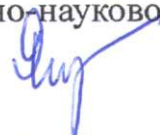


Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії

Кафедра суднових енергетичних установок

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему:

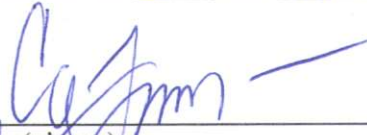
ПІДТРИМАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ МОТОРНИХ МАСТИЛ

Курсанта 2-го року навчання навчально-наукового інституту інженерії
Янцелевича Олександра Сергійовича 

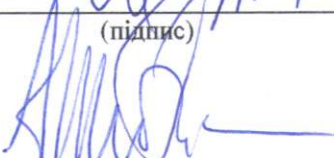
Керівник: д-р техн. наук, професор Сагін С.В. 

Нормоконтроль _____


Роботу заслухано на засіданні кафедри суднових енергетичних установок.
Рекомендовано до захисту в ЕК, протокол № 9 від 17-12 2025 р.

Завідувач кафедри СЕУ,
д-р техн. наук, професор _____


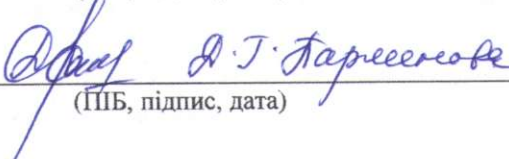
Сергій САГІН

Рецензент (зовнішній) _____


(ПІБ, підпис, дата)



17-12-25

Рецензент (внутрішній) _____


(ПІБ, підпис, дата)

18-12-25

Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії
Кафедра суднових енергетичних установок

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
суднових енергетичних установок

д-р техн. наук, професор Сергій САГІН
10 вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи магістра

Курсант ННІ _____ Янцелевич Олександр Сергійович _____

1. Тема дипломної роботи: __ Підтримання експлуатаційних _____
_____ характеристик суднових моторних мастил _____

Затверджена наказом ректора НУОМА № 1414 від 24 листопада 2025 р. _

2. Об'єкт дослідження _____ процес змащування підшипників _____
_____ кривошипно-шатунного механізму суднових дизелів _____

3. Предмет дослідження _____ експлуатаційні характеристики моторних _____
_____ мастил суднових дизелів _____

4. Обсяг пояснювальної записки: _____ 70...80 стор. _____

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи: _____

___ Огляд літературних джерел з проблеми оптимізації експлуатаційних показників
___ роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів _____

___ Методологія наукового дослідження _____

___ Аналіз контактних взаємодій, що виникають в циркуляційних системах мащення
___ суднових дизелів _____

___ Підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил _____
___ циркуляційних систем мащення суднових дизелів _____

___ Підвищення надійності роботи паливної апаратури високого тиску _____

6. Зміст основної частини пояснювальної записки (перелік питань, що
підлягають розробці):

___ Аналіз розвитку паливної апаратури високого тиску для забезпечення надійності
___ процесу подачі палива _____

___ Методологія наукового дослідження _____

___ Оптимізація роботи паливної апаратури суднових дизелів під час їх експлуатації
___ на режимах часткових навантажень _____

___ Зменшення контактних навантажень у трибологічних системах паливної
___ апаратури високого тиску _____

___ Оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення
___ під час пускових режимів роботи суднових дизелів _____

7. Перелік графічного матеріалу:

___ Методологія наукового дослідження _____

___ Аналіз способів забезпечення експлуатаційних показників систем мащення
___ суднових дизелів _____

___ Результати досліджень _____

___ Висновки _____

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 87 сторінок, 15 рисунків, 7 таблиць, 57 літературних джерел.

Магістерська робота присвячена розв'язанню важливого науково-прикладного завдання – оптимізація експлуатаційних показників систем мащення суднових дизелів.

Результати дисертаційного дослідження підтверджують можливість керованого впливу на трибологічні системи суднових дизелів, що забезпечує мінімальний рівень механічних втрат енергії за рахунок оптимізація експлуатаційних показників систем мащення суднових дизелів.

Експериментально доведено, що з цілого ряду методів щодо підтримання експлуатаційних характеристик моторних мастил найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору) є використання оптимального доливання масла в систему і застосування поверхнево активних речовин.

Запропонована технологія підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил на пускових режимах роботи суднових середньо-оберткових дизелів у випадку їх використання у функції головних двигунів.

СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ, ЦИРКУЛЯЦІЙНА СИСТЕМА МАЩЕННЯ, МОТОРНЕ МАСТИЛО, В'ЯЗКІСТЬ, МЕХАНІЧНІ ВТРАТИ, ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНІ ПРИСАДКИ, УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ВТРАТАМИ, МЕХАНІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ

ABSTRACT

The master's thesis: 87 pages, 15 drawings, 7 tables, 57 references.

The master's thesis is devoted to solving an important scientific and applied task - to create a method of maintaining the operational characteristics of circulating oils of marine diesel engines.

The results of the dissertation confirm the ability of the controlled influence on the tribological systems of marine diesel engines, which provides a minimum level of mechanical energy losses.

It has been experimentally proven that, from a number of methods for maintaining the performance of motor oils, the most appropriate for the ship's conditions (from a technological and financial point of view) is the use of optimal oil filling into the system and the use of surfactants.

The technology of maintenance of the operational characteristics of marine engine oils at the starting modes of operation of medium-speed rotary diesel engines in the case of their use in the function of the main engines is proposed.

MARINE DIESEL, CIRCULATING LUBRICATION SYSTEM, ENGINE OIL, VISCOSITY, MECHANICAL LOSSES, SURFACTANTS, ENERGY LOSS MANAGEMENT, MECHANICAL EFFICIENCY

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	12
1.1. Особливості використання моторних мастил в суднових енергетичних установках	12
1.2. Аналіз експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил.	14
1.3. Аналіз використання суднових циркуляційних мастил і зміни їх експлуатаційних властивостей	19
1.3.1. Циркуляційні мастила для мало-обертових дизелів.....	20
1.3.2. Мастила для середньо-обертових тронкових дизелів.....	23
1.4. Аналіз причин зміни експлуатаційних характеристик циркуляційних мастил в процесі експлуатації	26
1.5. Висновки за розділом 1.....	29
2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	30
2.1. Вибір теми наукового дослідження	30
2.2. Обґрунтування мети і завдань магістерського дослідження	33
2.3. Системний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження	35
2.4. Висновки по розділу 2.....	38
3. АНАЛІЗ КОНТАКТНИХ ВЗАЄМОДІЙ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	38
3.1. Математична модель процесу поширення енергії під час контактної взаємодії твердих тіл, розділених анізотропним мастильним матеріалом	38

3.2. Трибологічні явища, що відбуваються в системі вал-мастильний шар-вкладень підшипника суднових дизелів	46
3.3. Реологічні характеристики мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні тертя підшипників кривошипно-шатунного механізму суднових дизелів	47
3.6. Моделювання процесів зміни реологічних характеристик суднових моторних мастил	48
3.7. Висновки за розділом 3.....	53
4. ПІДТРИМАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ МОТОРНИХ МАСТИЛ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	54
4.1. Зміна енергетичних і теплових потоків у наносистемах, що утворені впорядкованим шаром мастильного матеріалу	54
4.2. Розробка технології підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил циркуляційних систем мащення суднових дизелів під час обертального руху у вузлах тертя.....	57
4.2.1. Підтримання експлуатаційних показників моторного мастила за рахунок оптимального доливання мастила в систему.....	57
4.2.2. Підтримання експлуатаційних показників моторного мастила за рахунок використання поверхнево-активних присадок.....	64
4.3. Висновки за розділом 4.....	69
5. ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ ПІД ЧАС ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	70
5.1. Особливості експлуатації циркуляційних систем мащення під час пускових режимів роботи суднових дизелів.....	70
5.2. Технологія проведення досліджень	71
5.3. Выводи за розділом 5.....	78
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
КШМ	–	кривошипно-шатунний механізм
ММ	–	моторне мастило
МОД	–	малообертовий дизель
ПАР	–	поверхнево-активна речовина
ПАП	–	поверхнево-активна присадка
РХ	–	реологічні характеристики
СОД	–	середньообертовий дизель
СЗ	–	система змащення
СЕУ	–	суднова енергетична установка
ТС	–	трибологічна система
ЦПГ	–	циліндро-поршнева група

ВСТУП

Сучасна суднова енергетична установка (СЕУ) представляє складний комплекс технічних засобів. Її головне призначення – забезпечення руху судна, але одночасно вона забезпечує необхідною енергією всі споживачі, механізми і пристрої, створює умови життєдіяльності екіпажу в службових і житлових приміщеннях судна і так далі.

Значне підвищення технічної складності суднового обладнання спричинило збільшення первинної вартості суден і викликало підвищені вимоги до економічної ефективності їх, експлуатації. Для зменшення витрат і збільшення прибутку судновласницькі фірми прагнуть максимально скоротити час стоянки суден (як під вантажними операціями, так і для виконання профілактичних та ремонтних робіт), а також зменшити витрати, пов'язані з технічною експлуатацією. Скорочення стоянкового часу здійснюється шляхом компактного формування вантажу (у контейнерах, ліхтерах) і підвищення організації процесу вантажних операцій.

Тенденції в розвитку світового морського флоту характеризуються підвищеною увагою до використання високорентабельних спеціалізованих суден, оснащених автоматизованими енергетичними й вантажними комплексами.

Ефективна експлуатація судових енергетичних установок може бути досягнута при умові найкращого вибору режимів роботи двигунів, впровадження сучасної технології технічного обслуговування, раціонального використання паливо енергетичних ресурсів.

Розв'язання проблеми витрат на технічну експлуатацію в основному пішло по шляху оснащення суден системами автоматизації й використання в судових енергетичних установках високо економічних двигунів. Це дозволяє скоротити чисельність суднового персоналу до мінімального

рівня, необхідного для забезпечення вахтового і чергового обслуговування; а найголовніше значно скоротити витрати на паливо та змащувальні матеріали, що в умовах інтенсивної витрати запасів нафти та зростання цін на енергоносії матеріали має високе значення.

Функціонування головної, допоміжної котельної і електроенергетичною установок, складових енергетичну установку судна, забезпечується різними системами, що включають трубопроводи, теплообмінні апарати, арматуру і так далі.

Основними є системи паливні, мастильні, охолодження, стислого повітря, газовідвідні, управління і захисту.

Основною тенденцією в розвитку суднових дизелів є підвищення їх циліндрової і агрегатної потужності і техніко-економічних показників, що багато в чому залежить від якості вживаних моторних мастил. Раціональне використання моторних мастил припускає в першу чергу їх обґрунтований вибір з урахуванням конструктивних особливостей дизеля і умов експлуатації, а також зниження витрати мастил на чад і заміну. Якість моторних мастил в основному визначається кількістю і ефективністю присадок, що вводяться в них. За допомогою присадок можна забезпечити підвищення великої кількості властивостей моторних мастил.

Правильно і обґрунтовано вибраний сорт моторного мастила, кваліфікаційне обслуговування систем мащення, догляд за технічним станом деталей і елементів двигуна в значній мірі сприяють підвищенню надійності, довговічності і економічності суднових дизелів.

Саме питанням оптимізації експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів присвячена дипломна робота.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Проблеми забезпечення експлуатаційної надійності, експлуатаційних показників роботи систем мащення та необхідних режимів мащення, а також експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення, механізмів та їх елементів були та залишаються настільки актуальними і важливими, що дослідження в області створення, випробування, техніки та технології застосування мастильних матеріалів сформувалися в великий науковий напрямок.

Досягнуті позитивні результати в цій області прямо впливають на технічну та економічну ефективність використання всіх видів техніки, в тому числі і суднової [1-3].

1.1. Особливості використання моторних мастил в суднових енергетичних установках

Суднові енергетичні установки (як головні, так і допоміжні) є порівняно невеликими споживачами мастильних матеріалів в загальному обсязі світового транспортно-енергетичного комплексу. При цьому слід підкреслити, що моторні мастила (ММ), яки використовуються на морському флоті, в найбільшій мірою леговані присадками і відрізняються великим запасом якості за своїм первинним властивостям. Середній вміст присадок в суднових мастилах в кілька разів перевищує цей показник по ММ, застосовуваним в інших сферах техніки і енергетики. Це пов'язано в першу

чергу зі специфікою експлуатації суднової техніки: високими температурними і механічними напруженнями в зонах контакту; неминучістю попадання в мастильні матеріали палива, води і механічних домішок; роботою при різних параметрах навколишнього середовища і т.д. Все це обумовлює виключно високий рівень вимог до властивостей мастил [4-6].

Поглиблення переробки нафти супроводжується погіршенням якості всіх видів палив, що призводить до зниження надійності роботи і ресурсних показників судових дизелів. При цьому збільшується інтенсивність старіння ММ, забруднення двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) вуглецевими відкладами і швидкість їх зношування.

Жорсткість умов роботи ММ в форсованих ДВЗ (у зв'язку з необхідністю скорочення його чаду і застосування палив високої в'язкості) зажадало комплексного підходу до підвищення ефективності систем змащення (СЗ) тронкових ДВЗ середньої і підвищеної частоти обертання. Одним заходом, наприклад, поліпшуючи тільки якість мастила або використовуючи сепараційні та фільтраційні установки з високою розподільчою здатністю, забезпечити необхідний технічний рівень сучасних дизелів і їх СЗ неможливо [7].

В даний час провідними в області розробки моторних мастил є міжнародні нафтові компанії (Mobil oil, Shell, ESSO, Castrol, BP, Agip, Nippon Petroleum, Chevron Техасо та ін.). Між ними точиться гостра конкурентна боротьба за ринки збуту нафтопродуктів. Тому дослідні центри компаній постійно вишукують шляхи поліпшення якості мастил за рахунок вдосконалення їх складу. Особлива увага приділяється питанням економії ММ в процесі їх застосування на судах, а також перспективам регенерації їх експлуатаційних властивостей [8, 9].

1.2. Аналіз експлуатаційних характеристик судових моторних мастил

Основні властивості нафтових мастил аналогічні, за деяким винятком, властивостям рідкого палива, використововуваного в ДВЗ. Тому визначення цих властивостей не повторюються, а розглядаються тільки їх особливості. В'язкість характеризує здатність мастила створювати визначний режим тертя, при якому шар змащувального матеріалу між деталями, що труться, здатний протистояти високим навантаженням, запобігаючи безпосередньому контакту поверхонь, що труться. Для циркуляційних мастил оптимальною є в'язкість 9...11 мм²/с при 100°С. При великих значеннях в'язкості важко підведення змащувального матеріалу до вузлів тертя, погіршуються умови розтікання мастила по змащуваній поверхні і зростають втрати на тертя, при менших – знижується міцність масляного шару [10].

Особливе значення в'язкості має при виборі циліндрових мастил. Недостатньо в'язкі мастила знижують здатність масляної плівки, що несе, і значно погіршують умови змазування циліндрів. Циліндрові мастила мають в'язкість 14...16 мм²/с при 100 °С.

