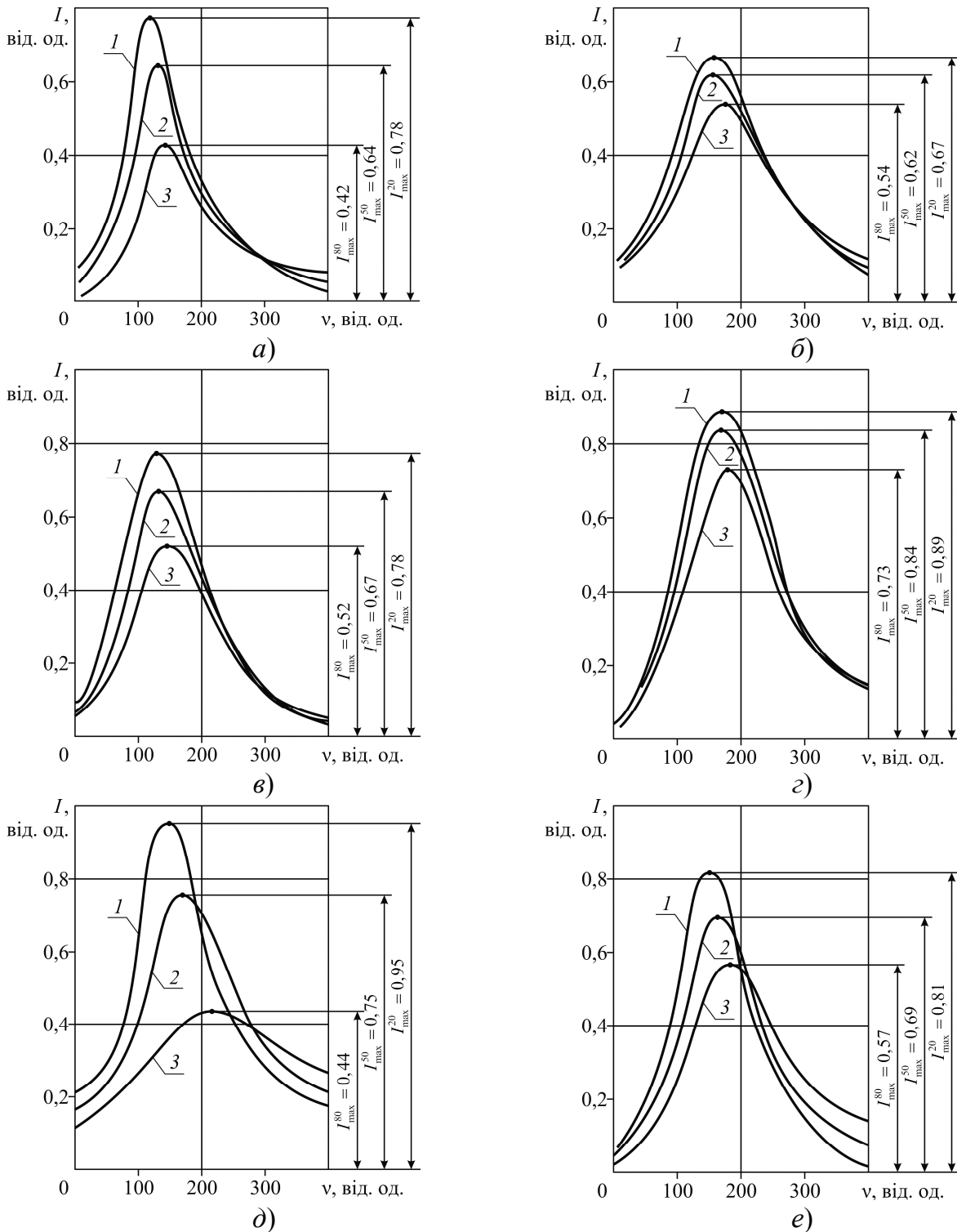


Рис. 10. Спектри поглинання суднових ММ за різних температур:

а) Shell Rimula R4X 15W40; б) Castrol Vection 15W40; в) Shell Navigo Tepeo 40/40;

г) Castrol TLX PLUS 404; д) Texaco Special HT 70; е) Castrol CL 70;

1 – 20°C; 2 – 50°C; 3 – 80°C

Необхідно відзначити, що чим менше спектральна щільність (тобто чим ближче один до одного знаходяться спектри поглинання за температур 20 і 80°C), тим менше вплив на структуру ГЗШ мастила фактора порушення впорядкованості, зумовленого тепловим рухом молекул. За допомогою спектральних досліджень також можливо визначити параметр порядку S молекул в ОВПШ, а також товщину ГЗШ d_s .

Характеристики моторних мастил

Марка моторного мастила	Характеристика				
	Спектральна щільність, $K_E = I_{\max}^{20} / I_{\max}^{80}$	Параметр порядку		Товщина ГЗШ, мкм	
		S^{20}	S^{80}	d_s^{20}	d_s^{80}
Shell Rimula R4X 15W40	1,85	0,58...0,59	0,46...0,47	14,7...15,0	10,4...10,8
Castrol Vection 15W40	1,24	0,63...0,64	0,55...0,56	17,1...17,5	14,8...15,1
Shell Navigo Tepeo 40/40	1,50	0,48...0,49	0,41...0,42	13,7...14,1	10,1...10,4
Castrol TLX PLUS 404	1,22	0,55...0,56	0,45...0,46	16,0...16,3	12,6...12,9
Texaco Special HT 70	2,16	0,46...0,47	0,38...0,39	12,5...12,7	9,6...9,9
Castrol CL 70	1,42	0,53...0,54	0,41...0,42	13,6...13,8	11,8...12,1

Для технічного стану циліндрової групи дизеля за аналізами мастила, взятого з підпоршневого простору, виконувалися дослідження на двох однотипних судових малообертових дизелях 12K98ME-C7 фірми MAN-B&W. Названі дизелі використовувалися як ГД на судах одного класу і призначення (sister-ship), що виконують морські перевезення контейнерних вантажів однією і тією ж транспортною лінією. На момент досліджень дизелі мали однаковий експлуатаційний період роботи, співмірні енергетичні показники і знаходилися в однаковому технічному стані. Мащення ЦПГ одного з дизелів забезпечувалося моторним мастилом Castrol CL 70, іншого – моторним мастилом Texaco Special HT 70. Обидва сорти мастил рекомендовані заводом-виробником як основні марки під час експлуатації дизелів. Результати досліджень узагальнені у вигляді рис. 11, що відображають значення основних характеристик відпрацьованого мастила.

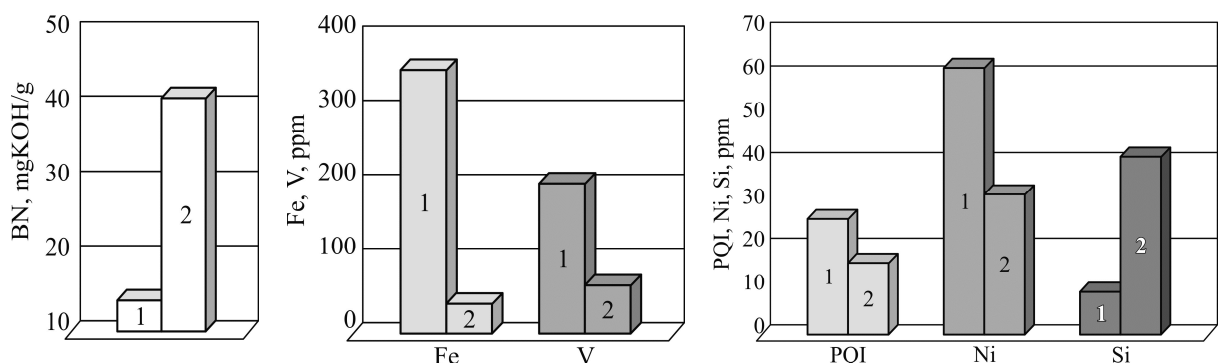


Рис. 11. Значення BN (base number), Fe (Iron), V (Vanadium), PQI (Particle Quantity Index), Ni (Nickel), Si (Silicon) у пробах мастила, взятого з підпоршневого простору судового дизеля 12K98ME-C7 фірми MAN-B&W: 1 – із використанням мастила Texaco Special HT 70; 2 – із використанням мастила Castrol CL 70

Кількість механічних домішок, що надходять від деталей ЦПГ у відпрацьоване мастило, є непрямою характеристикою мінімально неминучих незворотних втрат енергії під час експлуатації ДВЗ. Що більше механічних домішок знаходиться у відпрацьованому мастилі, то більше незворотні витрати енергії на забезпечення поступального руху деталей КШМ.

Паралельно з дослідженнями із визначення мінімально неминучих втрат енергії у ЦПГ дизелів залежно від сорту моторного мастила виконувалися лабораторні дослідження з визначення стратифікації в'язкості цих мастил у діапазоні зсувних навантажень, характерних для частоти обертання колінчастого валу дизеля, результати яких наведено на рис. 12.

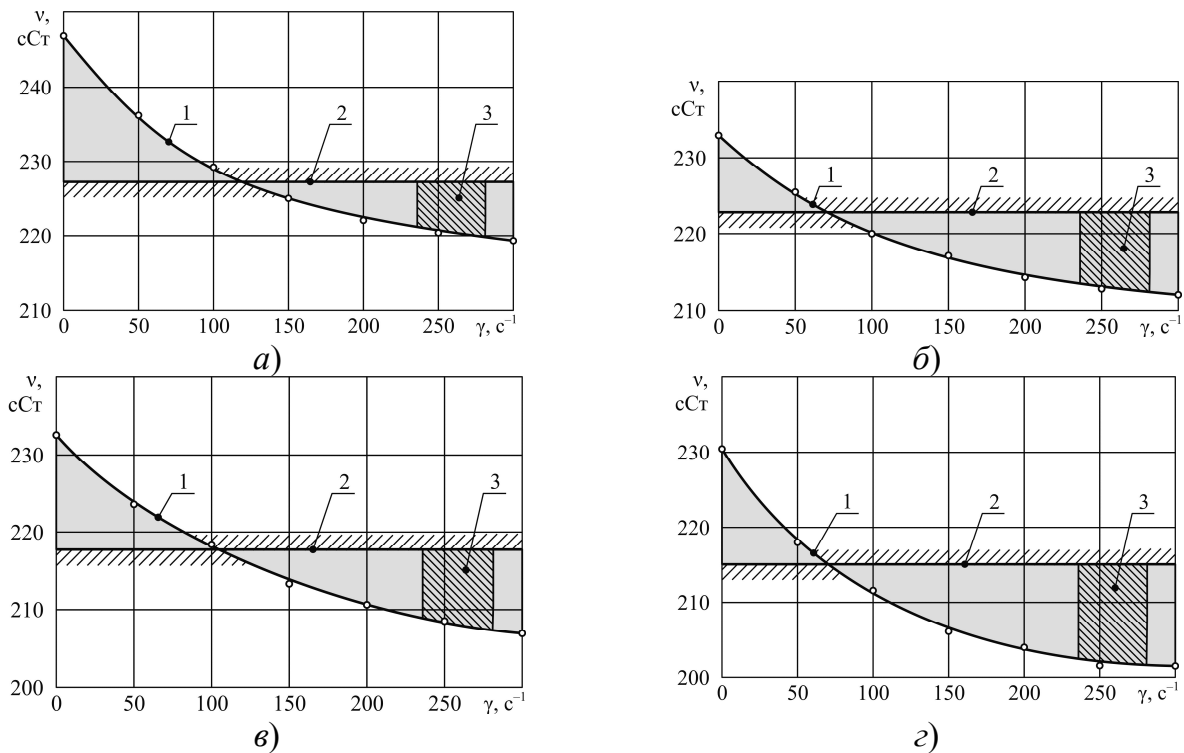


Рис. 12. Криві в'язкості мастила із товщиною мастильного шару 15 мкм:
1 – в'язкість у граничному шарі; 2 – об'ємна в'язкість; 3 – діапазон максимальних навантажень (максимальних зсувних навантажень);

а) моторне мастило Castrol CL 70; б) моторне мастило Texaco Special HT 70;

в) моторне мастило Mobilgard 570; г) моторне мастило Energol CLO 50M

Збільшення в'язкості в граничному шарі за відсутності зсувних навантажень пояснюється наявністю в ньому орієнтаційної впорядкованості молекул. Зниження в'язкості пов'язане з появою зсувних зусиль, що впливають на мастильний шар. Стратифікація в'язкості за шириною мастильного шару підтверджує існування орієнтованої наноструктури граничного шару у вузькому зазорі між поршневим кільцем і втулкою циліндра. У діапазоні швидкостей зсуву $\gamma=0\ldots270\ c^{-1}$ (що відповідають основним експлуатаційним режимам роботи суднових малообертових дизелів), стратифікація в'язкості різних моторних мастил $v_{гр}$ становить $(0,935\ldots1,093)$ значення об'ємної в'язкості $v_{об}$. Для моторних мастил, досліджуваних у роботі, стратифікація в'язкості моторного мастила наведена в табл. 3.

Діапазон стратифікації в'язкості суднових моторних мастил в граничному змащувальному шарі

Марка моторного мастила	Зміна в'язкості, %	
	збільшення за відсутності зсувних напружень ($\gamma=0 \text{ c}^{-1}$)	зменшення при максимальних зсувних напругах ($\gamma=270 \text{ c}^{-1}$)
Castrol CL 70	+9,3	-3,5
Texaco Special HT 70	+4,3	-4,9
Mobilgard 570	+6,1	-4,6
Energol CLO 50M	+6,1	-6,5

Зіставлення результатів, що надані на рис. 11, та наведені на рис. 12 та у табл. 3 свідчать про можливість зниження незворотних втрат енергії шляхом керованого впливу на мастильний матеріал. Цей вплив можна здійснювати до процесів мащення, що відбуваються в будь-якому ДВЗ (не лише у малообертовому, а також у середньо- та високообертовому), у тому числі для суднових дизелів 12V32/40 MAN-B&W і Volvo Penta TMDA 163A.

З метою визначення впливу реологічної стійкості моторних мастил на процес енергоперетворення під час поступального руху КШМ для названих дизелів виконувалось визначення зносу поршневих кілець за співмірні проміжки роботи, але із використанням різних моторних мастил. В обох випадках дослідження виконувалися на двох однотипних дизелях (двох Volvo Penta TMDA 163A і двох 12V32/40 MAN-B&W).

Вимірювання зносу проводилось для поршневих кілець двох крайніх циліндрів, які, як відомо, більше ніж інші (центральні циліндри) схильні до цього явища. Дослідження тільки двох циліндрів істотно скорочувало час монтажних робіт, який обмежувався умовами експлуатації. Технологію монтажних робіт під час визначення зносу поршневих кілець судового дизеля 12V32/40 MAN-B&W наведено на рис. 13.



Рис. 13. Технологія монтажних робіт під час визначення зносу поршневих кілець судового дизеля 12V32/40 MAN-B&W

Зміна стану верхнього поршневого кільця судового дизеля 12V32/40 MAN-B&W під час роботи на різних моторних мастилах показано на рис. 14, судового дизеля Volvo Penta TMDA 163A – на рис. 15.



а) б)

Рис. 14. Зміна стану верхнього поршневого кільця (замкова частина) дизеля 12V32/40 MAN-B&W:
а) експлуатація на MM Shell Navigo Tepeo 40/40; б) експлуатація на MM Castrol TLX PLUS 404



а) б) в)

Рис. 15. Зміна стану верхнього поршневого кільця дизеля Volvo Penta TMDA 163A:
а) експлуатація на MM Shell Rimula R4X 15W40; б) експлуатація на MM Castrol Vection 15W40; в) зіставлення замкової частини

Результати визначення зносу поршневих кілець наведено в табл. 4 і показано на рис. 16, 17.

Таблиця 4

Знос поршневих кілець суднових дизелів під час використання різних мастил

Марка моторного мастила	Номер циліндра			
	1	2	5	6
Volvo Penta TMDA 163A				
Shell Rimula R4X 15W40	10,7 гр (6,2%)	11,9 гр (6,9%)	13,4 (7,8%)	15,3 гр (8,9%)
Castrol Vection 15W40	6,2 гр (3,6%)	6,9 (4,0%)	8,7 (5,1%)	9,1 (5,3%)
12V32/40 MAN-B&W				
Shell Navigo Tepeo 40/40	101,9 гр (6,1%)	103,5 гр (6,2%)	136,9 гр (8,2%)	143,6 гр (8,6%)
Castrol TLX PLUS 404	68,5 гр (4,1%)	71,8 гр (4,3%)	93,5 гр (5,6%)	96,8 гр (5,8%)

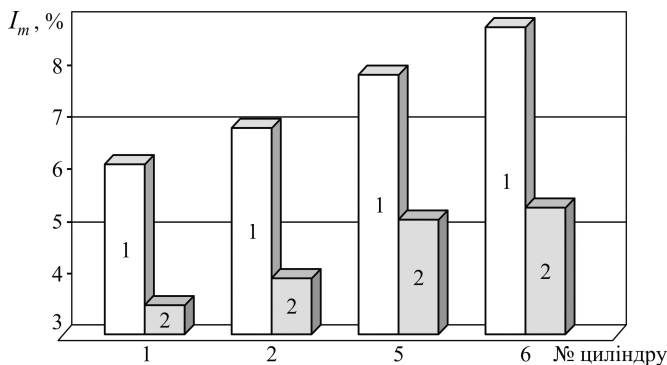


Рис. 16. Знос поршневих кілець суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A після 2850 годин роботи:
1 – MM Shell Rimula R4X 15W40;
2 – MM Castrol Vection 15W40