Індекс в'язкості – це безрозмірна величина, що характеризує за стандартною шкалою пониження в'язкості мастила при підвищенні температури. Визначити індекс в'язкості можна по спеціальній таблиці, знаючи в'язкість при 50 і 100°С. При цьому залежність в'язкості від температури даного мастила порівнюють з аналогічною залежністю еталонних мастил. Чим менше залежить в'язкість мастила від температури, тим вище індекс в'язкості і тим вище експлуатаційні якості мастила. Незначна зміна в'язкості в діапазоні робочих температур сприяє збереженню змащувальних властивостей мастила і підтримці заданого режиму мастила в деталях, що труться. Для дизельних мастил достатнім значенням індексу в'язкості є 85...90 [11-13].

Кислотне число характеризує корозійну агресивність мастила і виражається кількістю міліграма КОН, яке йде на нейтралізацію вільних кислот в 1 г мастила. Кислотне число використовують для характеристики мастил, що не містять лужні присадки. Значення кислотного числа визначають послідовним додаванням до проби мастила доль лужного індикатора до зміни його забарвлення. Навіть добре очищені мінеральні мастила містять деяку кількість органічної кислоти, що не перевищує звичайні 0,1 міліграм КОН на 1 г мастила.

В процесі експлуатації кислотність мастила зростає унаслідок його окислення і попадання в нього кислот, що утворилися в результаті згорання в циліндрі сірчистих з'єднань. Як указувалося вище, з підвищенням кислотності мастила прискорюється процес його старіння, збільшується схильність мастила до відкладень лаку, нагари і шламу, з'являється небезпека корозійного роз'їдання металу. При збільшенні кислотності мастила важливо встановити в нім наявність неорганічних (мінеральних) кислот, які є найбільш корозійно-активними у присутності води.

Шкідлива дія кислот, що з'являються в мастилі, можна запобігти при використанні лужних присадок.

Лужне число характеризує здатність мастила нейтралізувати кислоти, що з'являються в нім, запобігаючи корозії і зношуванню змащуваних поверхонь. Лужні властивості забезпечують введенням в мастило спеціальних присадок. Загальне лужне число визначається кількістю міліграма КОН на 1 г мастила.

Початкове лужне число підбирають з урахуванням можливої інтенсивності утворення кислот в середовищі, де працюватиме змащувальне мастило. Для суднових допоміжних двигунів, що працюють на дизельних паливах, мінімальний рівень лужності, що забезпечує необхідні нейтралізуючі і миючі властивості мастила, складає 1,5...2,0 міліграм КОН на 1 г мастила. Для крейцкопфних мало-оберткових дизелів (МОД) і могутньої тронкових середньо-оберткових дизелів (СОД), що працює на високо

сірчистих паливах, цей рівень не повинен бути нижче 6...8 міліграм КОН на 1 г мастила, оскільки скидання мастила з продуктами згорання сірчистих з'єднань, що знаходяться в ній, із стінок циліндра безпосередньо в картер може швидко привести в непридатність циркуляційне мастило [14].

Високі миючі властивості лужних мастил обумовлюють їх застосування також в циркуляційних системах крейцкопфных ДВЗ, особливо при використанні циркуляційного мастила для охолодження поршнів.

Найбільші лужні числа мають циліндрові мастила, використовувані в двигунах, що працюють на високо сірчистих паливах. При цьому із збільшенням змісту сірі в паливі нейтралізуюча дія мастила повинна бути підвищена, тому вище повинна бути його лужність. Гранична лужність сучасного циліндрового мастила (близько 100 міліграма КОН на 1 г мастила) достатня для нейтралізації сірчистих з'єднань, що утворюються при згоранні палива із змістом сірі до 5 % [15].

Контроль зміни змісту лугу у відпрацьованому циліндровому мастилi в порівнянні з початковим лужним числом дозволяє встановити правильність вибору лужності мастила. У відпрацьованому мастилi лужне число повинне бути не менше 1...2 міліграма КОН на 1 г мастила. Не менш важливий контроль лужності і в циркуляційних мастилах, де зменшення лужного числа, що стабілізувалося, указує на появу в мастилi мінеральних кислот і вимагає вживання заходів для запобігання їх утворення.

Зміст водорозчинних кислот і лугів характеризує наявність в мастилi сильних кислот мінерального походження і лугів. У свіжому мастилi без присадок зміст водорозчинних кислот залежить від повноти нейтралізації мастила після сірчанокислового очищення в процесі виготовлення. Наявність водорозчинних кислот, особливо при одночасній присутності води, сприяє інтенсивній корозії деталей двигуна, тому їх вміст в мастилi не допускається.

Вміст лугів в свіжому мастилi може з'явитися наслідком неякісної промивки мастила після лужного очищення в процесі виготовлення. До

експлуатації таке мастило не допускається. У мастилах з лужними присадками наявність луку обумовлюється характером присадки і не є ознакою непридатності мастила.

Зольність базового мастила характеризує ступінь очищення мастила від мінеральних включень. Завдяки високій якості очищення зольність мастил, що не містять присадки, вельми незначна і не перевищує 0,005%. При використанні присадок металоорганічного походження зольність мастила багато разів зростає. Проте досвідом встановлено, що абразивний знос при використанні таких мастил не збільшується.

Термоокислительна стабільність характеризує стійкість мастила проти окислювальної дії кисню при підвищених температурах. Цей показник важливий не тільки для циліндрових мастил, що працюють в зоні високих температур, але і для циркуляційних, які в тронкових двигунах часто використовують також для змазування циліндрів, а в могутніх охолоджують поршні. Термоокислительна стабільність багато в чому визначає особливість роботи мастила в зоні поршневих кілець.

Термоокислительную стабільність мастила оцінюють по рости, з якою мастило при даній температурі превращається лакову плівку. Підвищення стійкості мастил в умовах високих температур, а значить запобігання небажаним відкладенням на поверхні деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) досягається введенням в мастило присадок, що уповільнюють окислення мастила. Крім того, відкладенню нагари і лаку перешкоджає лужність мастила, що забезпечує нейтралізацію кислот згорання сірчистих з'єднань, дія яких на мастило знижує його стабільність.

Застосування перерахованих присадок забезпечує циркуляційному маслу термоокислительную стабільність 17...35 хв при 250°C, а циліндровому – не менше 90 хв при 250°C [16].

Температура застигання характеризує можливість використання мастил в умовах низьких температур і складає для циркуляційних і циліндрових

мастил від -10 до -16°C . Залежно від температури застигання визначають необхідність підігріву. Для забезпечення надійного перекачування мастила підігрів необхідний при температурі, на $10\text{...}15^{\circ}\text{C}$ що перевищує температуру застигання. Циліндрове мастило слід використовувати без підігріву, для чого в нього вводять депресантні присадки.

Температура спалаху характеризує схильність масляної пари до займання і показує можливість використання мастил для змазування поверхонь, що мають високі температури, що важливе при виборі циліндрових мастил. Температура спалаху циліндрових мастил повинна бути вище за температуру стінок циліндра, інакше мастило вигорятиме з утворенням твердих відкладень, що порушують режим тертя. У циліндрових мастилах температура спалаху досягає 220°C .

Для циркуляційних мастил температура спалаху, що перевіряється в експлуатації, може показати наявність в мастилі палива. Це особливо важливо в двигунах, що працюють на важких сортах палива. Незначна різниця між в'язкістю важких топ-лив і в'язкістю циркуляційних мастил не дозволяє встановити наявність в мастилі паливних включень по в'язкості, і лише пониження температури спалаху може вказати на цей недолік. Допустима межа зниження температури спалаху 170°C .

Зміст механічних домішок небажаний для мастила, оскільки викликає додатковий знос деталей, що труться, і відкладення нагари в циліндрах. У більшості циркуляційних мастил без присадок зміст механічних домішок не допускається. Використання присадок до циліндрових і циркуляційних мастил викликає незначне збільшення змісту механічних домішок і не перевищує $0,05\%$.

Якщо мастила містять диспергуючі присадки, вміст в мастилі механічних домішок допускається до вельми високого рівня або взагалі не регламентується, оскільки подібна концентрація домішок при нормальній роботі сепараторів не зустрічається. Протизнос, антизадирні властивості

проти нагару мастила багато в чому визначаються ступенем дисперсності нерозчинних домішок. При хороших диспергуючих свойствах, присадок, що знаходяться в мастилі, середній розмір домішок не перевищує 0,1 мкм.

Зміст води погіршує змащуючі властивості, знижує здатність масляного шару, що несе, збільшує корозійну дію кислот, що містяться в мастилі, а в мастилах з присадками сприяє вимиванню окремих компонентів присадки і випаданню їх в осад. Тому вода в мастилах допускається лише у вигляді слідів.

В процесі експлуатації вода може потрапити в мастило, тому мастилам додають стійкість проти утворення емульсії, яка не тільки погіршує умови мастила і розчиняє окремі присадки, але і приводить до небажаних відкладень опадів в трубопроводах.

Стійкість при зберіганні – це властивість, якою повинне володіти мастило при тривалому зберіганні в умовах значного коливання температури навколишнього середовища. Призначене для використання на судах мастило містять в берегових резервуарах, де його часто доводиться зберігати тривалий час в різних кліматичних умовах. Крім того, мастило випробовує значні температурні коливання і в умовах суднового зберігання. Враховуючи це, маслу додають стійкість проти випадання присадок і зміни фізико-хімічних властивостей при тривалому зберіганні. Не дивлячись на достатньо високу стійкість мастила, умови його тривалого зберігання обмовляються [17].

1.3. Аналіз використання суднових циркуляційних мастил і зміни їх експлуатаційних властивостей

Застосовувані на суднах мастила підрозділяють на моторні і мастила для допоміжних механізмів і пристроїв. ММ в свою чергу поділяються на

циліндрові, що використовуються для змащування циліндрів суднових крейцкопфних мало-обертових дизелів (МОД); циліндрові, що застосовуються для змащування тронкових середньо-обертових дизелів (СОД); циркуляційні, що застосовуються для змащування і охолодження підшипникових вузлів.

Основні функції мастил зводяться до забезпечення надійної роботи вузлів тертя, зменшення тертя і викликаний ним зносу; запобігання зносу в усіх інших його формах; видалення із зони тертя забруднюючих елементів; охолодження шляхом відведення теплоти від поверхонь, що труться; забезпечення густини в зоні кільцевого ущільнення поршнів; запобігання корозії.

1.3.1. Циркуляційні мастила для мало-обертових дизелів

Одним з видів мастила, що застосовуються в МОД, є циркуляційне, що призначено для мащення рамових, мотильових і крейцкопфних підшипників, а також охолодження поршнів. Функції цього мастила, крім змащувальних і охолоджуючих, складаються в запобіганні корозії і іржавіння деталей (в тому числі і в присутності води), підтримці нерозчинних частинок в підвішеному стані (для забезпечення чистоти деталей картера двигуна), хорошою водовидаляючої здатності, малої емульгуємості з водою, а також стійкості до окислення при прокачуванні через високотемпературну зону поршнів [18]. Принципові схеми циркуляційних СЗ суднового МОД 6L42МС фірми MAN-Diesel показані на рис. 1.1, 1.2 [19].

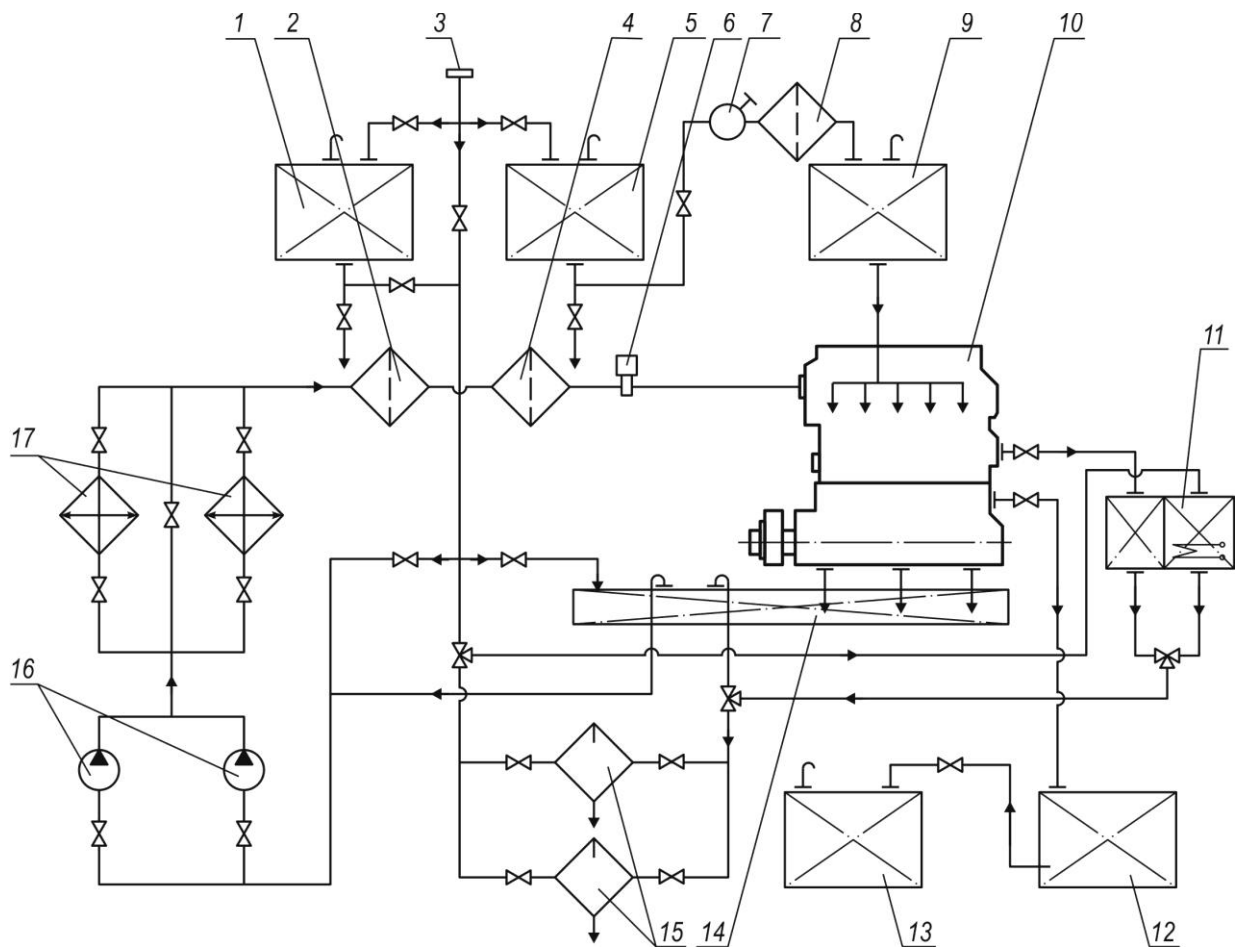


Рис. 1.1. Склад циркуляційної системи змащування суднового МОД:
 1 - цистерна циркуляційного мастила; 2, 4, 8 - мастильний фільтр; 3 - прийом мастила з палуби; 5 - цистерна циліндрового мастила; 6 - терморегулятор;
 7 - ручний насос; 9 - витратна цистерна циліндрового мастила; 10 - головний двигун; 11 - зливний бак мастила від сальників і штоків поршня;
 12 - дренажний бак для ресивера продувочного повітря; 13 - грязевідстійник для сепараторів важкого палива; 14 - піддон циркуляційного мастила;
 15 - мастильні сепаратори; 16 - мастильні насоси; 17 - мастильні охолоджувачі

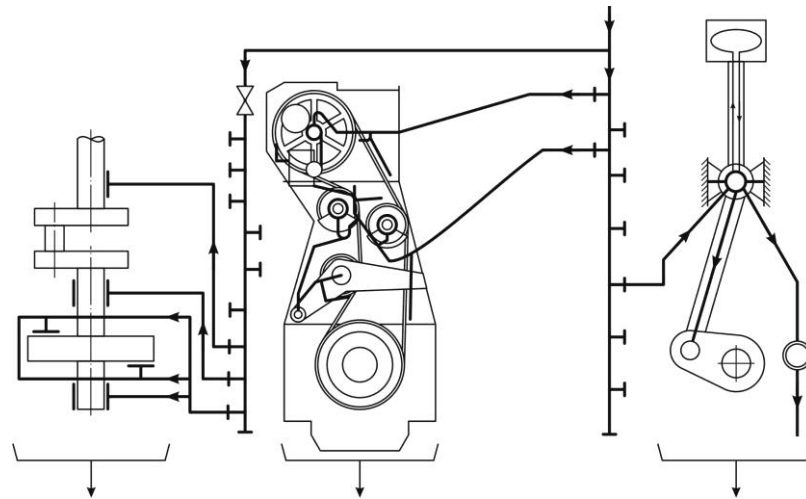


Рис. 1.2. Схема системи циркуляційного змащування дизеля і охолодження поршнів

Циркуляційний мастило також служить для підтримки мастильного клина в підшипниках КШМ, тому в'язкість цих сортів мастил має особливо важливе значення. Для всіх циркуляційних мастил оптимальною вважається в'язкість $10 \dots 12 \text{ мм}^2/\text{с}$ (сСт), що відповідає класу SAE30.