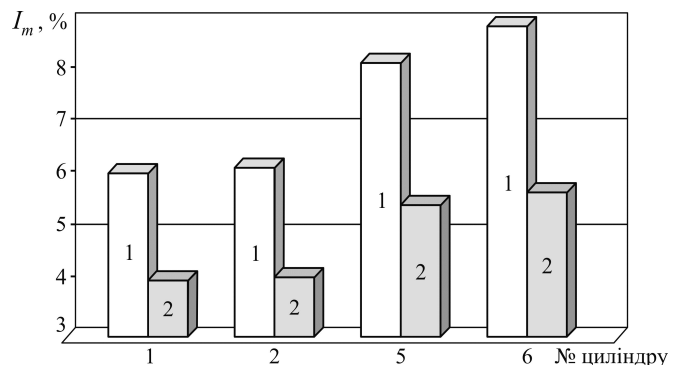


Рис. 17. Знос поршневих кілець суднового дизеля 12V32/40 MAN-B&W після 5480 годин роботи:
1 – MM Shell Navigo Tepeo 40/40;
2 – MM Castrol Castrol TLX PLUS 404

Для наочного уявлення взаємного впливу реологічних характеристик моторних мастил на рівень мінімально неминучих втрат у табл. 5 і на рис. 18 наведені узагальнені результати досліджень.

Таблиця 5

Узагальнені результати

Марка ММ	Реологічна стійкість, Δv , %	Рівень вільної енергії, K_E	Знос трибологічної системи
Судновий дизель Volvo Penta TMDA 163A			
Shell Rimula R4X 15W40	+11,93...-9,38	1,85	6,2...8,9 %
Castrol Vection 15W40	+15,18...-9,47	1,24	3,6...5,3 %
Судновий дизель 12V32/40 MAN-B&W			
Shell Navigo Tepeo 40/40	+7,19...-12,75	1,50	72...100 від.од.
Castrol TLX PLUS 404	+10,78...-8,05	1,22	64...72 від.од.
Судновий дизель 12K98ME-C7 MAN-B&W			
Texaco Special HT 70	+4,32...-4,91	2,16	357 мг/кг
Castrol CL 70	+8,48...-3,50	1,42	32 мг/кг

При цьому за критерій забезпечення змащувальної здатності приймалася реологічна стійкість Δv ; за критерій, що оцінює рівень вільної енергії моторного мастила – спектральна щільність K_E ; за критерій оцінки мінімально неминучих незворотних втрат енергії – знос (для суднового дизеля Volvo Penta TMDA 163A – поршневих кілець в %; для суднового дизеля 12V32/40 MAN-B&W – вкладишів підшипника у відносних одиницях; для суднового дизеля 12K98ME-C7 MAN-B&W – вміст металевих домішок у пробах мастила, взятого з підпоршневого простору, в гр.).

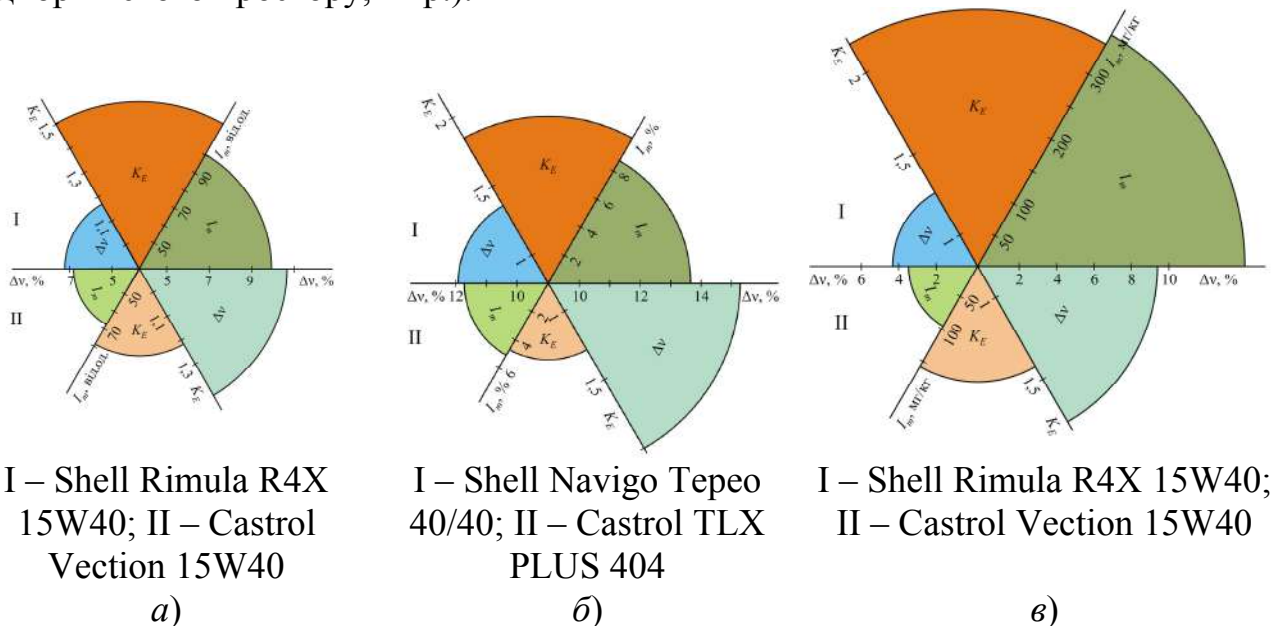


Рис. 18. Результати досліджень:

а) судновий дизель Volvo Penta TMDA 163A; б) судновий дизель 12V32/40 MAN-B&W; в) судновий дизель 12K98ME-C7 MAN-B&W

П'ятий розділ «Управління процесами енергоперетворення при високих динамічних навантаженнях» присвячено вирішенню третього головного завдання.

Управління процесами енергоперетворення з умовою забезпечення мінімально можливих незворотних втрат при високих динамічних навантаженнях неможливе без підтримки необхідних режимів мащення, оскільки при цьому зменшується кількість енергії, що втрачається на подолання зовнішнього тертя і компенсацію коливальних процесів. До елементів дизеля, в яких процес енергоперетворення відбувається при підвищених швидкісних і динамічних навантаженнях, передусім відноситься паливна апаратура високого тиску, а конкретно – прецизійні пари плунжер – втулка ПНВТ і голка – корпус розпилювача форсунки. Підвищене значення незворотних втрат енергії в цих трибосполученнях, викликане порушенням режиму мащення, може призвести не тільки до зменшення циклової подачі палива (через зменшення гідравлічної щільності), а й до повного її припинення (у зв'язку з заклинюванням плунжера і зупинкою його руху).

У якості гіпотези, що пояснює процес енергоперетворення в умовах підвищених швидкісних і динамічних навантажень, прийняте припущення, що мультимолекулярні шари палива, які утворюються поблизу поверхонь тертя паливної апаратури високого тиску (зокрема між плунжером і втулкою ПНВТ), сприяють додатковій пружності палива і забезпечують гідродинамічний або граничний (без контакту поверхонь тертя) режим мащення. Товщина цих шарів може бути визначена за допомогою оптичних методів дослідження. Цими методами визначалися товщина граничного шару і параметр порядку (орієнтаційної впорядкованості) деяких суднових моторних палив. Отримані результати наведені в табл. 6 та узагальнені на рис. 19. Разом із ними наведені результати триботехнічних характеристик, що визначають рівень мінімально неминучих незворотних втрат енергії під час використання різних палив.

Таблиця 6

Характеристики наноструктурованого граничного шару палива, що утворюється біля металевої поверхні

Марка палива	Товщина ГЗШ, d_s , мкм	Параметр порядку, S	Сила тертя в трибосполученні, $F_{тр}$, Н	Інтенсивність зносу, I_h , від.од.
RMK380	9,56±0,12	0,383±0,006	0,523	0,28
RMK420	8,78±0,14	0,362±0,007	0,551	0,43
RMK460	8,22±0,15	0,354±0,005	0,571	0,57
RMK500	7,85±0,12	0,340±0,004	0,594	0,81
RMK750	7,78±0,09	0,344±0,004	0,588	0,85

Зіставлення результатів оптичних і триботехнічних досліджень дозволяє зробити висновок про те, що збільшення товщини і ступеня орієнтаційної впорядкованості наноструктурованих граничних шарів палива сприяє зниженню енергетичних втрат при високих динамічних навантаженнях, що проявляється в зменшенні сили тертя і зниженні інтенсивності зношування контактних поверхонь.

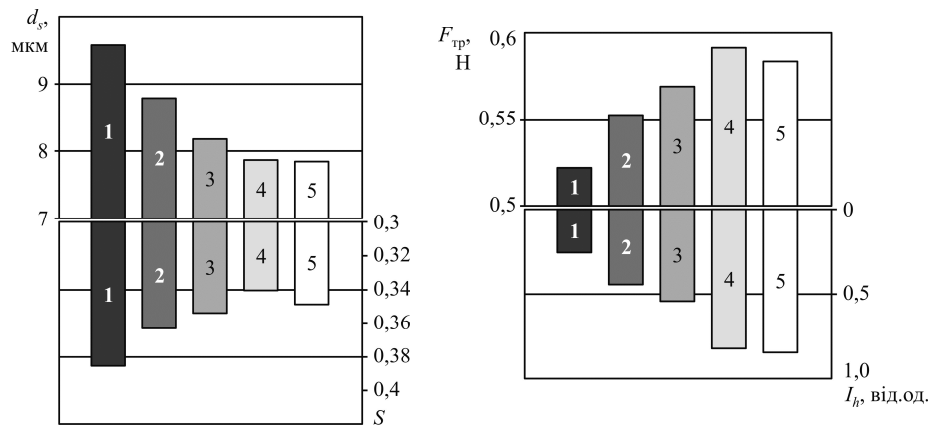


Рис. 19. Характеристики наноструктурованого граничного шару палива, що утворюється біля металевої поверхні, та його триботехнічні характеристики: 1 – RMK380; 2 – RMK420; 3 – RMK460; 4 – RMK500; 5 – RMK750

Шостий розділ «Забезпечення процесу енергоперетворення з мінімально неминучими незворотними втратами за рахунок створення та управління наноструктурованим шаром мастильного матеріалу» присвячено розв'язанню комплексного завдання. При цьому були розроблені технології, що забезпечують управління незворотними втратами за різних умов експлуатації СПК морських та річкових засобів транспорту.

За результатами досліджень було встановлено, що для управління мінімально неминучими втратами енергії під час обертового руху контактних вузлів суднових дизелів морських та річкових засобів транспорту (у ТС колінчастий вал – мастильний матеріал – вкладиш підшипника) доцільно підтримувати оптимальний термін поповнення системи мащення (який у свою чергу визначається динамікою зміни реологічних характеристик мастила), та додавати у об'єм системи мащення (безпосередньо перед ДВЗ) поверхнево-активної присадки (ПАП) з оптимальною концентрацією (яка визначається попередніми лабораторними оптичними та триботехнічними дослідженнями). Виконання цих умов сприяє мінімізації незворотних втрат, що підтверджується підвищенням механічного ККД ДВЗ (рис. 20, 21).

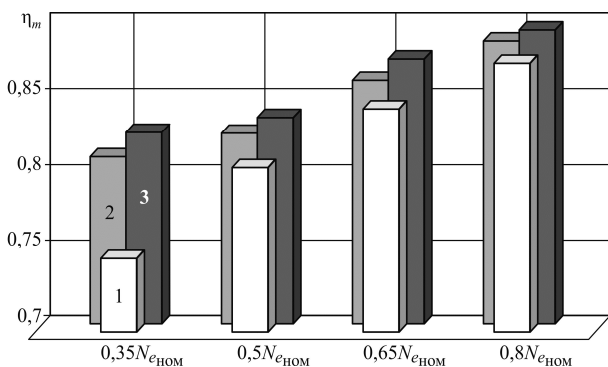


Рис. 20. Зміна механічного ККД дизеля 6EY22AW Yanmar за різної інтенсивності поповнення мастила: 1 – поповнення через 100 годин; 2 – поповнення 10 годин; 3 – поповнення через 10 годин роботи і додавання ПАП

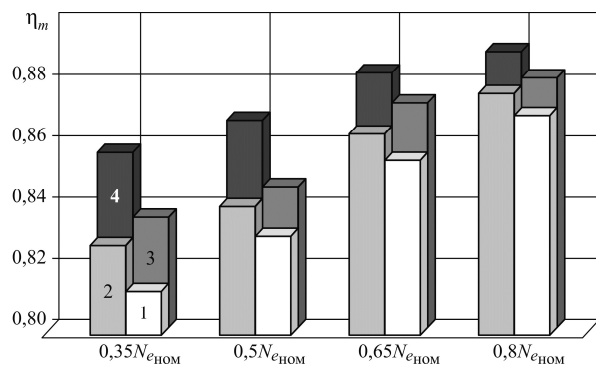


Рис. 21. Зміна механічного ККД дизеля 16V32/30 Wartsila для різної концентрації ПАП в базовому мастилі: 1 – робота без використання ПАП; 2 – концентрація ПАП 0,05 % за масою; 3 – концентрація 0,3 %; 4 – концентрація 0,1 %

Управління мінімально неминучими втратами під час поступального руху контактних вузлів судових дизелів морських та річкових засобів транспорту (у ТС поршневе кільце – мастильний матеріал – втулка циліндра) доцільно здійснювати шляхом додавання в циліндрову систему мащення ПАП з оптимальною концентрацією. При цьому зменшення незворотних втрат визначається зменшенням зносу контактуючих поверхонь (що підтверджується відповідним зменшенням вмісту металевих домішок у мастилі) та підвищенням рівня залишкового лужного числа мастила (рис. 22).

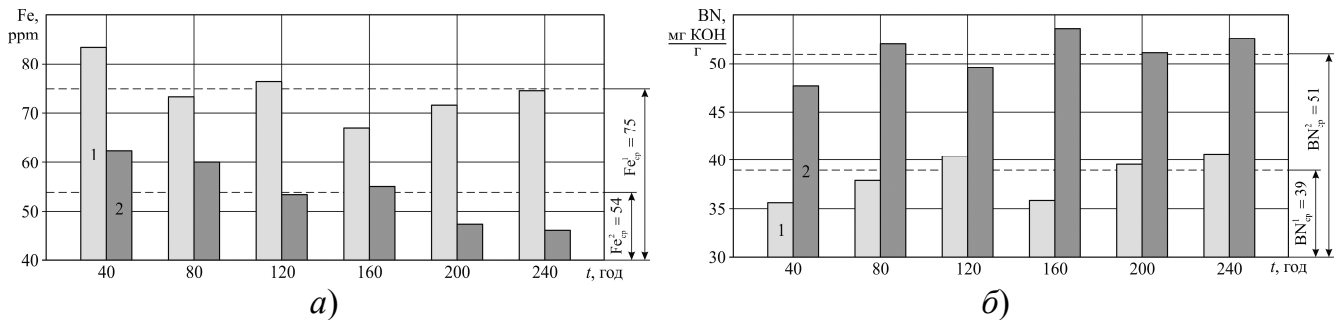


Рис. 22. Зміна вмісту металевих домішок (а) і залишкового лужного числа (б) у відпрацьованому мастилі за різних умов експлуатації дизеля 12K98ME-C7 MAN-B&W:

1 – робота на «чистому» мастилі; 2 – робота на мастилі з ПАП

Управління мінімально неминучими втратами енергії в умовах високих динамічних навантажень (у ТС плунжер – мастильний матеріал – втулка ПНВТ) досягається реалізацією в граничних шарах палива орієнтованої структури молекул за рахунок додаткового нанесення на контактуючі поверхні стійкого шару органічних покриттів. Це сприяє підвищенню ступеня орієнтаційної впорядкованості молекул та товщини ГЗШ (рис. 23) та забезпечує зниження зносу поверхонь плунжерів (рис. 24).

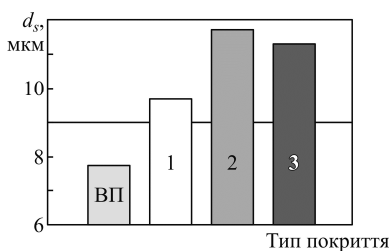


Рис. 23. Зміна товщини ГЗШ палива: ВП – відсутність покриття (безпосередня товщина граничного шару важкого палива); 1, 2, 3 – товщина ГЗШ під час використання органічних покриттів

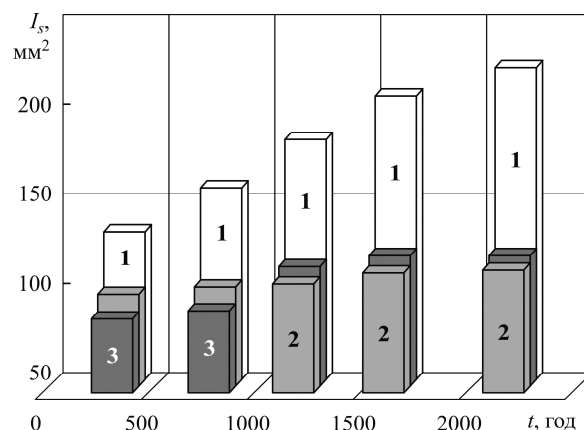


Рис. 24. Залежність зносу I_s плунжерів ПНВТ від часу роботи t судового дизеля 6L18 MAN-Diesel: 1 – без використання покриттів, 2, 3 – із використанням органічних покриттів

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладної проблеми – енергоресурсозбереження в пропульсивному комплексі транспортного судна, – яка на момент початку досліджень знаходилась у стадії визначення лише окремих локальних показників, які складають коефіцієнт корисної дії пропульсивного комплексу.