Мастило в крейцкопфних дизелях має працювати без заміни десятки тисяч годин, тому його здатність протягом тривалого часу зберігати свої моторні властивості, головним чином визначаються здатністю протистояти процесам окислення в умовах підвищених температур під впливом кисню повітря і проникають в мастило агресивних сполук, є не менш важливим. Чисто мінеральне мастило в сучасному дизелі, особливо якщо його поршні мають масляне охолодження, під дією високих теплових навантажень піддається процесам полімеризації з утворенням високомолекулярних вуглеводневих сполук, що прилипають до стінок картера, що випадають в осад і нерідко призводять до закупорки масляних каналів. У сучасній практиці експлуатації дизелів чисто мінеральні мастила припинили застосовувати, замінивши їх мастилами з високоефективними присадками.

Рівень лужності сучасних циркуляційних мастил для двотактних крейцкопфних дизелів визначається величиною $3 \dots 5 \text{ мгКОН/г}$.

1.3.2. Мастила для середньо-оберткових тронкових дизелів

Особливий клас представляють мастила для потужних суднових СОД, які експлуатуються на високо сірчистих важких паливах. Такі дизелі використовуються як головні двигуни, що передають свою потужність на гвинт [20]. Більшість СОД високої циліндрової потужності мають дві системи мастила: лубрикаторну (для змащення циліндрів), і циркуляційну – для змазування підшипників КШМ. Однак, використання в тронкових двигунах двох різних за своїми властивостями мастил – циліндрового і циркуляційного є недоцільним через неминуче змішування цих мастил як в картері двигуна, так і на стінках циліндрів з огляду на те, що конструкція тронкового дизеля не дозволяє розділити циліндрові і циркуляційний мастила, як це має місце в крейцкопфному двигуні. Принципова схема системи змащування суднового СОД високої потужності показана на рис. 1.3.

Більшість суднових СОД використовуються в якості допоміжних двигунів, забезпечуючи привід електрогенераторів. Такі дизелі мають тільки циркуляційну систему змащування, принципова схема якої показана на рис. 1.4 [21].

Основні вимоги, що пред'являються до властивостей мастил для змащення суднових СОД:

- забезпечувати надійне змащення підшипників КШМ (рамових, мотильових, головних) і розподільного вала, упорного підшипника, ланцюгових і шестеренних приводів і інших деталей;

- охолоджувати головки поршнів в двигунах з мастильним охолодженням поршнів;

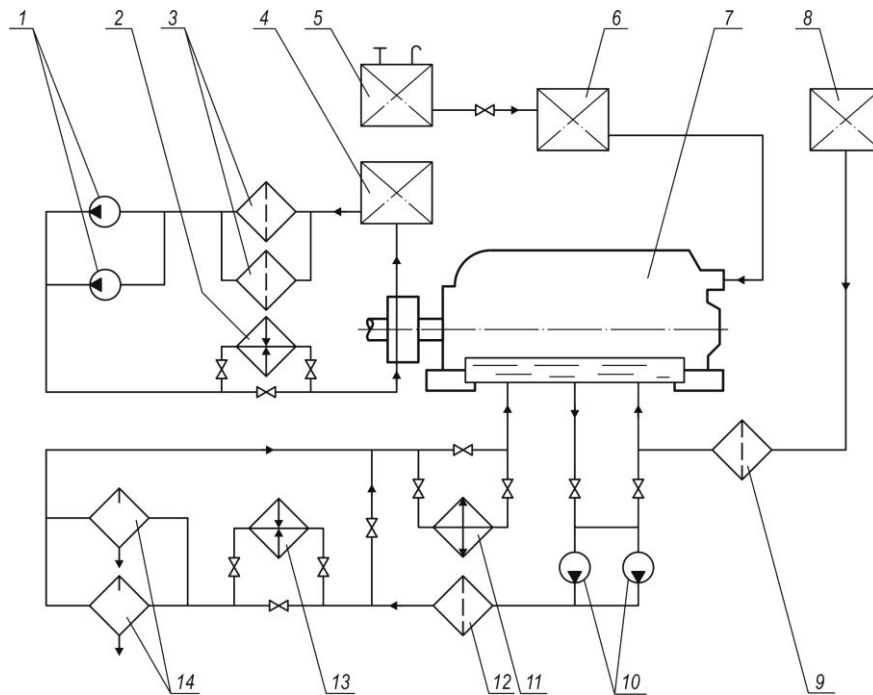


Рис. 1.3. Система змащування СОД з високою циліндровою потужністю:
 1 - насоси мастила редуктора; 2 - підігрівач мастила редуктора;
 3 - мастильні фільтри; 4 - цистерна мастила редуктора; 5 - танк циліндрового мастила; 6 - витратний танк циліндрового мастила; 7 - головний двигун;
 8 - танк циркуляційного мастила; 9, 12 - мастильний фільтр; 10 - мастильні насоси; 11 - охолоджувач мастила; 13 - мастильний підігрівач; 14 - мастильні сепаратори

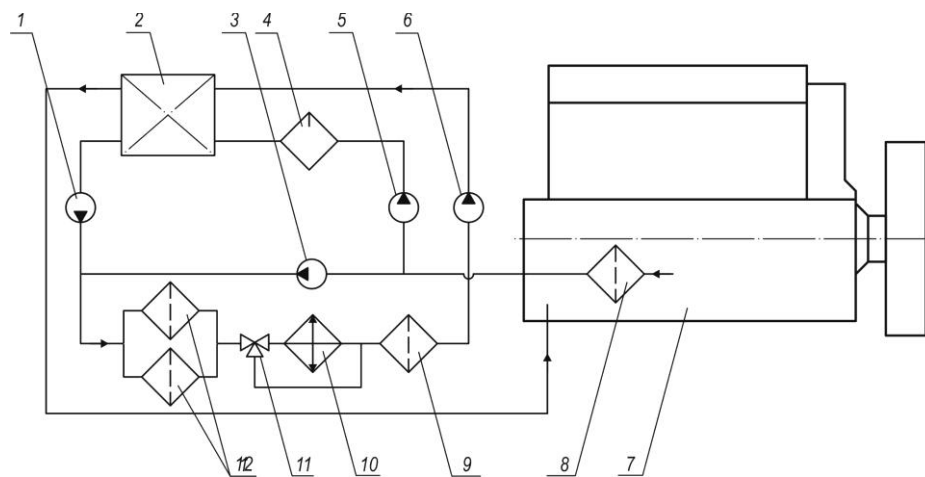


Рис. 1.4. Система змащування СОД, що використовується як допоміжний двигун:

1, 5, 6 - мастильний насос; 2 - мастильний бак; 3 - мастильний насос перед пускового прокачування; 4 - центрифуга; 7 - допоміжний двигун; 8, 9, 12 - мастильний фільтр; 10 - мастильний холодильник; 11 - триходовий кран

- охороняти деталі, які змащуються від стоянкової корозії (іржавіння) при тривалій перерві в роботі двигуна;
- відводити тепло від вузлів тертя;
- перешкоджати утворенню нерозчинного осаду в картері дизеля;
- нести з двигуна продукти зносу, пил, окалину та ін.

Крім того, ці мастила не повинні утворювати стійкої емульсії при їх обводнюванні, не корродировать чорні і кольорові метали і їх сплави, не спінюватися, не викликати відкладень на охолоджуваної поверхні головки поршня, в мастилопроводах і на стінках картера і практично працювати необмежено довгий час. Зважаючи на велику кількість різноманітних марок ММ, що випускаються навіть однією компанією, мастила повинні мати гарну сполучуваністю один з одним.

Розвиток і зміна поколінь мастил для СОД аналогічно циліндровим мастилам для МОД відбувалися внаслідок форсування і збільшення циліндрової потужності двигунів, їх переведення на високо-сірчисті важкі палива. Щодо основних фізико-хімічних показників ці зміни проявилися в збільшенні вихідної в'язкості мастил від класу SAE30 до SAE40 (з підвищенням в'язкості від 9...13 сСт до 14..16,5 сСт при 100°C) і вихідного лужного числа. В даний час кількість марок мастил даного типу, що випускаються кожною великою нафтовою компанією, становить як правило п'ять-сім: мастила з лужним числом 12 мгКОН/г, мастила з лужним числом 20...30 мгКОН/г і мастила з лужним числом 30...40 мгКОН/г.

1.4. Аналіз причин зміни експлуатаційних характеристик циркуляційних мастил в процесі експлуатації

У зв'язку з підвищенням потужності, зміною конструкції і ускладненням експлуатації сучасних дизелів умови, в яких працюють ММ, стали більш жорсткими [22]. Однак терміни заміни мастил безперервно збільшуються завдяки поліпшенню їх якостей. Передчасна заміна мастил економічно недоцільна, оскільки збільшується їх витрата, витрати на технічне обслуговування, запасні частини та т.і. Невиправдане збільшення терміну служби мастил призводить до підвищеного зносу деталей дизеля, що знижує надійність дизеля і збільшує відмови в його роботі [23]. Визначення оптимальної періодичності заміни мастил є трудомісткою тривалою роботою, має важливе економічне і технічне значення. Тому актуальним є вирішення завдання відновлення експлуатаційних і реологічних характеристик мастила в процесі його роботи.

Періодичне додавання мастила в процесі експлуатації частково відновлює його первинні властивості. Через певний час мастило підлягає повній заміні. Періодичність заміни мастила залежить від його властивостей, типу дизеля, його технічного стану і умов експлуатації, технічного стану масляної системи, способу фільтрації, використовуваного палива і інших чинників. Визначення оптимальних строків поповнення мастила в системі вивчалася в різних дослідженнях, при цьому для різних типів судових ДВЗ і їх СЗ як оптимальних пропонувалися різні способи, від регулярного поповнення системи за допомогою автоматичного регулятора підтримки рівня мастила в картері або стічної цистерни, до одноразового поповнення при досягненні мінімального можливого обсягу [24-27]. Необхідність повної заміни обумовлена втратою основних експлуатаційних якостей мастила, тобто його старінням. Основна причина спрацьовування (старіння) мастила –

окислюваність мастила і спрацьовування присадок. Крім того, відбувається забруднення мастила продуктами його окислення, вуглецевими частинками, що потрапляють в мастило ззовні, металевими частинками, що утворюються в результаті зносу деталей двигуна, продуктами корозії металів, незгорілим паливом, сірчистими сполуками, що містяться у відпрацьованих газах, водою, яка утворюється при конденсації з відпрацьованих газів і потрапляє з навколишнього середовища з повітрям.

Забруднення мастила відбувається в процесі його транспортування, бункерування на судно, зберігання в запасних і відстійних танках. Кількість механічних домішок в мастилі може становити 0,2 %. Домішки, що потрапляють ззовні і утворюються в процесі експлуатації мастила, змінюють характер тертя, засмічують мастильні фільтри і магістралі, збільшують температурний режим роботи деталей дизеля, викликають їх підвищений знос. Забруднення мастила домішками викликається підвищенням прориву газів в мастильний картер, а також продуктами неповного згоряння палива [28]. Підвищений вмістом механічних домішок в маслі свідчить про поганий технічний стан системи фільтрації.

Сучасні двигуни характеризуються зменшенням обсягу масляної системи, внаслідок чого збільшено продуктивність масляних насосів і кратність циркуляції мастила. Останнє підвищує насичення мастила повітрям, що, в свою чергу, веде до збільшення швидкості окислення мастила і підвищенню зносу деталей дизеля.

Поряд з експлуатацією на форсованих режимах для багатьох судових дизелів (особливо допоміжних) характерна періодична робота з частими висновками з експлуатації, а також робота на часткових навантаженнях. Досвід свідчить, що на таких режимах допоміжні дизелі працюють 40...60 % всього часу експлуатації. Як відомо, часткові режими характеризуються підвищеними тепловими навантаженнями, що сприяє більшому окисленню мастила і його витраті на вигар [29].

На утворення вуглецевих і інших відкладень на деталях дизеля суттєво впливають вид і склад палива. У відпрацьованих газах дизеля міститься значна кількість сажі. Чим гірше технічний стан дизеля, тим більше сажі міститься у відпрацьованих газах і тим більше потрапляє її в мастило. Склад і кількість відкладень на деталях дизеля веде до серйозних порушень в його роботі і може служити причиною виходу з ладу.

Старіння мастила призводить до закоксування поршневих кілець, їх пригорання, втрати рухливості; підвищення температури деталей ЦПГ через погіршення тепловідведення; зависання і прогорання продувних і випускних клапанів, а також до зменшення їх прохідного перетину; забруднення фільтрів, прийомних отворів масляних насосів, прохідних перетинів в охолоджуючих каналах поршня і колінчастого вала; зміни в'язкості мастила; підвищенню корозійного зносу деталей ЦПГ; абразивного зносу деталей твердими частинками домішок.