Результати дисертаційного дослідження підтверджують спроможність керованого впливу на трибологічні системи судових дизелів, що забезпечує мінімально неминучі втрати енергії в судовому пропульсивному комплексі.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є визначення методики, технології та способів управління мінімально неминучими незворотними втратами енергії у ДВЗ морських та річкових засобів транспорту безпосередньо в процесі експлуатації пропульсивних комплексів річкових та морських транспортних суден.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. З урахуванням анізотропних характеристик мастильного шару, який розділяє пари тертя в судових двигунах внутрішнього згорання річкових і морських транспортних засобів розроблена математична модель процесу енергоперетворення, яка охоплює ньютонівський (у випадку гідродинамічного процесу мащення) та неньютонівський стан моторного мастила. При цьому за основний критерій, за допомогою якого можливо здійснювати управління мінімально неминучими незворотними втратами енергії, обрана в'язкість моторного мастила

2. Утворення наноструктурованої граничної фази моторного мастила поблизу металевої поверхні (у трибологічних системах колінчастий вал – мастильний матеріал – вкладиш підшипника, поршневе кільце – мастильний матеріал – втулка циліндра, плунжер ПНВТ – мастильний матеріал – втулка ПНВТ судових ДВЗ річкових та морських засобів транспорту) зобов'язує розглядати процеси, що в ній відбуваються, з урахуванням теорії епітропних рідких кристалів. У зв'язку з двосторонньою дією на граничний мастильний шар Ван-дер-Ваальсових сил, теоретичний опис явищ, що відбуваються в наноструктурованих шарах вуглеводневих рідин, які поділяють металеві поверхні тертя, найбільш доцільно виконувати з урахуванням моделі Ландау-де-Жена, яка враховує не тільки товщину граничного мастильного шару, але й ступінь впорядкованості молекул анізотропної фази.

3. Механізм енергоперетворення на судах з мінімально неминучими незворотними втратами залежить від трибологічних процесів, що відбуваються в підшипникових вузлах на лінії трансформації енергії КШМ – колінчастий вал – споживач потужності. При цьому необхідно враховувати, як триботехнічні характеристики самих вузлів тертя, так і функціональні властивості мастила, що входить до трибологічної системи метал – мастильний матеріал – метал.

4. Мастило, що знаходиться у трибологічних системах колінчастий вал – мастильний матеріал – вкладиш підшипника, поршневе кільце – мастильний

матеріал – втулка циліндра суднових дизелів морських і річкових засобів транспорту є радіально-анізотропною рідиною, яка характеризується різними значеннями в'язкості за шириною мастильного шару. Тому аналітичне визначення параметрів процесу трансформації потенційної енергії палива і далі від поступального переміщення поршня до обертального руху валу необхідно розглядати з урахуванням анізотрії реологічних характеристик мастильного матеріалу, що розділяє контактні поверхні.

5. Анізотрія структури мастильного шару поблизу твердої металевої поверхні призводить до виникнення стратифікації його в'язкості, що на режимах пуску і реверсу забезпечує підвищення, а на динамічно сталих режимах – зниження несучої здатності мастильного шару. При цьому дисипація енергії в трибологічних системах суднових ДВЗ прямопропорційно залежить від стратифікації в'язкості моторного мастила.

6. Зміну в'язкості граничного мастильного шару за відсутності і накладення зсувних навантажень доцільно оцінювати за допомогою «реологічної стійкості», під якою мається на увазі відхилення в'язкості граничного мастильного шару від об'ємної в'язкості за відсутності зсувних напруг і із зсувною напругою, що відповідає номінальному навантаженню. Діапазон зміни реологічної стійкості для моторних мастил, які використовуються в системах циркуляційного та циліндрового мащення ДВЗ річкових та морських засобів транспорту, знаходиться в межах $(0,93 \dots 1,14)\nu$, де ν – в'язкість моторного мастила у великому об'ємі.

7. Динамічні і механічні навантаження, що виникають під час здійснення процесу енергоперетворення на судах з мінімально неминучими незворотними втратами, впливають на впорядкованість наноструктурованих граничних мастильних шарів, що призводять до їх деструкції та викликають зниження їх в'язкості і зменшення демпфуючих властивостей. Зі збільшенням швидкості переміщення поршня (а отже, і частоти обертання валу дизеля) у мастильному шарі виникають зсувні зусилля, що сприяють зменшенню його в'язкості. Цей факт необхідно враховувати під час вибору сорту мастила для мащення циліндропоршневої групи та підшипників ковзання суднових дизелів, а також – під час визначення бракувальних показників мастила, тому що і в тому, і в іншому випадку регламентується значення в'язкості для великого об'єму рідини, а експлуатація вказаних вузлів тертя відбувається при значеннях в'язкості, характерних для граничного шару.

8. За відсутності зсувних навантажень, а також із початковим рухом контактуючих поверхонь в'язкість граничного мастильного шару на 8...9 % перевищує об'ємну в'язкість мастила. Цей ефект особливо важливий для пускових режимів роботи суднових дизелів, коли швидкість переміщення поршня ще не дозволяє рівномірно розподілити мастильну плівку по поверхні циліндрової втулки і створити необхідний режим мащення. При цьому управління мінімально неминучими незворотними втратами енергії в підшипниках КШМ забезпечується реологічною стійкістю наноструктурованого граничного мастильного шару.

9. Зниження рівня мінімально неминучих незворотних втрат під час обертального та поступального руху доцільно оцінювати за величиною зносу вкладишів підшипників ковзання та поршневих кілець, при цьому управління мінімально неминучими незворотними втратами найбільш доцільно здійснювати за рахунок підвищення значення реологічної стійкості моторного мастила (що забезпечується шляхом підтримання раціонального терміну поповнення системи мащення та використанням ПАП з оптимальною концентрацією). Експериментально підтверджено, що збільшення реологічної стійкості на 11,93...15,18 % призводить до 1,48...1,72 кратного зниження зносу у вказаних трибологічних системах.

10. Комплекс проведених досліджень підтвердив наявність упорядкованих наноструктурованих шарів у тонких плівках судових палив, що утворюються на металевій поверхні пари тертя плунжер – втулка паливного насоса високого тиску. Товщина цих шарів лежить у межах 4...12 мкм і залежить від температури в зоні тертя, але шляхом використання спеціальних органічних покриттів поверхонь ці значення можливо підвищити у 1,5...2,3 рази, що сприяє пропорційному підвищенню пружно-демпфуючих властивостей граничних шарів палива та забезпечує 2,12...2,35 кратне зниження зносу поверхонь тертя, а тому є найбільш доцільним способом управління мінімально неминучими незворотними втратами енергії у випадку підвищених динамічних навантажень.

11. Наведені в дисертації теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені наукові результати мають суттєву практичну значимість. Впровадження розв'язань, технологій та способів, що розроблені у дисертаційному дослідженні на судових пропульсивних комплексах суден «Дунай», «Київська», «Куяльницька», «Ізмаїльська» ТОВ СМД ІНВЕСТ; на судах «Ocean Haven» та «Ocean Treasure» ТОВ «Каалбай Шиппінг Україна»; на судах, які знаходяться в операційному управлінні ТОВ «Незалежний морський сюрвей»; на судах «Pacific Mistral» та «Pacific Scirocco» іноземної компанії «Pacific Drilling» забезпечило 18...27 %-е зниження масового зносу вкладишів підшипників; 6,3...10,8 %-е зниження витрати мастила на випал; 1,3...2,5 %-е зниження питомої витрати палива; 3,9...14,7 %-е зниження потужності механічних втрат. За оцінкою фахівців вказаних судноплавних компаній, це сприяє зниженню фінансових витрат від 100 до 250 \$/добу під час експлуатації морських суден у територіальних водах України та від 200 до 600 \$/добу під час здійснення подібної експлуатації в територіальних водах країн Європейського Союзу та Світового океану.

Розроблені в дисертаційному дослідженні методики, технології та способи управління мінімально неминучими незворотними втратами енергії є прикладом застосування нанотехнологій в енергетиці.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України (що входять до переліку наукових фахових видань України, які рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук):

1. Сагин С. В. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения / С. В. Сагин, Ю. М. Поповский, М. Н. Гребенюк // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.
2. Поповский Ю. М. Противоизносные свойства граничных смазочных слоев / Ю. М. Поповский, С. В. Сагин, М. Н. Гребенюк // Судовые энергетические установки. – Одесса, 1998. – Вып. 2. – С. 37–42.
3. Сагин С. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизелей за счет управления структурой смазочного слоя / С. В. Сагин, И. И. Фрасинюк, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – Одесса, 1998. – Вып. 2. – С. 89–94.
4. Сагин С. В. Связь электрических и оптических методов оценки противоизносных характеристик граничных смазочных слоев / С. В. Сагин, Ю. М. Поповский, Д. Ф. Бордан // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 1999. – Вып. 4. – Одесса: ОГМА. – С.113-116.
5. Мацкевич Д. В. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя / Д. В. Мацкевич, С. В. Сагин, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса : ОНМА. – С.109-118; **база(и) Google Академія.**
6. Сагин С. В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей / С. В. Сагин, Д. В. Мацкевич // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.116-125; **база(и) Google Академія.**
7. Сагин С. В. Особенности подготовки масляной системы судовых дизелей, работающих на винт регулируемого шага, при выходе судна из сухого дока / С. В. Сагин, Д. В. Мацкевич // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 50-56; **база(и) Google Академія.**
8. Сагин С. В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 78-88; **база(и) Google Академія.**
9. Сагин С. В. Способы снижения эмиссии NO_x судовых дизелей, находящихся в эксплуатации / С. В. Сагин, Р. В. Перунов // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С.54-60; **база(и) Google Академія.**
10. Мацкевич Д. В. Диагностирование структурного состояния углеводородных жидкостей по их электрической прочности / Д. В. Мацкевич, С. В. Сагин // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 2. – Одесса: ОНМУ. – С. 38-46; **база(и) Google Академія.**

11. Мацкевич Д. В. Влияние медьсодержащих присадок на эксплуатационные свойства моторных масел / Д. В. Мацкевич, С. В. Сагин // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 18-26; **база(и)** Google Академія.
12. Сагин С. В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий, Р. В. Перунов // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 84-103; **база(и)** Google Академія.
13. Мацкевич Д. В. Диагностирование структурного состояния углеводородных жидкостей по их электрической прочности / Д. В. Мацкевич, С. В. Сагин // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 2. – Одеса: ОНМУ. – С. 38-46; **база(и)** Google Академія.
14. Сагин С. В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одеса: ОНМУ. – С. 68-81; **база(и)** Google Академія.
15. Сагин С. В. Использование топливных присадок в судовых дизелях / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2012. – № 30. – Одесса: ОНМА. – С.180-186; **база(и)** Google Академія.
16. Сагин С. В. Влияние триботехнических свойств топлив на эксплуатационные характеристики судового малооборотного дизеля / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 1. – Одеса: ОНМУ. – С. 72-83; **база(и)** Google Академія.
17. Сагин С. В. Снижение энергетических затрат при механической обработке деталей движения двигателей внутреннего сгорания / С. В. Сагин, А. А. Аблаев, М. Н. Гребенюк // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 4. – Одеса: ОНМУ. – С. 75-87; **база(и)** Google Академія.
18. Сагин С. В. Влияние жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев на реологические характеристики моторных масел / С. В. Сагин // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 64-71; **база(и)** Google Академія.
19. Сагин С. В. Триботехнические процессы, протекающие в топливной аппаратуре высокого давления судовых дизелей / С. В. Сагин // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 2. – Одеса: ОНМУ. – С. 33-42; **база(и)** Google Академія.
20. Сагин С. В. Теоретический анализ процессов трения, протекающих в подшипниковых узлах судовых дизелей / С. В. Сагин // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2014. – № 2. – Одеса: ОНМУ. – С. 49-56; **база(и)** Google Академія.
21. Сагин С. В. Исследование корреляционной взаимосвязи жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел судовых дизелей / С. В. Сагин // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2014. – № 33. – Одесса: ОНМА. – С. 67-76; **база(и)** Google Академія.
22. Заблоцкий Ю. В. Исследование эксплуатационных характеристик судовых среднеоборотных дизелей при их работе на различных топливах /

Ю. В. Заблоцкий, С. В. Сагин // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2014. – № 34. – Одесса: ОНМА. – С. 80-86; **база(и)** Google Академія.

23. Поповский А. Ю. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей / А. Ю. Поповский, С. В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83; **база(и)** Google Академія.

24. Сагин С. В. Оценка вязкости масла при обеспечении режимов смазывания цилиндровой группы судовых дизелей / С. В. Сагин, А. В. Семенов // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2015. – № 36. – Одесса: НУ ОМА. – С. 104-114; **база(и)** Google Академія.

25. Поповский А. Ю. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств / А. Ю. Поповский, С. В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74; **база(и)** Google Академія.

26. Куропятник А. А. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей / А. А. Куропятник, С. В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72-80; **база(и)** *Index Copernicus*, Google Академія.

27. Сагін С. В. Зниження енергетичних витрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С. В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 139-149; **база(и)** Google Академія.

28. Сагин С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий / С. В. Сагин // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120; **база(и)** Google Академія.

Статті в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних:

29. Popovskii Yu. M. Influence of anisotropic fluids on the operation of frictional components / Yu. M. Popovskii, S. V. Sagin, S. A. Khanmamedov, M. N. Grebenyuk, V. V. Teregerya // Russian Engineering Research, 1996. – № 6. – P. 7-11; **база(и)** *Scopus*.

30. Sagin S. V. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // Modern Applied Science; Published by Canadian Center of Science and Education, Vol. 9, № 5. – 2015. – P. 269-278. DOI:10.5539/mas.v9n5p269; **база(и)** *CABI, Chemical Abstracts Database, DOAJ, EBSCOhost, ERA, Google Scholar, LOCKSS, Open J-Gate, Polish Scholarly Bibliography (PBN), ProQuest, Scopus, SHERPA/RoMEO, Standard Periodical Directory, Ulrich's, Universe Digital Library*.

31. Zablotsky Yu. V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu. V. Zablotsky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology, Published by Indian Society of Education and Environment, May 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490; **база(и)** *Chemical Abstracts Services (CAS), Scopus, J-Gate Plus, Research Bible, EBSCO Publishing's Electronic*

Databases, DOAJ, Ulrich's Periodical Directory, Indian Science Abstracts, Index Copernicus, Thomson Reuters (Web of Science), Indian Science.in.

32. Sagin S. V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors / S. V. Sagin, O. V. Semenov // *American Journal of Applied Sciences*, Published by Science Publication, 2016. – Vol.13. – Iss. 2. – P. 200-208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208; **база(и)** *Aerospace Database, Chemical Abstracts Service, Civil Engineering Abstracts, DOAJ, EBSCO, Genamics Journal Seek, IET – The Institution of Engineering and Technology, INSPEC, J-Gate, Metadex, ProQuest, Scopus, Thomson Gale, Ulrichsweb.*

33. Sagin S. V. Marine Slow-Speed Diesel Engine Diagnosis with View to Cylinder Oil Specification / S. V. Sagin, O. V. Semenov // *American Journal of Applied Sciences*, Published by Science Publication, 2016. – Vol.13. – Iss. 5. – P. 618-627. DOI: 10.3844/ajassp.2016.618.627; **база(и)** *Aerospace Database, Chemical Abstracts Service, Civil Engineering Abstracts, DOAJ, EBSCO, Genamics Journal Seek, IET – The Institution of Engineering and Technology, INSPEC, J-Gate, Metadex, ProQuest, Scopus, Thomson Gale, Ulrichsweb.*

34. Zablotsky Yu. V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives / Yu. V. Zablotsky, S. V. Sagin // *Indian Journal of Science and Technology*, Published by Indian Society of Education and Environment. – December 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516; **база(и)** *Chemical Abstracts Services (CAS), Scopus, J-Gate Plus, Research Bible, EBSCO Publishing's Electronic Databases, DOAJ, Ulrich's Periodical Directory, Indian Science Abstracts, Index Copernicus, Thomson Reuters (Web of Science), Indian Science.in.*

35. Sagin S. V. Estimation of Operational Properties of Lubricant Coolant Liquids by Optical Methods / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – Vol. 12. – Num. 19. – P. 8380-8391. Research India Publication; **база(и)** *Scopus, EBSCOhost, Google Scholar, Journal Seek, J-Gate, ICI, Index Copernicus, UGC Approved Journal.*

36. Sagin S. V. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines / S. V. Sagin, O. A. Kuropyatnyk // *Nase More (Our Sea) : International Journal of Maritime Science & Technology*. – June 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3; **база(и)** *WoS, Scopus, Elsevier, Embase, Compendexs, Geobase, Embiology, Biobase, Fluidex, World Textiles, Penrose – Press, Hrcak, DOAL, EBSCO, Publishing, Proquest, Index Copernicus, Cabell's directory, Trid.*

37. Kuropyatnyk O. A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines / O. A. Kuropyatnyk, S. V. Sagin // *Nase More (Our Sea) : International Journal of Maritime Science & Technology*. – June 2018. – Vol. 66. – № 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1; **база(и)** *WoS, Scopus, Elsevier, Embase, Compendexs, Geobase, Embiology, Biobase, Fluidex, World Textiles, Penrose – Press, Hrcak, DOAL, EBSCO, Publishing, Proquest, Index Copernicus, Cabell's directory, Trid.*

Статті в інших іноземних виданнях:

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

39. Сагин С. В. Исследование взаимосвязи жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел / С. В. Сагин // Технические науки – от теории к практике. Сб. ст. по материалам XXXVIII междунар. науч.-практ. конф. № 9 (34). – Новосибирск : «СибАК», 2014. – С.46-54; **база(и)** РИНЦ.