Періодичність заміни мастил встановлюють на основі ретельного вивчення експлуатаційних властивостей мастил і їх зміни в процесі експлуатації. При цьому періодичність заміни мастил поки недостатньо обґрунтована, тому потрібне коригування термінів заміни мастил, встановлених заводом-виробником, після достатнього накопичення і вивчення результатів експлуатації. Визначення оптимальної періодичності оновлення або повної заміни ММ, як правило, відбувається на основі досвіду експлуатації і залежить від безлічі параметрів, до яких, в тому числі, відноситься технічний стан дизеля і якість застосовуваного палива. Обидва цих параметра не підлягають точному прогнозуванню на етапі створення ММ і розробці рекомендацій щодо його використання. Це ще раз підкреслює важливість проблеми оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів

1.5. Висновки за розділом 1

В результаті проведеного огляду літературних джерел встановлено наступне:

1) в світовому дизелебудування (в тому числі і судновому) триває тенденція збільшення агрегатних і циліндрових потужностей двигунів, одночасно з підвищенням ефективних показників судових дизелів ростуть енергетичні втрати, пов'язані з передачею потужності споживачам енергії;

2) форсування судових дизелів по частоті обертання і ступеня наддуву призводить до підвищених динамічним і тепловим навантаженням на підшипникові вузли, що посилює вимоги до експлуатаційних і реологічних характеристик ММ, що забезпечує надійну роботу всіх елементів дизеля;

3) найбільші теплові навантаження відчують ММ, що використовуються в циркуляційних системах змащування судових СОД, оскільки забезпечують режими змащування і охолодження не тільки підшипникових вузлів, але і ЦПГ.

Наведені факти свідчать про необхідність досліджень оптимізації експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення судових дизелів.

2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Вибір теми наукового дослідження

В класичних роботах, що присвячені методології наукових досліджень, визначено головний методологічний принцип наукового дослідження: «...щоб уникнути однобічності в дослідженні об'єкта, необхідно врахувати всі суттєві сторони і зв'язку предмета...». Дане висловлювання актуально в даний час, тому що під нього повністю підпадають сучасні вимоги в категоріях «об'єкт дослідження» і «предмет дослідження». Їм же стверджувалося «...для того, щоб визначити тему і напрям наукових досліджень, необхідно використовувати наукові прогнози - передбачення...» [30].

З огляду на дані висловлювання, вибір напрямку наукового дослідження заснований на проведеній експертної оцінки можливих варіантів вирішення завдання забезпечення енергетичної ефективності суднових дизелів за наступними критеріями: 1) актуальність; 2) наукова новизна; 3) економічна ефективність; 4) можливість використання в умовах морського судна; 5) відповідність спеціальності, а також основним напрямкам наукової спеціальності і наукової школи.

Оцінка напрямки наукового дослідження здійснена за вказаними вище показниками і відображена в таблиці 2.1, де позитивну оцінку відповідає знак «+», а негативною знак «-».

Виконана експертна оцінка значимості досліджень по технологічному вдосконаленню систем змащування показала, що на сучасному етапі розвитку суднових дизелів і їх систем змащування даний варіант вирішення поставленого завдання всебічно вивчено і не є актуальним.

Таблиця 2.1. Використання методу експертних оцінок для визначення варіантів вирішення завдання збереження енергетичної ефективності суднових дизелів і їх систем змащування

Варіант вирішення поставленого завдання	Критерії					
	актуальність	наукова новизна	економічна ефективність	можливість використання в умовах морського судна	відповідність спеціальності	сума балів
1. Технологічне вдосконалення систем змащування	-	+	+	+	-	3
2. Технологічне вдосконалення елементів конструкції дизелів	-	+	+	-	-	2
3. Розробка та застосування нових мастильних матеріалів	+	+	-	+	-	3
4. Удосконалення систем підготовки та використання палива	+	+	-	+	+	4
5. Оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення	+	+	+	+	+	5

Технологічне вдосконалення елементів конструкції СОД в даний час також досягло свого максимуму, а окремі варіанти розв'язання цього завдання ставляться немає суднової енергетики, а до автомобільного та залізничного транспорту.

Оцінка значущості варіанту, пов'язаного з розробкою і застосуванням нових мастильних матеріалів не підтверджується його економічною ефективністю, в зв'язку з тривалістю етапів його впровадження.

Крім того, названі варіанти не відповідають паспорту наукової спеціальності, основними напрямками наукової спеціальності і наукової школи.

Експертні оцінки значущості вдосконалення систем підготовки та використання палива показали, що в основному всі оцінювані критерії мають позитивну оцінку, проте економічна ефективність даного варіанту зараз ще не може бути забезпечена через необхідність масштабних конструктивних перетворень систем СЕУ.

За результатами експертних оцінок найбільш оптимальним і доцільним слід визнати оптимізацію експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення, в зв'язку з цим саме на його розвиток направлено наукове дослідження і тема магістерської роботи.

З огляду на обраний напрям наукового дослідження, а також на підставі результатів аналізу інформаційного пошуку, виконаного в першому розділі, була визначена **тема магістерського наукового дослідження** – підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил.

Основним обґрунтуванням вибору теми досліджень також є наступне:

збереження енергетичної ефективності суднових дизелів сприяє виконанню основних завдань, що покладаються на морське судно: забезпечення життєдіяльності суднового екіпажу, перевезення вантажу в необхідному стані і у встановлений час, отримання економічної ефективності;

суднові дизелі використовуються на всіх без винятку морських і річкових судах, їх модельний ряд безперервно розширюється, а циліндрові і агрегатні потужності підвищуються;

невід'ємною частиною суднових дизелів є циркуляційні системи змащування, які забезпечують не тільки задані режими тертя – граничний і гідродинамічний, а й виконання основних законів термодинаміки – підведення і відведення теплоти;

мастильний матеріал, як складова частина всіх контактуючих поверхонь, володіє власними експлуатаційними характеристиками, підтримання яких сприяє перебігу необхідних режимів мащення і збереженню енергетичної ефективності суднових дизелів.

Актуальність теми магістерського дослідження базується на запиті практики про необхідність пошуку нових шляхів збереження енергетичної ефективності суднових дизелів при передачі потужності від дизеля до споживачів енергії.

Наукова спрямованість досліджень відповідає спеціальності; профілю досліджень, що проводяться кафедрою суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія».

Як **об'єкт дослідження** в магістерському дослідженні обраний процес змащування підшипників кривошипно-шатунного механізму суднових дизелів.

Предметом дослідження є експлуатаційні характеристики моторних мастил суднових дизелів.

2.2. Обґрунтування мети і завдань магістерського дослідження

З огляду на тему магістерського дослідження, була сформульована **мета роботи** – збереження енергетичної ефективності суднових дизелів.

Гіпотеза магістерського наукового дослідження полягає в тому, що збереження енергетичної ефективності суднових дизелів забезпечується

мінімально неминучими втратами енергії на тертя за рахунок оптимізації експлуатаційних показників систем мащення суднових дизелів.

Головне завдання магістерського дослідження полягає в створенні методу підтримання експлуатаційних характеристик циркуляційних мастил суднових дизелів.

Для вирішення головного завдання необхідне рішення ряду допоміжних завдань.

Першим допоміжне завдання – аналіз трибологічних процесів, що відбуваються у підшипникових вузлах суднових дизелів.

Друге допоміжне завдання – аналіз зміни експлуатаційних характеристик моторного мастила під час експлуатації суднових дизелів та їх циркуляційних систем.

Третє допоміжним завданням – дослідження процесу підтримання експлуатаційних характеристик моторних мастил.

При вирішенні кожного допоміжного завдання отримані відповідні наукові результати, а саме:

1) визначенні основні характеристики при контактній взаємодії поверхонь, що розділені мастильним матеріалом з анізотропними характеристиками;

2) визначено діапазону стратифікації в'язкості мастильного матеріалу при нанесенні зсувних навантажень;

3) визначено оптимальний час поповнення циркуляційної системи та оптимальної концентрації поверхнево-активних присадок.

Рішення головного завдання дослідження здійснено шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань.

2.3. Системний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження

У науковій літературі пропонуються різні визначення поняття «система». Найбільш просте визначення складної системи приведено в роботі [31], в якій система вважається складною, якщо вона складається з великого числа взаємопов'язаних і взаємодіючих між собою елементів. Для технічних систем більш прийнятна і зрозуміла трактування, запропонована в роботі [32]. Її зміст зводиться до того, що будь-яку систему можна описати або як деякий перетворення вхідних впливів у вихідні величини, або з позиції досягнення певної мети. А.В. Козьмініх для технічних систем СЕУ запропонував наступне формулювання: «Системою називається сукупність елементів і зв'язків, що перетворюють вхідні впливу у вихідні величини для досягнення певної мети» [33].

Судновий дизель являє собою складну динамічну багатокomпонентну систему, яка складається з великої кількості функціонально самостійних елементів - підсистем. Для суднового дизеля в якості таких підсистем можуть бути визначені наступні: робочий цикл в циліндрі дизеля, процес подачі і згоряння палива, процес змащування деталей ЦПГ і підшипників КШМ, процес відведення теплоти з зон тертя. Незважаючи на різноманітність елементів і їх функціонального призначення загальною ознакою названих підсистем є те, що їх взаємодія здійснюється через робоче тіло, в якості якого виступає ММ. Воно є системо утворюючим процесом, що зв'язує між собою різні функціональні частини ДВЗ.

З огляду на фундаментальні принципи системного аналізу [67], замкнутий цикл наукового дослідження системно представлений у вигляді технологічної карти дослідження, наведеної на рис. 2.1.

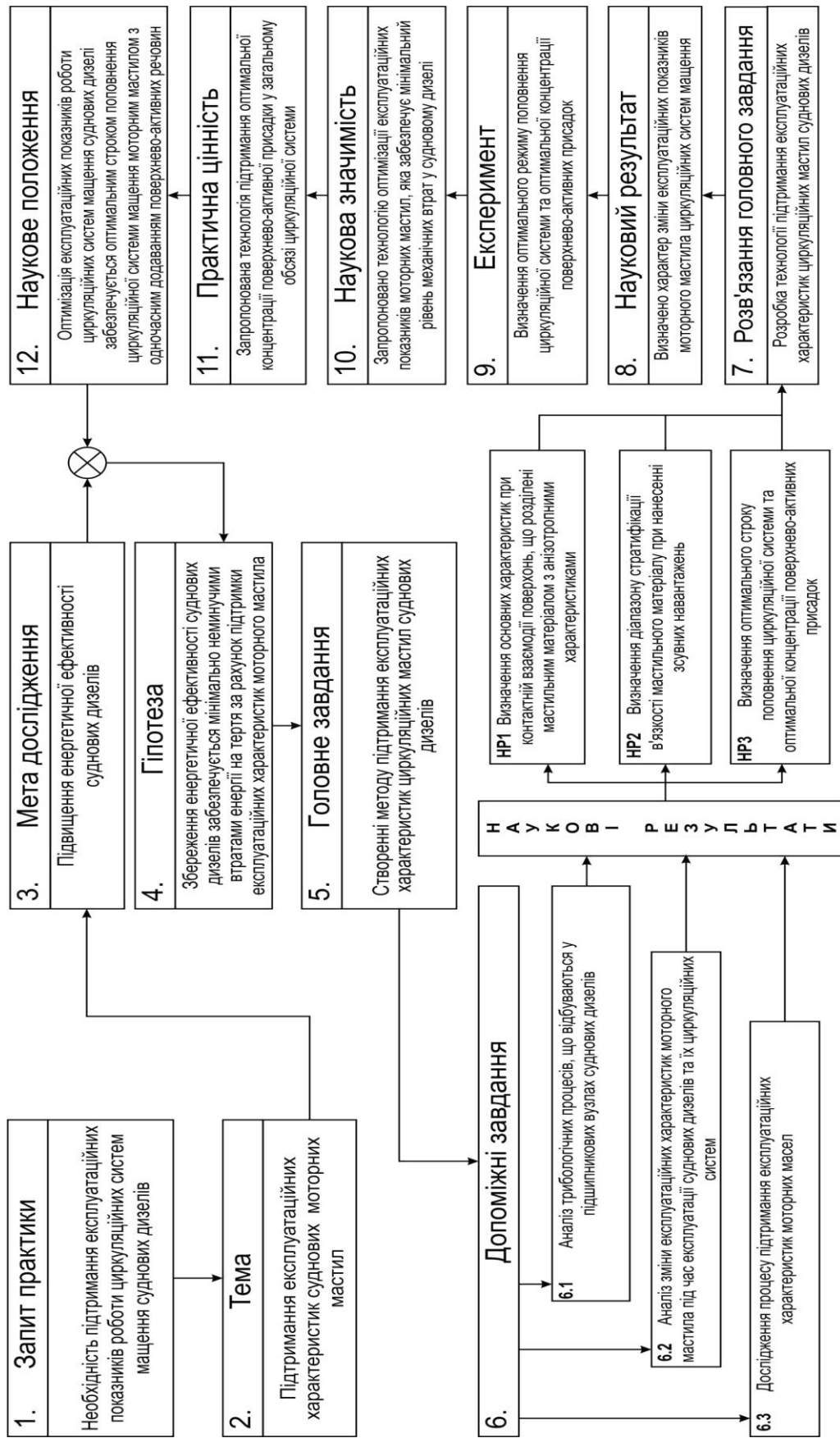


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

Тема магістерського дослідження формується на основі «запиту практики» про необхідність підтримання експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів.

Тезою вирішення головного завдання є науковий прогноз про те, що оптимізацію експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів найбільш раціонально здійснювати за допомогою оптимального доливання мастила в систему і застосування поверхнево-активних речовин.

Основні експериментальні дослідження, виконані в роботі, проводились в лабораторних і виробничих умовах.

Наукова значимість магістерського дослідження полягає в тому, що запропоновано технологію оптимізації експлуатаційних показників моторних мастил, яка забезпечує мінімальний рівень механічних втрат у судовому дизелі

Практична цінність дослідження полягає в тому, що запропонована технологія підтримання оптимальної концентрації поверхнево-активної присадки у загальному обсязі циркуляційної системи.

Наукове положення, що сформульовано під час магістерського дослідження є наступне – оптимізація експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів забезпечується оптимальним строком поповнення циркуляційної системи мащення моторним мастилом з одночасним додаванням поверхнево-активних речовин

Об'єктом дослідження обрано процес мащення підшипників вузлів суднових дизелів.

Предметом дослідження є експлуатаційні характеристики моторного мастила суднових дизелів.

2.4. Висновки по розділу 2

1. В результаті вибору теми магістерського дослідження за ознаками актуальності, наукової новизни, практичної значущості, відповідно спеціальності сформульована тема, спрямована на збереження енергетичної ефективності суднових дизелів за рахунок поновлення реологічних характеристик мастильного матеріалу, який використовується в їх системах змащування.

2. Метою дослідження є збереження енергетичної ефективності суднових дизелів. За результатами методу експертних оцінок, найбільш оптимальним і доцільним варіантом досягнення поставленої мети дослідження визнаний спосіб поновлення реологічних характеристик моторних мастил, що використовуються в системах циркуляційного змащення.

3. Головне завдання магістерського дослідження полягає в розробці методу поновлення реологічних характеристик моторного мастила суднових дизелів.

4. Рішення головного завдання дослідження здійснено шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань. На базі системного підходу замкнутий цикл наукового дослідження представлений у вигляді технологічної карти дослідження.

3. АНАЛІЗ КОНТАКТНИХ ВЗАЄМОДІЙ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

3.1. Математична модель процесу поширення енергії під час контактної взаємодії твердих тіл, розділених анізотропним мастильним матеріалом

Контактні вузли суднових дизелів, у яких відбувається обертальний рух, є одними з найпоширеніших елементів дизеля. Передусім до них відносяться такі пари тертя: вал – вкладиш підшипника (рамового або шатунного) і поршневий палець – головка шатуна. Мінімально неминучі втрати, що виникають під час перетворення потенційної енергії палива на корисну роботу і обертальний рух споживачів енергії, залежать від контактних взаємодій, що відбуваються в цих парах тертя (трибологічних системах). Причому якісні і кількісні показники процесу енергоперетворення змінюються в залежності від характеристик мастильного матеріалу, який є складовою частиною цих трибологічних систем.