40. Сагин С. В. Оптимизация процессов смазывания подшипниковых узлов судовых среднеоборотных дизелей при их работе на пусковых режимах / С. В. Сагин // Сб. научных трудов. IV межд. научн.-практ. конф. «Техника и технологии: роль в развитии современного общества», 27 января 2015 г., г. Краснодар. – Краснодар : науч.-изд. центр Априори, 2015. – С. 116-120.

41. Солодовников В. Г. Совершенствование системы топливоподготовки судовых среднеоборотных дизелей / В. Г. Солодовников, С. В. Сагин // Сб. научных трудов. XV Межд. научн.-практ. конф. «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», г. Москва, 27-28 марта 2015 г. – М. : Prospero, № 3 (15), 2015. – С. 55-58.

42. Сагин С. В. Оптимизация расхода высокощелочного цилиндрического масла судовых малооборотных дизелей / С. В. Сагин // *Universum: Технические науки : электрон. научн. журн.* – 2016. – № 7 (28) . URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3385> (дата обращения: 02.08.2016); **база(и)** *Google Scholar, BASE, OpenAIRE, EBSCO, Ulrichsweb*.

43. Sagin S. V. Determining the thickness of the boundary layer lubrication of marine motor oils by optical methods / S. V. Sagin, O. V. Semenov // *Science and Education : material of the XIII international research and practice conference, Munich, November 2nd – 3rd, 2016.* – Munich, Germany 2016. – P. 82-89.

44. Sagin S. V. The investigations of the influence of ultrasonic fuel processing on sulfur wear of details in cylinder group of marine diesel engines / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // *European Science and Technology : material of the XVI international research and practice conference, Munich, March 14th – 15th, 2017.* – Munich, Germany 2017. – P. 61-74.

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

46. Сагин С. В. Контроль реологических характеристик судовых моторных масел в процессе эксплуатации среднеоборотных дизелей / С. В. Сагин // *Austria-science.* – 2017. – № 7.– С. 29-33.

47. Sagin S. V. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels / S. V. Sagin, A. A. Kuropyatnik // *American Scientific Journal*, 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.

48. Сагин С. В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей / С. В. Сагин // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71; **база(и)** *Google Scholar, BASE, OpenAIRE, EBSCO, Ulrichsweb*.

49. Sagin S. V. Improving the performance parameters of systems fluids / S. V. Sagin // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59; **база(и)** *Google Scholar, EBSCO, BASE, Ulrichsweb, Crossref, GIF*.

50. Сагин С. В. Ультразвуковая десульфуризация топлив для судовых дизелей / С. В. Сагин // *Единый всероссийский научный вестник*, 2016. – № 7. – С. 87-92.

Статті у збірниках за матеріалами конференцій:

51. Мацкевич Д. В. Повышение надежности экстренного пуска среднеоборотного двигателя / Д. В. Мацкевич, Ю. В. Заблоцкий, С. В. Сагин // *Матеріали V-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» 10.11.2011-11.11.2011*. – Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова. – С. 156-157.

52. Сагин С. В. Реологические характеристики смазочных материалов судовых дизелей/ С. В. Сагин, Д. В. Мацкевич // *Матеріали наук.-техн. конфер. «Енергетика суден. Експлуатація та ремонт», 05.04.2011-07.04.2011*. – Одеса: ОНМА. – С. 31-33.

53. Мацкевич Д. В. Повышение надежности экстренного пуска среднеоборотного двигателя / Д. В. Мацкевич, Ю. В. Заблоцкий, С. В. Сагин // *Матеріали V-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 10-11 листопада 2011*. – Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова. – С. 156-157.

54. Заблоцкий Ю. В. Повышение надежности работы среднеоборотных дизелей на режимах экстренного пуска / Ю. В. Заблоцкий, Д. В. Мацкевич, С. В. Сагин // *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»*. – Херсон : ХДМА, 2011. – С. 62-63.

55. Сагин С. В. Интенсификация процесса смазывания деталей движения судовых среднеоборотных дизелей / С. В. Сагин // *Матеріали наук.-техн. конфер. «Суднові енергетичні установки. Експлуатація та ремонт», 21.03.2012 – 23.03.2012*. – Одеса: ОНМА. – С. 60-61.

56. Сагин С. В. Использование присадок для судовых топлив / С. В. Сагин // *Матеріали наук.-техн. конфер. «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», 20.03.2013- 22.03.2013*. – Одеса : ОНМА. – С. 70-72.

57. Маковецкий В. В. Восстановление работы распределительного вала дизеля / В. В. Маковецкий, С. В. Сагин // *Матеріали наук.-техн. конфер. «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», 20.03.2013- 22.03.2013*. – Одеса: ОНМА. – С. 173-174.

58. Сагин С. В. Определение электрической прочности тонких пленок моторных масел / С. В. Сагин // *Зб. ст. VI Міжнародної науково-практичної*

конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2014» (27-29 травня 2014 р., м. Херсон). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 304-306.

59. Заблоцкий Ю. В. Снижение механических нагрузок в прецизионных парах топливной аппаратуры судовых дизелей / Ю. В. Заблоцкий, С. В. Сагин // Сб.матер. III Міжнар. наук.-техніч. конфер. Сучасний стан та проблеми двигунобудування, 19-21 листопада 2014 р. – Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова, 2014. – С.282-284.

60. Сагин С. В. Аналитическое описание триботехнических процессов в парах трения судовых дизелей / С. В. Сагин // Збірка матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2015» (26-28 травня 2015 р., м. Херсон). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2015. – С. 225-227.

61. Сагин С. В. Использование химической обработки топлива для улучшения показателей работы судового дизеля / С. В. Сагин // Матер. наук.-техн. конференції «Річковий та морський флот : експлуатація і ремонт», 23.03.2017 – 24.03.2017. Частина 1. – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 74-77.

62. Сагин С. В. Мониторинг эксплуатационных показателей цилиндрического масла судовых малооборотных дизелей / С. В. Сагин // Суднова енергетика: стан та проблеми : Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, 2017. – С. 82-85.

63. Сагин С. В. Исследование трибологической системы поршневое кольцо – втулка цилиндра судовых дизелей / С. В. Сагин // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції MINTT-2018, 29-31 травня 2018 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2018. – С. 352-355.

64. Сагин С.В. Обеспечение оптимального расхода цилиндрического масла судовых малооборотных дизелей // Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2018. – С. 42-45.

65. Сагин С. В. Снижение уровня минимально неизбежных потерь в судовых энергетических установках / С. В. Сагин // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 21.03.2019–22.03.2019. – Одеса : НУ «ОМА», 2019. – С. 36-40.

66. Сагин С. В. Модифицирование прецизионных поверхностей топливной аппаратуры высокого давления / С. В. Сагин // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 вересня 2019 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2019. – С. 128-130.

67. Sagin S. V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines / S. V. Sagin // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI/ 10.34660/INF.2019.15.36258.

АНОТАЦІЯ

Сагін С. В. Теорія і практика енергоперетворення на суднах з мінімально неминучими незворотними втратами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2019.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладної проблеми – енергоресурсозбереження в пропульсивному комплексі транспортного судна

Розроблені технології, що забезпечують управління незворотними втратами за різних умов експлуатації СПК морських та річкових суден.