Розглянемо два тіла A і B , які стикаються в одній точці (рис. 3.1). Введемо дві прямокутні системи координат: одну для тіла A (O, x_1, x_2, x_3) , іншу для тіла B (O, x'_1, x'_2, x'_3) , причому $x_1 = x'_1, x_2 = x'_2, x_3 = x'_3$. Нехай точка дотику знаходиться на початку координат. Рівняння поверхні в точці дотику для тіла A запишемо у вигляді

$$x_3 = \chi_{IJ} x_I x_J, \quad (3.1)$$

де χ_{IJ} – компоненти двовимірного симетричного тензора другого рангу. Вони характеризують кривизну і крутіння, що видно з похідних

$$x_{3,\alpha\beta} = \chi_{\alpha\beta}, \quad x_{3,\alpha\alpha} = \chi_{\alpha\alpha}.$$

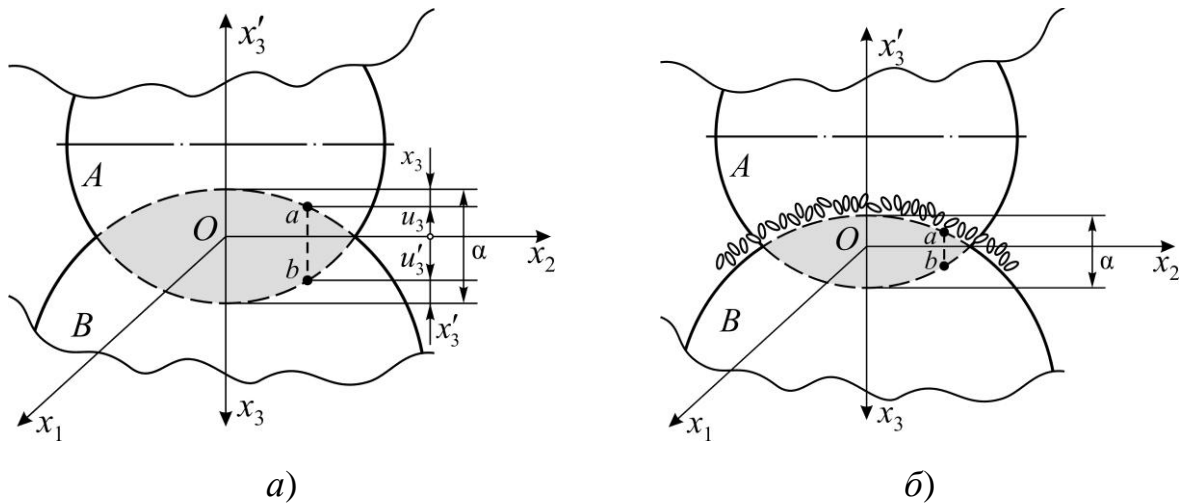


Рис. 3.1. Модель зближення двох тіл при їх контактній взаємодії:
 а) у разі безпосереднього контакту; б) у разі поділу поверхонь шаром
 анізотропного мастильного матеріалу

Аналогічно (3.1) для тіла B маємо

$$x'_3 = \chi'_{ij} x'_i x'_j. \quad (3.2)$$

Припустимо, що обидва тіла стискаються силами P , в результаті чого вони зближуються на величину α . Під визначенням «зближення» розуміється відстань між вершинами A і B , якщо б вони вільно входили одна в одну при контактній взаємодії (рис. 3.1). Насправді такого не відбувається. Точки a і b , які до контакту лежали на одній вертикалі і належали тілам A і B відповідно, після контакту зіллються [34].

З рис. 3.1 видно, що для вертикальних координат точок a і b і їх переміщень справедлива рівність

$$(x_3 + u_3) + (x'_3 + u'_3) = \alpha. \quad (3.3)$$

Зрозуміло, у тих точках, де поверхні не стикаються, правильна нерівність

$$(x_3 + u_3) + (x'_3 + u'_3) > \alpha.$$

Отже, рівність (3.3) справедлива тільки в дільниці контакту тіл A і B . Підставленнями (3.1) і (3.2) у рівність (3.2) отримаємо

$$(\chi_{ij} + \chi'_{ij})x_i x_j + u_3 + u'_3 = \alpha. \quad (3.4)$$

Тензор з компонентами $\chi_{ij} + \chi'_{ij}$ симетричний, тому його можна привести до головних осей. Нехай χ_1, χ_2 – головні значення цього тензора (головні кривизни). Тоді рівняння (3.4) запишеться у вигляді

$$u_3 + u'_3 = \alpha - \chi_1 x_1^2. \quad (3.5)$$

Для підрахунку переміщень u_3 і u'_3 скористаємося розв'язанням завдання Буссінеска для зосередженої сили P , докладеної в точці $(\xi_1, \xi_2, 0)$

$$u_3 = \frac{P(1+\nu)}{2\pi E} \left[\frac{x_3^2}{r^3} + \frac{2(1-\nu)}{r} \right],$$

де

$$r = \sqrt{(x_1 - \xi_1)(x_1 - \xi_1) + x_3^2};$$

ν – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль Юнга [35].

На площині $x_3=0$ маємо

$$u_3 = \frac{1-\nu^2}{\pi E} \frac{P}{\rho}, \quad (3.6)$$

де

$$\rho = \sqrt{(x_I - \xi_I)(x_J - \xi_J)}.$$

З огляду на принцип суперпозиції, можна зосереджену силу P щодо входить до (3.6) замінити щільністю $p(\xi_1, \xi_2)$ сил, розподілених по ділянці контакту Σ :

$$\rho P = \int_{\Sigma} p(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2. \quad (3.7)$$

Тоді з (3.6) маємо

$$u_3 = \frac{1-\nu^2}{\pi E} \int_{\Sigma} \frac{p(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2}{\rho}, \quad (3.8)$$

$$u'_3 = \frac{1-\nu'^2}{\pi E'} \int_{\Sigma} \frac{p(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2}{\rho}, \quad (3.9)$$

де коефіцієнт Пуассона ν і модуль Юнга E відносяться до тіла A , а ν' і E' – до тіла B .

Підставляючи вирази (3.8), (3.9) в (3.5) отримаємо

$$\frac{C}{\pi} \int_{\Sigma} \frac{p(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2}{\rho} = \alpha - \chi_I x_I^2, \quad (3.10)$$

де введена константа C , що має розмірність пружної піддатливості:

$$C = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu'^2}{E'}.$$

Рівняння (3.10) можна порівняти з відомим у теорії потенціалу [206] тотожністю

$$\int_S \frac{\sqrt{1 - \frac{x_i^2}{\alpha_i^2}}}{\rho(x_1, x_2, \xi_1, \xi_2)} d\xi_1 d\xi_2 = \frac{\pi a_1 a_2}{2} \int_0^\infty \frac{\left(1 - \frac{x_i^2}{\alpha_i^2 + \xi}\right) d\xi}{\sqrt{\xi(a_1^2 + \xi)(a_2^2 + \xi)}}, \quad (3.11)$$

де S – еліпс з півосями a_1 і a_2 :

$$\frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{x_2^2}{a_2^2} = 1, \quad \left(\frac{x_i^2}{\alpha_i^2} = 1 \right).$$

Якщо допустити, що ділянка контакту Σ є еліпсом S , то зі співвідношень (3.10) і (3.11) знаходимо

$$p(x_1, x_2) = A \sqrt{1 - \frac{x_i^2}{\alpha_i^2}}, \quad (3.12)$$

де A – деяка константа, яка може бути визначена з (3.7):

$$A \int_S \sqrt{1 - \frac{x_i^2}{\alpha_i^2}} dx_1 dx_2 = P.$$

Звідси

$$A = \frac{3P}{2\pi a_1 a_2}. \quad (3.13)$$

Підставляючи (3.13) в (3.12), отримаємо розподіл контактного тиску за площею ділянки зіткнення тіл A і B :

$$p(x_1, x_2) = \frac{3P}{2\pi a_1 a_2} \sqrt{1 - \frac{x_i^2}{\alpha_i^2}}. \quad (3.14)$$

Підставивши (3.14) в (3.10)

$$\frac{C}{\pi} \frac{3P}{2\pi a_1 a_2} \int_S \frac{\sqrt{1 - \frac{\xi_1^2}{a_1^2}}}{\rho} d\xi_1 d\xi_2 = \alpha - \chi_i x_i^2, \quad (3.15)$$

порівняємо тепер праві частини (3.15) і (3.11).

Шляхом підставлення (3.14) в (3.10) можливо знайти вираз для зближення α

$$\alpha = \frac{3}{4} \frac{CPJ_3}{\pi a_1},$$

де величина J_3 знаходиться з виразу

$$J_3 = \int_0^{\infty} \frac{\lambda d\eta}{\sqrt{\eta(1+\eta)(1+\lambda^2\eta)}},$$

в котрому $\lambda = a_1/a_2$ – відношення півосей еліпса S , а $\eta = \xi/a_1^2$.

Результат розв'язання задачі Герца можна застосувати до розрахунку дотикання твердих тіл, розділених в'язкопружною рідиною (рис. 3.1, б). Нехай у деякий момент часу $t=0$ є дотичними два тіла A і B з масами m і m' відповідно. На майданчику контакту виникає розподілене зусилля p . Позначимо сумарну силу взаємодії зударних тіл через $P(t)$.

За теоремою про зміну кількості руху маємо

$$\frac{d}{dt} \left(M \frac{d\alpha}{dt} \right) = -P, \quad (3.16)$$

де M – приведена маса,

$$M = \frac{mm'}{m+m'}.$$

Згідно із задачею Герца, P пов'язане з α за формулою

$$\alpha = kP^{2/3}, \quad (3.17)$$

де k – деякий розмірний коефіцієнт [36].

Підставляючи (3.17) у (3.16), отримаємо

$$\ddot{\alpha} = -B\alpha^{3/2}, \quad (3.18)$$

де $B = 1/(Mk^{3/2})$.

Рівняння (3.18) легко інтегрується після домноження його лівої і правої частини на $\dot{\alpha}$. Оскільки $\dot{\alpha}\ddot{\alpha} \equiv (d/dt)(\dot{\alpha}^2/2)$, то після інтегрування отримаємо

$$\frac{1}{2}(\dot{\alpha}^2 + c) = -\frac{2}{5}B\alpha^{5/2}. \quad (3.19)$$

Але центри тіл A і B у момент часу $t=0$, тобто коли $\alpha=0$, зближуються з відомою швидкістю V . Отже,

$$\frac{1}{2}(V + c) = 0. \quad (3.20)$$

З (3.20) знаходимо постійну інтегрування c і підставляємо її в (3.19)

$$\frac{1}{2}(\dot{\alpha}^2 - V^2) = -\frac{2}{5}B\alpha^{5/2}. \quad (3.21)$$

У момент найбільшого зближення (у кінці фази) швидкість зближення $\dot{\alpha}$ дорівнює нулю. Тому

$$\frac{1}{2}(\dot{\alpha}^2 - V^2) = -\frac{2}{5}B\alpha^{5/2}.$$

Тепер можливо визначити найбільше значення сили взаємодії (а, відповідно, і неминучих втрат енергії) за формулою (3.17), а потім і розміри ділянки контакту.

Оскільки дотик поверхонь можна уявити у вигляді абсолютно пружного удару, то після максимального тиску відбувається його падіння, і вся картина повторюється в зворотному напрямку за часом [37]. Знайдемо повний час контакту t_k , який еквівалентний часу зіткнення. Для цього вирішимо диференціальне рівняння (3.21), яке після поділу змінних запишемо у вигляді

$$\frac{d\alpha}{\sqrt{V^2 - \frac{4}{5}B\alpha^{5/2}}} = dt. \quad (3.22)$$

Інтегруючи (3.22), отримаємо

$$t_k = 2 \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{d\alpha}{\sqrt{V^2 - \frac{4}{5}B\alpha^{5/2}}},$$

або після заміни змінної $\alpha = \alpha_{\max} \varphi$

$$t_k = \frac{2\alpha_{\max}}{V} \int_0^1 \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \varphi^{5/2}}}.$$

З огляду на кінцеві значення V і α_{\max} можна зробити висновок, що використання мастильного матеріалу з анізотропними властивостями граничного мастильного шару сприяє зниженню часу контакту, а, отже, і мінімально неминучих втрат енергії.

3.2. Трибологічні явища, що відбуваються в системі вал-мастильний шар-вкладень підшипника суднових дизелів

Незважаючи на прагнення забезпечити гідродинамічний режим змащення при роботі підшипників ковзання суднових дизелів, процес змащування цих вузлів відбувається в умовах граничного тертя. Це обумовлюється рядом причин, основна з яких – мінімізація зазору в парі тертя вал-вкладень для забезпечення її стійкої роботи. Крім того, в процесі експлуатації на поверхнях названої пари відбуваються утворення оксидів і відкладення нагару, що також сприяє зменшенню зазору і переходу з гідродинамічного в режим змішаного і граничного тертя.

Система вал-мастильний шар-вкладень підшипника суднового СОД відноситься до стандартної трибологічної системі (ТС), що складається з двох металевих деталей, розділених між собою шаром мастильного матеріалу. Таку систему характеризують: склад (деталі і властивості деталей системи); внутрішні зв'язки (зв'язки між деталями системи); зовнішні зв'язки (вхід, вихід); функціональні системи (співвідношення вхід-вихід). Основним компонентом системи вал-мастильний шар-вкладень підшипника на який можливо накладати керуючий вплив, є ММ. Його властивості та характеристики визначаються не тільки його власною структурою, а й залежать від впливу металевих поверхонь, які віно поділяє. ММ, що знаходиться в трибо-сполученні вал-вкладень, володіє індивідуальними властивостями, які не змінюються в «базовому» варіанті в незалежності від системи, в якій він знаходиться, і агрегатними властивостями [38-39].

Індивідуальні властивості можна розділити на групи:

- реологічні властивості (в'язкість, індекс в'язкості, пьезокоефіцієнт в'язкості, час релаксації);

- теплові властивості (питома теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт теплового розширення, теплота випаровування і т. д.);
- електричні властивості (питомий опір, діелектрична проникність, коефіцієнт діелектричних втрат);
- оптичні властивості (коефіцієнти заломлення світла, рефракції, абсорбції, дисперсії світла і т. д.);
- інші - властивості, для яких важко знайти якусь загальну назву (густина, стисливість, температура застигання, температура займання, температура кипіння і т. д.).

Відмінною характеристикою ММ, що входить в дану ТС, є його здатність утворювати структурно впорядковані граничні мастильні шари, що володіють властивостями рідких кристалів. При цьому відбувається відміна деяких індивідуальних властивостей тонких шарів рідини від аналогічних властивостей у великому обсязі [40].

3.3. Реологічні характеристики мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні тертя підшипників кривошипно-шатунного механізму судових дизелів

Реологічна модель мастильного матеріалу, що знаходиться в зазорі вал-вкладень підшипника, може бути представлена «подвійним» плином на різних фазах розділу: вал-граничний шар, граничний шар-об'ємна рідина-граничний шар, граничний шар-вкладень підшипника. По лінії граничний мастильний шар-об'ємна рідина відбувається розрив в структурі мастильного матеріалу і перехід течії з ньютонівської рідини в неньютонівську (рис. 3.2).

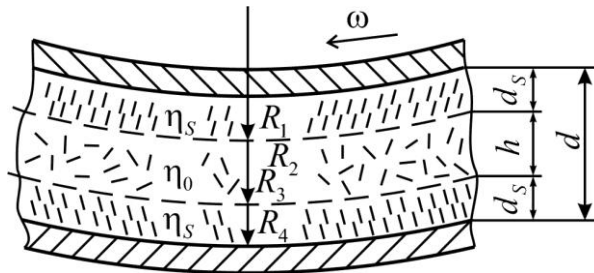


Рис. 3.2. Реологічна модель мастильного матеріалу, що знаходиться в зазорі вал - вкладень підшипника

На рис. 3.2: ω – частота обертання;

η_s – в'язкість граничного мастильного шару;

η_0 – «об'ємна» в'язкість;

d_s – товщина граничного мастильного шару;

d – загальна товщина шару мастила;

h – товщина «об'ємного» шару мастила;

R_1, R_2, R_3, R_4 – радіуси кордонів розділу зон течії метал-граничний мастильний шар, граничний мастильний шар-об'ємна рідина; об'ємна рідина-граничний мастильний шар; граничний мастильний шар-метал

3.4. Моделювання процесів зміни реологічних характеристик суднових моторних мастил

При експлуатації ММ в дизелі відбувається зміна його фізичних і хімічних властивостей. Крім того, при цьому змінюються його експлуатаційні та реологічні характеристики, і в першу чергу в'язкість [41].

Більшість дисперсних систем має аномальний характер в'язкості, тобто вони не підкоряються закону Ньютона для так званих істинно-в'язких (ньютоновських) рідин. В'язкість таких систем є функцією напруги або зсуву.

Основною причиною аномальної в'язкості є просторова структура, що виникає при взаємодії частинок дисперсної фази між собою. За своїм реологічними властивостями структуровані системи займають проміжне положення між рідинами і твердими тілами і мають властивості рідких кристалів. До подібних систем можна віднести структуровані тонкі шари мастильного матеріалу, що знаходиться у вузькому зазорі металевих пар тертя втулка-поршень і особливо вал-вкладень.

Неодноразово зазначалося, що характеристики тонких мастильних шарів, що утворюються в умовах граничного тертя, залежать не тільки від структурного стану мастила, але і від дії твердої підкладки, поблизу якої вони знаходяться [42, 43].

Утворення поблизу твердої поверхні (особливо металевої) структурованих рідкокристалічних шарів з анізотричною формою молекул призводить до помітної відмінності фізичних властивостей тонких прошарків рідини від їх властивостей в «об'ємній» фазі [44]. Помітна структурна неоднорідність граничних мастильних шарів, визначаючи неньютонівської характер в'язкої течії, значним чином впливає на дисипативні властивості мастильного матеріалу, особливо в трібо-вузлах, що працюють в режимі граничного і змішаного тертя.

Визначальним фактором при моделюванні є напруження зсуву, яке відчуває ММ в зазорі пари тертя вал-вкладень, і товщина масляного шару в цьому зазорі. При цьому основним вимірюваним параметром є в'язкість ММ. Реологічні характеристики ММ визначалися при товщині мастильного шару 20 мкм, величина якого відповідала експлуатаційного зазору в парі тертя вал-вкладень підшипника.

Дослідження проводилися для моторних мастил MLC30 і HLX40 фірми Castrol, основні характеристики яких наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Основні характеристики моторних мастил, що використовуються під час проведення експерименту

Параметр, розмірність	Марки моторного мастила	
	MLC30, Castrol	HLX40, Castrol
Густина, кг/м ³	897	915
Кінематична в'язкість при 40°C, сСт	107	112
Кінематична в'язкість при 100°C, сСт	11,5	14,8
Загальне лужне число, мгКОН/г	12	15
Клас SAE	30	40

Таблиця 3.2. Основні характеристики суднових дизелів, що використовуються в експериментах

Параметр, розмірність	Марки суднового дизеля	
	S6A2 Mitsubishi	6LF58 Hanshin
Діаметр циліндра, мм	160	580
Максимальний тиск згоряння, МПа	10,5	10,8
Частота обертання колінчастого вала, об/хв	750	180
Діаметр колінчастого вала, мм	110	420
Ширина рамового підшипника, мм	85	230

Моторне мастило MLC30 використовувалося в циркуляційній системі суднового СОД S6A2 фірми Mitsubishi, моторне мастило HLX40 в циркуляційній системі суднового дизеля 6LF58 Hanshin. Основні характеристики зазначених дизелів, необхідні для визначення зсувних навантажень в парі вал-вкладень, наведені в табл. 3.2.

Схема подачі мастильного матеріалу до основних вузлів дизеля показана на рис. 3.3. Подачу мастила до вузлів тертя дизеля 1 забезпечують два масляних насоса 5 і 6, один з яких є навішеним. Мастило до насосів надходить з стічно-циркуляційної цистерни 2 через магнітний фільтр 4. В залежності від положення перепускного клапана 8 мастило може або

повертатися в систему, або направлятися до дизелю (через самоочищається фільтр 9 і охолоджувач 3). Температура мастила, що надходить до дизелю, регулюється шляхом зміни положення перепускного клапана 7. Дизель забезпечений автономною системою сепарації мастила, що складається з сепаратора 13, підігрівача 12 і насоса 11. Мастило в систему сепарації поступає через фільтр 10.

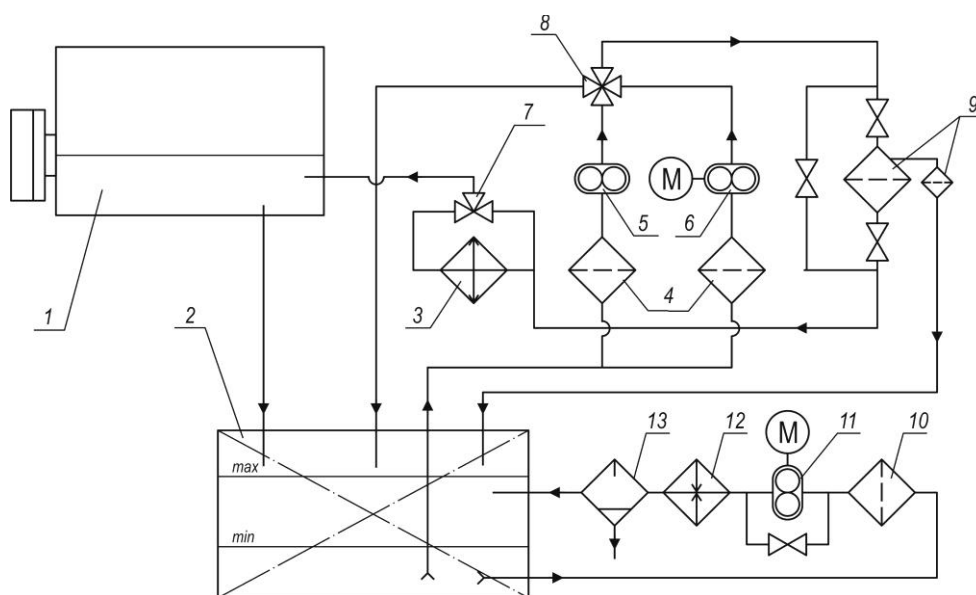


Рис. 3.3. Система змащення суднового дизеля S6A2 фірми Mitsubishi:

1 - дизель; 2 - стічно-циркуляційна цистерна; 3 - охолоджувач; 4 - магнітний фільтр; 5 - навішені мастильний насос; 6 – мастильний насос з електричним приводом; 7 - перепускний клапан охолоджувача; 8 - перепускний клапан насоса; 9 - самоочищається фільтр; 10 - фільтр; 11 - насос сепаратора; 12 - підігрівач; 13 - сепаратор

Результати вимірювань об'ємної в'язкості, а також в'язкості граничного мастильного шару при різній швидкості зсуву наведені в таблиці 3.3 і проілюстровані на рис. 3.4.

Таблиця 3.3. Результати реологічних випробувань судових мастил

Тип мастильного матеріалу і його характеристика		Швидкість зсуву, γ', c^{-1}					
		0	25	50	75	100	125
Масило MLC30	Об'ємна в'язкість, $\nu_{об}, \text{cСт}$	107					
	В'язкість граничного мастильного шару, $\nu_{гр}, \text{cСт}$	118	103	101	98	94	93
Масило HLX40	Об'ємна в'язкість, $\nu_{об}, \text{cСт}$	112					
	В'язкість граничного мастильного шару, $\nu_{гр}, \text{cСт}$	124	114	109	107	106	105

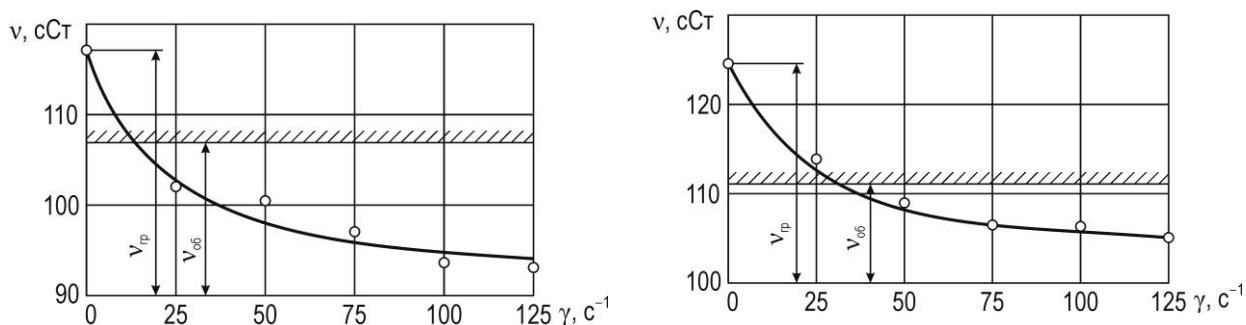


Рис. 3.4. Залежність в'язкості моторного мастила від швидкості зсуву при товщині масляного шару 20 мкм:

а) мастило MLC30 фірми Castrol; б) мастило HLX40 фірми Castrol

Слід зазначити, що при відсутності зсувних навантажень, а також при початковому русі контактируємих 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 мають навішені масляні насоси, які в початковий період роботи дизеля ще не здатні створити необхідний тиск мастила в трибо-сполучень [45, 46].

3.5. Висновки за розділом 3

Як основні висновки, що отримані в розділі 3, зазначимо таке.

1. В'язкість моторного мастила, що знаходиться у вузькому зазорі пари тертя вал-вкладень підшипника і забезпечує граничний режим тертя, залежить від швидкості зсуву, тобто проявляє «неньютонівської» характер течії.

2. Зростання швидкості зсуву призводить до зменшення в'язкості граничного мастильного шару.

3. Для моторного мастила необхідно розрізнити в'язкість в великому обсязі $\nu_{об}$ («об'ємну» в'язкість) і в'язкість в граничному змащувальному шарі $\nu_{гр}$ («граничну» в'язкість), яка має більше значення, що пояснюється виникненням орієнтаційної впорядкованості молекул в граничному змащувальному шарі.

4. Реологічні властивості мастильного матеріалу, що знаходиться в зазорі вал-вкладень підшипника, необхідно розглядати як подвійну течію на різних фазах розділу: вал-граничний шар, граничний шар-об'ємна рідина-граничний шар, граничний шар-вкладень підшипника. По лінії граничний мастильний шар-об'ємна рідина відбувається розрив в структурі мастильного матеріалу і перехід течії з ньютонівської рідини в неньютонівської.

4. ПІДТРИМАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ МОТОРНИХ МАСТИЛ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

4.1. Зміна енергетичних і теплових потоків у наносистемах, що утворені впорядкованим шаром мастильного матеріалу

Розв'язання прикладних завдань граничного тертя та граничного мащення, реалізованих для теплових двигунів різних засобів транспорту, започаткувало можливість цілеспрямовано створювати впорядковані структури і управляти властивостями речовин «знизу вгору», починаючи з атомного рівня, а також проектувати нанорозмірні інструменти, механізми і пристрої для перетворення енергії з метою розвитку нанотехнології.

Визначення нанорозмірної і макроскопічної термодинамічних систем дуже схожі. У термодинаміці системою називають будь-яку повністю замкнуту просторову область з чітко вираженою кордоном. Отже, все, що знаходиться поза системою, розглядається як навколишнє середовище. Межа може бути жорстко закріпленою або рухомою, непроникною, або через неї можна переносити масу речовин і передавати роботу [47].

У будь-якій даній ситуації система може визначатися кількома способами. У разі трансформації енергії у напрямку потенційна енергія палива → кінетична енергія КШМ (поступальний рух) → кінетична енергія колінчастого вала і приєднаних мас (обертальний рух підшипників колінчастого вала, а також обертальний рух розподільного вала і поступальний рух плунжерів ПНВТ) → корисна робота споживачів енергії (гвинта або генератора), в якості нанорозмірної системи може бути прийнятий мастильний матеріал (мастило або паливо), що забезпечує процес енергоперетворення. У даному випадку наносистема є рухомою (у зв'язку з тим, що в ній відбувається переміщення структурованих шарів мастила або

палива), проникною (тому що в ній відбувається постійний обмін мастильним матеріалом), а її структура забезпечує процес енергоперетворення з мінімально допустимими незворотними втратами.

Стан наносистеми відноситься до важливих понять термодинаміки і визначається як повний набір усіх її властивостей, які можуть змінюватися під час перебігу різних конкретних процесів, зокрема в разі трансформації потоку енергії через структурований шар мастильного матеріалу. Властивості, що становлять цей набір, залежать від характеру взаємодій як усередині самої системи, так і між системою та її оточенням. Для розглянутих у попередніх розділах трибологічних систем втулка циліндра – мастильний шар – поршневі кільця, колінчастий вал – мастильний шар – вкладиш підшипника і плунжер – мастильний шар – втулка ПНВТ, зміна енергетичних і теплових потоків залежить від виду мащення (граничне або гідродинамічне) і від стану мастильного матеріалу (ньютонівського або неньютонівського) [48].

Загальновідомо, що енергія – це міра сукупності витрачених зусиль і вироблених результатів. У випадку макроскопічних систем енергія розглянутої системи зазвичай визначається як «здатність здійснювати роботу». На макроскопічному рівні в більшості випадків таке визначення енергії є цілком адекватним, але для наносистем дане визначення не є достатньо обґрунтованим, оскільки термін «робота» вимагає більш точного формулювання, ніж визначення для макроскопічних систем. З точки зору термодинаміки малих систем, можливо, більш відповідним визначенням енергії буде «здатність викликати зміну стану системи, помітного на нанорівні».