Управління мінімально неминучими втратами енергії під час обертального руху контактних вузлів судових дизелів (зокрема для трибологічної системи колінчастий вал – мастильний матеріал – вкладиш підшипника) забезпечено підтриманням оптимального терміну поповнення системи мащення (який у свою чергу визначається динамікою зміни реологічних характеристик мастила) та додаванням до об'єму системи мащення (безпосередньо перед двигуном) поверхнево-активної присадки з оптимальною концентрацією (яка визначається попередніми лабораторними оптичними та триботехнічними дослідженнями).

Управління мінімально неминучими втратами енергії під час поступального руху контактних вузлів судових дизелів морських та річкових засобів транспорту (у трибологічній системі поршневе кільце – мастильний матеріал – втулка циліндра) здійснено шляхом додавання в циліндрову систему мащення поверхнево-активної присадки з оптимальною концентрацією.

Управління мінімально неминучими втратами енергії в умовах високих динамічних навантажень (у трибологічній системі плунжер – мастильний матеріал – втулка паливного насоса високого тиску) досягнуто реалізацією в граничних шарах палива орієнтованої структури молекул за рахунок додаткового нанесення на контактуючі поверхні стійкого шару органічних покриттів.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження на морських та річкових суднах свідчить про 1,48...2,35-кратне зниження зносу у вказаних трибологічних системах; 6,3...10,8 %-е зниження витрати мастила на випал; 1,3...2,5 %-е зниження питомої витрати палива; 3,9...14,7 %-е зниження потужності механічних втрат, що сприяє зниженню фінансових витрат від 100 до 250 \$/добу під час експлуатації морських суден у територіальних водах України та від 200 до 600 \$/добу під час здійснення подібної експлуатації в територіальних водах країн Європейського Союзу та Світового океану.

Ключові слова: судовий пропульсивний комплекс, механічні втрати, судовий дизель, граничний змащувальний шар, управління енергетичними втратами, механічний коефіцієнт корисної дії.

АННОТАЦИЯ

Сагин С. В. Теория и практика энергопреобразования на судах с минимально неизбежными необратимыми потерями. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – Эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Национальный университет «Одесская морская академия» Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2019.

Диссертационное исследование направлено на решение научно-прикладной проблемы – энергоресурсосбережения в пропульсивном комплексе транспортного судна.

Разработаны технологии, обеспечивающие управление необратимыми потерями при различных условиях эксплуатации СПК морских и речных судов.

Управление минимально неизбежными потерями энергии при вращательном движении контактных узлов судовых дизелей (в частности для трибологической системы коленчатый вал – смазочный материал – вкладыш подшипника) обеспечено поддержанием оптимального срока пополнения системы смазки (который, в свою очередь, определяется динамикой изменения реологических характеристик масла) и добавлением в объем системы смазки (непосредственно перед двигателем) поверхностно-активной присадки с оптимальной концентрацией (которая определяется предварительными лабораторными оптическими и триботехническими исследованиями).

Экспериментально подтверждено (путем измерений на ротационном вискозиметре) явление анизотропии вязкости граничного смазочного слоя, образованного у металлической поверхности, что на режимах пуска и реверса обеспечивает повышение, а на динамично установившихся режимах – снижение его несущей способности.

Изменение вязкости граничного смазочного слоя при отсутствии и наложении сдвиговых нагрузок оценено с помощью «реологической стойкости», под которой подразумевается отклонение вязкости граничного смазочного слоя от объемной вязкости при отсутствии сдвиговых напряжений и со сдвиговым напряжением, соответствует номинальной нагрузке. Диапазон изменения реологических устойчивости для моторных масел, используемых в системах циркуляционного и цилиндрического смазывания ДВС речных и морских средств транспорта, находится в пределах $(0,93...1,14)\nu$, где ν – объемная вязкость моторного масла.

Управление минимально неизбежными потерями при поступательном движении контактных узлов судовых дизелей морских и речных транспортных средств (в трибологической системе поршневое кольцо – смазочный материал – втулка цилиндра) осуществлено путем добавления в цилиндрическую систему смазки поверхностно-активной присадки с оптимальной концентрацией.

Установлено, что при отсутствии сдвиговых нагрузок вязкость граничного смазочного слоя на 8...9 % превышает объемную вязкость масла. Этот эффект особенно важен для пусковых режимов работы судовых дизелей, когда скорость перемещения поршня еще не позволяет равномерно распределить масляную пленку по поверхности цилиндрической втулки и создать необходимый режим смазывания.

Снижение уровня минимально неизбежных необратимых потерь при вращательном и поступательном движении оценено по величине износа вкладышей подшипников скольжения и поршневых колец, при этом управление минимально неизбежными необратимыми потерями осуществлено за счет повышения реологической устойчивости моторного масла (что обеспечено путем поддержания рационального срока пополнения системы смазки и использования поверхностно-активных присадок с оптимальной концентрацией). Экспериментально подтверждено, что увеличение реологической устойчивости на 11,93...15,18% приводит к 1,48...1,72-кратному снижению износа в указанных трибологических системах.

Управление минимально неизбежными потерями энергии в условиях высоких динамических нагрузок (в трибологической системе плунжер – смазочные материалы – втулка топливного насоса высокого давления) достигнуто реализацией в граничных слоях топлива ориентированной структуры молекул за счет дополнительного нанесения на контактирующие поверхности устойчивого слоя органических покрытий.

Комплекс проведенных исследований подтвердил наличие упорядоченных наноструктурированных слоев в тонких пленках судовых топлив, образующихся на металлической поверхности пары трения плунжер – втулка топливного насоса высокого давления. Толщина этих слоев лежит в пределах 4...12 мкм и зависит от температуры в зоне трения. Экспериментально подтверждена возможность 1,5...2,3-кратного повышения этих значений путем использования специальных органических покрытий поверхностей, что способствует пропорциональному повышению упругодемпфирующих свойств граничных слоев топлива и обеспечивает 2,12...2,35-кратное снижение износа поверхностей трения.

Внедрение результатов диссертационного исследования на морских и речных судах свидетельствует о 1,48...2,35-кратном снижении износа в указанных трибологических системах; 6,3...10,8 %-ом снижении расхода масла на угар; 1,3...2,5 %-ом снижении удельного расхода топлива; 3,9...14,7 %-ом снижении мощности механических потерь, что способствует снижению финансовых затрат от 100 до 250 \$/сутки при эксплуатации морских судов в территориальных водах Украины и от 200 до 600 \$/сутки при осуществлении подобной эксплуатации в территориальных водах стран Европейского Союза и Мирового океана.

Ключевые слова: судовой пропульсивный комплекс, механические потери, судовой дизель, граничный смазочный слой, управление энергетическими потерями, механический коэффициент полезного действия.

THE SUMMARY

Sagin S. V. Theory and practice of energy conversion on ships with minimal inevitable irreversible losses. – Qualifying scientific work as manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences in specialty 05.22.20 – operation and repair of transport vessels. – National University “Odessa Maritime Academy” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2019.

The dissertation research is aimed at solving an applied scientific problem – energy conservation in propulsion systems of a transport vessel.

Technologies have been developed that provide control over irreversible losses under various operating conditions of the ship propulsion unit of sea and river vessels.

The control of minimally unavoidable energy losses during the rotational movement of the contact nodes of marine diesel engines (in particular for the tribological system ‘the crankshaft – lubricant – bearing shell’) is ensured by maintaining the optimal term of replenishment of the lubrication system (which, in turn, is determined by the dynamics of changes in the rheological characteristics of the oil) and adding into the volume of the lubrication system (directly in front of the engine) of an optimum concentration surfactant (which is determined by preliminarily laboratory optical and tribological researches).

The minimally unavoidable losses during the forward motion of the contact nodes of marine diesel engines on sea and river vessels (in the tribological system ‘the piston ring – lubricant – cylinder liner’) are controlled by adding an optimum concentration surfactant to the cylinder lubrication system.

The control of minimally unavoidable energy losses under high dynamic loads (in the tribological system ‘the plunger – lubricants – high pressure fuel pump liner’) is achieved by implementing an oriented molecular structure in the fuel boundary layers due to the additional application of a stable layer of organic coatings on the contact surfaces.

The implementation of the results of the dissertation research on sea and river vessels indicates 1.48...2.35-fold wear reduction in the above mentioned tribological systems; 6.3...10.8 % reduction in burning oil consumption; 1.3...2.5 % reduction in specific fuel consumption; 3.9...14.7 % reduction in the power of mechanical losses, which helps to reduce financial costs from 100 to 250 \$/day for the operation of sea vessels in the territorial waters of Ukraine and from 200 to 600 \$/day for such operations in territorial waters of the countries of the European Union and the World Ocean.

Key words: ship propulsion unit, mechanical losses, marine diesel, boundary lubricating layer, control over energy losses, mechanical efficiency.

Підп. до друку 18.11.2019. Формат 60х84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,79.
Тираж 100 пр. Зам. № И19-11-63

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003