У загальному вигляді робота, що являє собою спосіб перенесення енергії між системою та її оточенням, визначається як добуток рушійної сили і пов'язаного з нею зміщення (узагальненої координати). За даної трансформації потенційної енергії палива в корисну роботу споживача,

наносистемами є структурований упорядкований мастильний шар, а оточенням наносистеми – КШМ, колінчастий вал, плунжер ПНВТ. Рушійна сила викликає і контролює напрямок зміни потоків енергії, що є властивістю системи. В одному із способів і рушійна сила, і зміщення відносяться до характеристик системи і локалізовані повністю всередині неї, так що енергія, яка обчислюється за їх добутком, виражає зміну внутрішньої енергії системи. У даному випадку зрушення міжмолекулярних шарів відбувається за рахунок зміни тиску в об'ємі мастильного матеріалу і циркуляції в наносистемі мастильного матеріалу. В іншому способі зміщення може відбуватися всередині системи, а рушійна сила, що його викликає, бути параметром навколишнього середовища і ззовні впливати на систему. У даному варіанті зрушення міжмолекулярних шарів відбувається за рахунок інерційного впливу на наносистеми обертових або переміщуваних деталей дизеля. У подібний спосіб як рушійна сила, так і викликане нею зміщення, можуть бути повністю локалізовані в межах навколишнього середовища. Тому в обох цих випадках обчислювана енергія являє собою зміну загальної енергії системи, тобто суми її внутрішньої, кінетичної і потенційної енергій [48].

Теплота являє собою інший спосіб обміну енергією між системою та її оточенням через кордон системи. Різниця між теплотою і роботою в тому, що передача енергії за допомогою теплоти відбувається при випадковій трансляції, обертанні і коливанні атомів і молекул на межі системи без помітних змін стану системи на нанорівні.

За визначенням, межа системи – це просторовий шар нульової товщини, в якому не міститься жодної речовини взагалі. Під час будь-яких термодинамічних розрахунків завжди важливо проводити ретельну відмінність між енергетичними змінами всередині системи і поняттями роботи і теплоти, які є способами обміну енергією між системою та її оточенням.

Недавні розробки нанонауки і нанотехнології сприяли поширенню термодинаміки і статистичної механіки на малі системи, що складаються з обчислюваної кількості частинок, які нижче рівня, що допускає існування термодинамічної межі.

Дослідження і розробка таких проблем, як взаємозв'язок між властивостями і фазові переходи в малих (нано) системах, можливі за умови, якщо будуть виведені робочі формули структурних термодинаміки і статистичної механіки малих систем [48, 49].

4.2. Розробка технології підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил циркуляційних систем мащення суднових дизелів під час обертального руху у вузлах тертя

З цілого ряду методів з підтримання експлуатаційних характеристик моторних мастил найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору) є використання оптимального доливання мастила в систему і застосування поверхнево активних речовин [45].

4.2.1. Підтримання експлуатаційних показників моторного мастила за рахунок оптимального доливання мастила в систему

Під час експлуатації ДВЗ морських і річкових суден здійснюється безперервний і періодичний контроль не тільки показників, що характеризують робочий цикл дизеля (тиску і температури в характерних точках, частоти обертання, потужності, температури випускних газів), але

також експлуатаційних і реологічних характеристик ММ. Найпростішим, а тому і найпоширенішим способом оптимізації експлуатаційних характеристик ММ є їх очищення (шляхом частково- або повно-проточної фільтрації і сепарації), а також додавання в обсяг ММ, яке вже знаходиться в мастильній системі, свіжого масла (як чистого, так і зі спеціальними присадками).

У зв'язку зі збільшенням тиску і температури циклу, підвищенням крутного моменту, зміною конструкції, ускладненням умов експлуатації, підвищенням часу роботи сучасних дизелів на максимальних навантаженнях умови роботи мастил як у лубрикаторних, так і в циркуляційних системах мащення стали більш жорсткими. Водночас, терміни заміни мастил безперервно збільшуються завдяки поліпшенню їх експлуатаційних властивостей. Передчасна заміна мастил економічно недоцільна, оскільки збільшуються їх витрата, витрати на технічне обслуговування, запасні частини і т.і. З іншого боку, збільшення терміну служби мастил призводить до підвищеного зносу деталей дизеля, що знижує його надійність, збільшує відмови в роботі, сприяє підвищенню незворотних втрат енергії. Визначення оптимальної періодичності заміни мастил є трудомісткою тривалою роботою, спочатку визначається заводом-виробником, коригується за результатами експлуатації та тягне за собою фінансові та експлуатаційні витрати. Тому актуальним є розв'язання завдання відновлення реологічних характеристик мастила в процесі його роботи [50].

Періодичне додавання мастила в процесі експлуатації частково відновлює його первинні властивості, перш за все це відноситься до таких параметрів, як в'язкість, кислотне число, температура спалаху. Однак, незважаючи на можливу оптимізацію експлуатаційних характеристик, через певний час моторне мастило підлягає повній заміні. Періодичність такої заміни залежить від властивостей і характеристик мастила; типу, технічного стану і умов експлуатації дизеля; технічного стану всіх компонентів системи

мащення; способу фільтрації мастила; використовуваного палива та інших чинників. Необхідність повної заміни зумовлена втратою основних експлуатаційних якостей мастила, тобто його старінням.

Періодичність заміни мастил встановлюють на основі ретельного вивчення експлуатаційних властивостей мастил і їх зміни в процесі експлуатації. Повна заміна мастила в судових умовах вимагає виведення двигуна з експлуатації, причому цей період включає не тільки саму процедуру заміни мастила, але й очищення поверхонь тертя від експлуатаційних забруднень. Виконання цього завдання для головних двигунів відбувається під час стоянки судна і може бути заздалегідь сплановано з урахуванням рейсового завдання, характеристик вантажу і майбутніх вантажних операцій. У зв'язку з постійною зміною навантаження судової електростанції, для дизелів, що виконують функції допоміжних, тривалість виведення з експлуатації спрогнозувати досить важко [51]. Тому для їх мастильних систем найбільш ефективним є процес періодичного доливання мастила [52].

Дослідження виконувалися для судового моторного мастила фірми Castrol TPL 203 з наступними основними характеристиками:

- клас в'язкості по SAE – 30,
- густина при 15°C – 920 кг/м³;
- в'язкість при 40°C – 102 сСт;
- лужне число – 20 мгКОН/г;
- призначення – забезпечення мащення ЦПГ і КШМ тронкових двигунів під час їх роботи на важкому паливі.

Мастило Castrol TPL 203 використовувалося в циркуляційній системі мащення судових дизелів 6EY22AW Yanmar, що мають характеристики:

- тип – чотиритактний;
- число циліндрів – 6 (розташування рядне);
- номінальна потужність – 885 кВт;

- частота обертання – 900 об/хв;
- діаметр циліндра – 220 мм;
- хід поршня – 320 мм.

У табл. 4.1 наведені дані щодо зміни експлуатаційних і реологічних характеристик мастила. Як видно з табл. 4.1, значення всіх параметрів погіршуються і з плином часу наближаються до максимально допустимих бракувальних показників. Таким чином, підтримка регламентованого часу доливання мастила в систему виводить двигун на межу надійної роботи системи, а в критичній ситуації може призвести до аварії. Саме тому виникає необхідність пошуку оптимальних термінів поповнення мастильної системи новим мастилом.

Таблиця 4.1. Зміна експлуатаційних характеристик моторного мастила під час роботи суднового дизеля

Показник	Базове значення	Час експлуатації, годин			
		25	50	75	100
В'язкість (кінематична) при 50°C, сСт	102	109	114	118	121
Реологічна стійкість, %	+10,36	+8,76	+6,38	+5,95	+5,44
Густина при 20°C, кг/м ³	920	897	881	853	846
Кислотне число, мгКОН/г	0,75	0,78	0,8	0,82	0,83

У зв'язку з цим, під час досліджень ставилося завдання раціонального збільшення частоти доливання мастила в систему, яка визначалася шляхом контролю експлуатаційних і реологічних характеристик ММ. Її розв'язання здійснювалося безпосередньо в судових умовах, при цьому допоміжна енергетична установка судна складалася з трьох однотипних дизелів 6EУ22AW фірми Yanmar, які працюють за чотиритактним циклом, що дало можливість проведення паралельних експериментів з різною інтенсивністю поповнення мастила до обсягу циркуляційної системи мащення.

Перший дизель-генератор залишався «контрольним», і зміни в частоті доливання мастила в систему на ньому не проводилися. Таким чином, даний дизель працював 100 годин без поповнення системи мащення. За даний період часу кількість мастила в системі не опускалося нижче граничного рівня, а експлуатація двигуна проводилася з дотриманням усіх вимог, що висуваються.

У систему мащення другого дизель-генератора мастило до верхнього допустимого рівня доливалося через кожні 25 годин роботи. У систему мащення третього – через кожні 10 годин. Результати, отримані під час експерименту, відображені в таблиці 4.2 і наведені на рис. 4.1, на якому зміна параметрів наведена у відсотках.

Наведені результати свідчать про позитивний вплив збільшення інтенсивності доливання мастила в систему мащення на його експлуатаційні характеристики.

Слід також відзначити кращий стан контактуючих поверхонь дизелів, що мають більш інтенсивний долив мастила. Так, під час проведення планових моточищень дизелів було встановлено, що деталі ЦПГ і підшипників руху «експериментальних» дизелів мають менші нагароосідання і шорсткість поверхні ніж «контрольний» дизель, що свідчить про більш якісний процес їх мащення. Таким чином, більш часте поповнення системи мащення не тільки підтримує і відновлює експлуатаційні та реологічні характеристики мастила, але і сприяє більш надійній роботі судових дизелів [53].

Таблиця 4.2. Зміна експлуатаційних характеристик моторного мастила під час проведення експерименту

Показник	Базове значення	Час експлуатації, години			
		25	50	75	100
Інтервал доливання мастила 100 годин					
В'язкість (кінематична) при 50°C, сСт *	102	$\frac{109}{6,86}$	$\frac{109}{11,76}$	$\frac{118}{15,69}$	$\frac{121}{18,63}$
Реологічна стійкість, % **	10,36	$\frac{8,76}{-15,44}$	$\frac{6,38}{-38,42}$	$\frac{5,95}{-42,57}$	$\frac{5,44}{-47,49}$
Густина при 20°C, кг/м ³ **	920	$\frac{897}{-2,5}$	$\frac{881}{-4,24}$	$\frac{853}{-7,28}$	$\frac{844}{-8,24}$
Кислотне число, мгКОН/г *	0,75	$\frac{0,78}{4,00}$	$\frac{0,80}{6,67}$	$\frac{0,83}{10,67}$	$\frac{0,85}{13,33}$
Інтервал доливання мастила 25 годин					
В'язкість (кінематична) при 50°C, сСт *	102	$\frac{108}{5,88}$	$\frac{110}{7,84}$	$\frac{113}{10,78}$	$\frac{114}{11,76}$
Реологічна стійкість, % **	10,36	$\frac{9,32}{-10,04}$	$\frac{7,80}{-24,71}$	$\frac{7,13}{-31,18}$	$\frac{6,72}{-35,14}$
Густина при 20°C, кг/м ³ **	920	$\frac{903}{-1,89}$	$\frac{883}{-4,02}$	$\frac{880}{-4,35}$	$\frac{875}{-4,89}$
Кислотне число, мгКОН/г *	0,75	$\frac{0,77}{2,67}$	$\frac{0,785}{4,67}$	$\frac{0,80}{6,67}$	$\frac{0,82}{9,33}$
Інтервал доливання мастила 10 годин					
В'язкість (кінематична) при 50°C, сСт *	102	$\frac{104}{1,96}$	$\frac{105}{2,94}$	$\frac{105}{2,94}$	$\frac{106}{3,92}$
Реологічна стійкість, % **	10,36	$\frac{9,86}{-4,83}$	$\frac{9,44}{-8,88}$	$\frac{8,83}{-14,77}$	$\frac{8,64}{-16,60}$
Густина при 20°C, кг/м ³ **	920	$\frac{912}{-0,87}$	$\frac{908}{-1,30}$	$\frac{905}{-1,63}$	$\frac{904}{-1,74}$
Кислотне число, мгКОН/г *	0,75	$\frac{0,755}{0,67}$	$\frac{0,76}{1,33}$	$\frac{0,765}{2,00}$	$\frac{0,77}{2,67}$

* – у знаменнику процентна зміна параметра порівнянно з базовим значенням;

** – знак «-» означає зниження параметра порівнянно з базовим значенням.

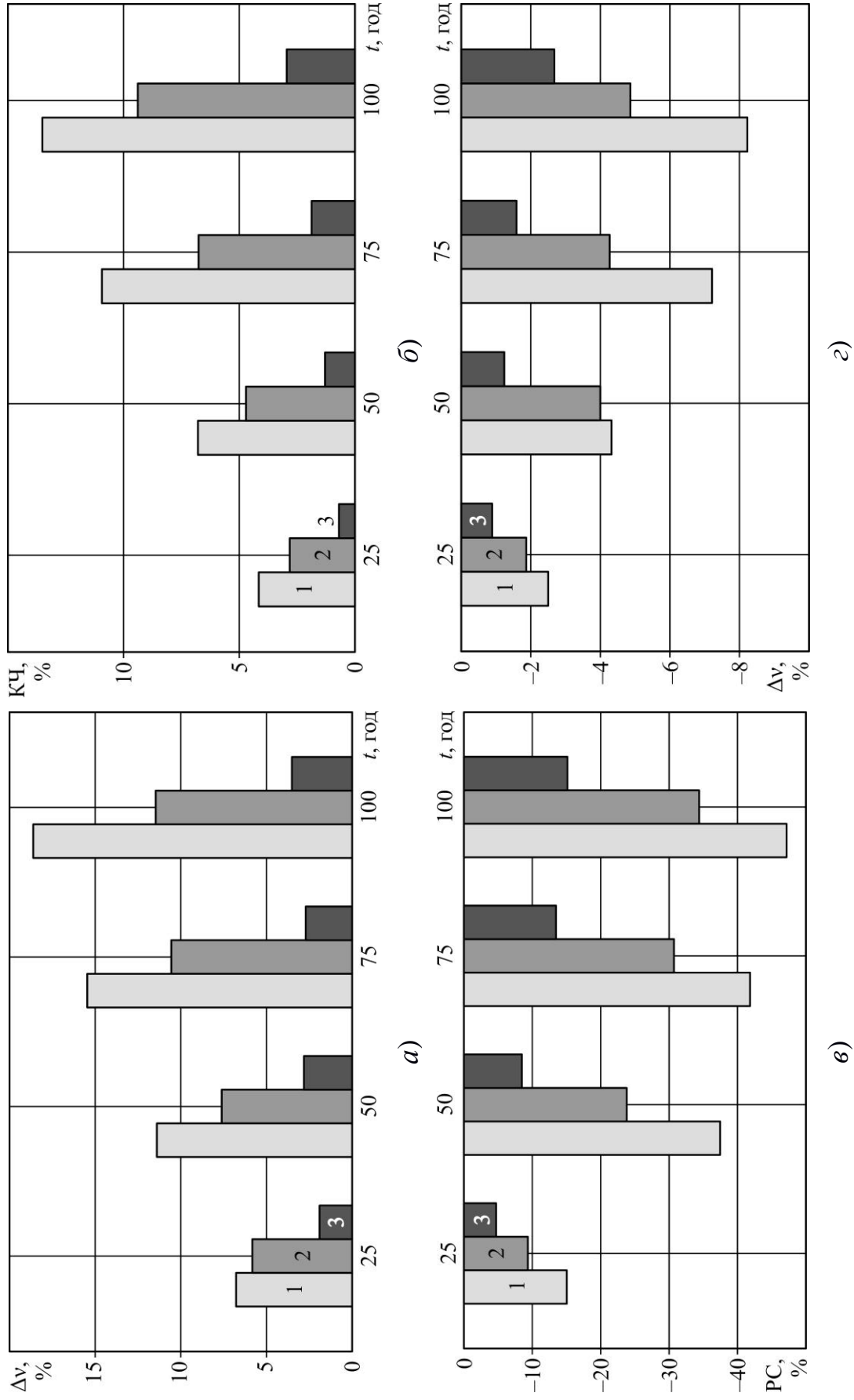


Рис. 4.1. Зміна характеристик ММ під час експлуатації із різною інтенсивністю доливання мастила:

1 – через 100 годин роботи; 2 – через 25 годин роботи; 3 – через 10 годин роботи;

a – в'язкість; *б* – кислотне число; *в* – реологічна стійкість; *г* – густина

4.2.2. Підтримання експлуатаційних показників моторного мастила за рахунок використання поверхнево-активних присадок

Іншим шляхом підтримання експлуатаційних показників моторного мастила є використання поверхнево активних речовин [54].

Для підтвердження висловлених припущень експерименти, викладені в п. 4.2.1, отримали наступне продовження [55]. Випробувалися три дизелі 6EY22AW фірми Yanmar, що входять до складу допоміжної суднової енергетичної установки. Кожен дизель мав свою автономну систему змащення (див. рис. 6.1), що дозволяло здійснювати дослідження його роботи з різними характеристиками мастильного матеріалу. Крім того, умови експлуатації дозволяли зробити одночасну заміну всього мастила, що знаходиться в їхній мастильній системі. Як і в попередній нізці експериментів, дизелі експлуатувалися на рівновеликому навантаженні $(250...750) \pm (15...45)$ кВт за однакову кількість часу 12...15 годин/добу. Технічний стан усіх дизелів був ідентичний. З огляду на дані обмеження, а також об'єм системи мащення і тривалість експерименту, отримані результати адекватно відображають процеси зміни реологічних характеристик моторного мастила і вплив цих змін на мінімально неминучі втрати корисної енергії.

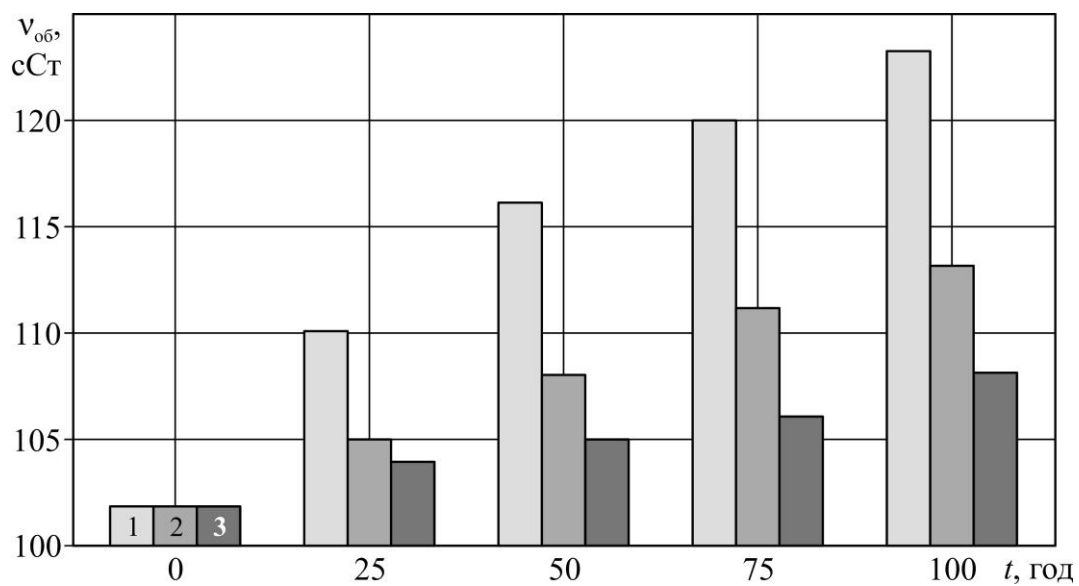
Технологічна послідовність проведення експериментів полягала в наступному. Перший дизель був «контрольним» і після заміни мастила в його системі мащення інших технічних заходів з ним не проводилося, і відповідно до вимог заводу-виготовлювача його експлуатація здійснювалася протягом 100 годин роботи без проміжного поповнення мастила в системі. За цей період експлуатації кількість мастила в циркуляційній системі дизеля не знижувалась нижче гранично допустимого значення. При цьому в циркуляційній системі з точністю $\pm(2,5...3)$ % підтримувалися постійний тиск

і температура мастила. Система мащення другого дизеля поповнювалася свіжим мастилом через кожні 10 годин роботи до верхнього рекомендованого в картері дизеля, що відповідало максимально можливому обсягу мастила в системі. Система мащення третього дизеля спочатку заповнювалася мастилом з поверхнево активною присадкою, що містить у своєму складі солі міді. Оптимальна концентрація присадки становила 0,1 % від обсягу мастила в системі мащення і була встановлена за допомогою попередніх оптичних і триботехнічних досліджень. Крім того, через кожні 10 годин роботи здійснювалося поповнення циркуляційної системи мащення даного дизеля мастилом з такою ж концентрацією поверхнево активної присадки, як і в загальному об'ємі системи.

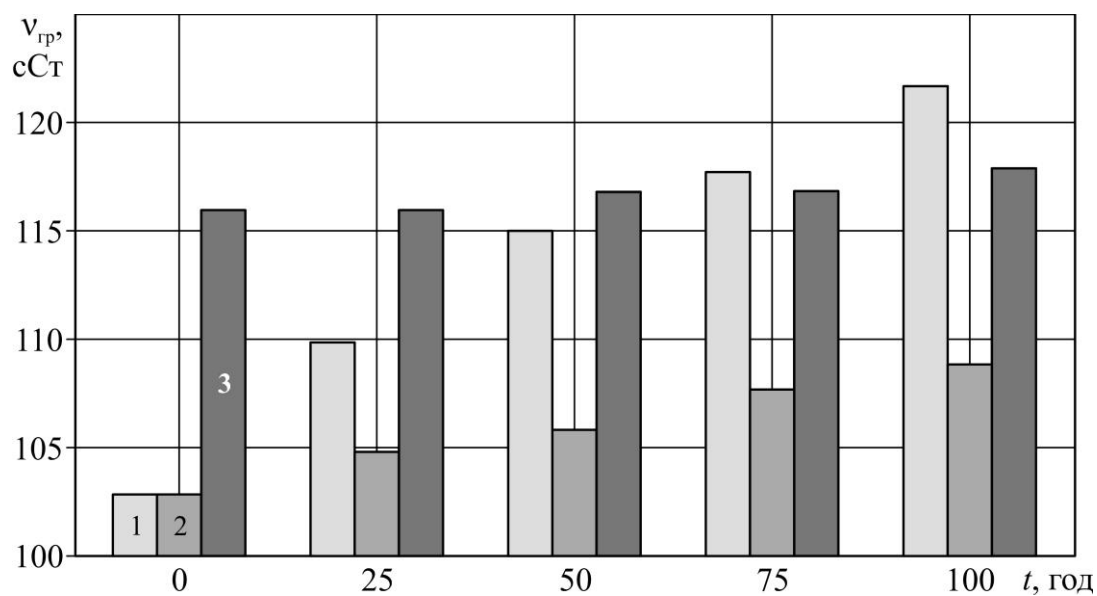
Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 4.3 і на рис. 4.2.

Таблиця 4.3. Зміна в'язкості моторного мастила в процесі експлуатації

Характеристика системи мащення	Час експлуатації, години				
	0	25	50	75	100
В'язкість мастила в об'ємі, $\nu_{об}$, сСт					
Робота системи мащення в штатному режимі	102	110	116	120	123
Поповнення системи мащення через 10 годин роботи	102	105	108	111	113
Поповнення системи мащення через 10 годин роботи і добавка поверхнево активної присадки	102	104	105	107	108
В'язкість мастила в граничному шарі, $\nu_{гр}$, сСт					
Робота системи мащення в штатному режимі	113	120	125	128	132
Поповнення системи мащення через 10 годин роботи	113	115	116	118	119
Поповнення системи мащення через 10 годин роботи і добавка поверхнево активної присадки	126	126	127	127	128



а)



б)

Рис. 4.2. Зміна в'язкості мастила в процесі експлуатації:

а – «об'ємна» в'язкість; б – в'язкість граничного мастильного шару:

1 – робота системи мащення в штатному режимі;

2 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи;

3 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи і добавка поверхнево активної присадки

Аналізуючи наведені результати, можна зробити наступні висновки.

У процесі експлуатації суднового дизеля в'язкість моторного мастила, що забезпечує його роботу, підвищується. Для циркуляційної системи мащення це, перш за все, зумовлюється попаданням у нього палива і частинок незгорілих вуглеводнів, а також його поступовим окисленням.

Збільшення періодичності поповнення системи мащення свіжим мастилом, а також введення в мастило поверхнево активних компонентів уповільнює процес підвищення його в'язкості.

Для кожного дизеля виконувалося визначення механічного ККД у діапазоні навантажень $(0,35...0,8)N_{\text{ном}}$. Результати за його визначенням наведені в таблиці 4.4 і на рис. 4.3.

Таблиця 4.4. Зміна механічного ККД судових дизелів 6EY22AW фірми Yanmar за різних умов експлуатації

Умови експлуатації	Навантаження на двигун			
	$0,35N_{\text{ном}}$	$0,5N_{\text{ном}}$	$0,65N_{\text{ном}}$	$0,8N_{\text{ном}}$
Робота системи мащення в штатному режимі (поповнення через 100 годин)	0,743	0,803	0,842	0,872
Поповнення системи мащення через 10 годин роботи	0,823	0,837	0,873	0,891
Поповнення системи мащення через 10 годин роботи і добавка поверхнево активної присадки	0,852	0,864	0,887	0,906

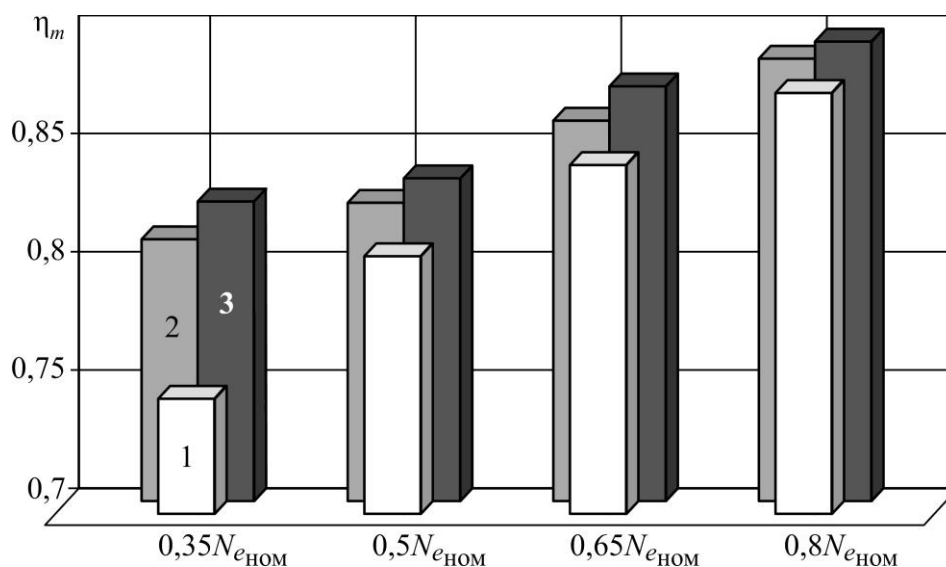


Рис. 4.4. Зміна механічного ККД суднового дизеля 6EY22AW фірми Yanmar за різної інтенсивності доливання мастила:

- 1 – робота системи мащення в штатному режимі; 2 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи; 3 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи і добавка поверхнево активної присадки

Найчастіше термін «поверхнево активна речовина» ототожнюється з терміном «присадка». Функціональне їх призначення дійсно подібне, проте слід зауважити, що дія присадок поширюється на весь об'єм рідини (на об'ємну фазу), а дія поверхнево активної речовини принципово проявляється саме поблизу металевої поверхні. Раніше зазначалося, що завдяки міжмолекулярній взаємодії поверхнево активних речовин і металевій поверхні активуються рідкокристалічні властивості мастильного матеріалу.

Тенденція розвитку і вдосконалення поверхнево активних присадок до мастил зводиться до синтезу і використанню високомолекулярних полярних кремнійорганічних і фторорганічних сполук, які мають високу температурну стійкість. У ряді випадків ефективним засобом є введення в мастильний матеріал солей деяких металів (міді, олова, алюмінію), з яких у процесі експлуатації осідає на поверхні контактуючих деталей шар металу, що сприяє поліпшенню триботехнічних характеристик вузла тертя [56, 57].

4.3. Висновки за розділом 4

1. Розв'язок прикладних задач граничного тертя і граничного змащування, реалізованих для суднових двигунів внутрішнього згорання морських і річкових засобів транспорту, забезпечує можливість цілеспрямовано створювати впорядковані структури та управляти властивостями речовин «знизу вгору», починаючи з атомного рівня, а також – проектувати нанорозмірні інструменти, механізми та пристрої для перетворення енергії з метою розвитку нанотехнології.

2. З цілого ряду методів щодо підтримання експлуатаційних характеристик моторних мастил найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору) є використання оптимального доливання масла в систему і застосування поверхнево активних речовин.

4. У процесі експлуатації суднового дизеля в'язкість моторного масла, що забезпечує його роботу, підвищується. Для циркуляційної системи мащення це, передусім, зумовлюється потраплянням до нього палива і частинок незгорілих вуглеводнів, а також його поступовим окисленням.

5. Збільшення періодичності поповнення системи мащення свіжим мастилом, а також введення в мастило поверхнево активних компонентів уповільнює процес підвищення його в'язкості, оптимізуя таким чином його експлуатаційні характеристики.

5. ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ ПІД ЧАС ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

5.1. Особливості експлуатації циркуляційних систем мащення під час пускових режимів роботи суднових дизелів

Пускові режими є найбільш відповідальними для будь-яких типів двигунів, в тому числі і СОД. Підвищення їх надійності може бути досягнуто за рахунок вдосконалення функціонування циркуляційної системи мащення дизеля за рахунок керування реологічними характеристиками мастильного матеріалу.

Остаточною фазою ремонтних докових операцій є спуск судна на воду. При цьому в повному обсязі закінчуються роботи по корпусній частині судна і гвинто-рульового комплексу. Однак можливі випадки, коли з тих чи інших виробничих чи експлуатаційних причин головний двигун (ГД) судна ще не готовий до роботи. Даний аспект суворо не регламентується в нормативних документах наглядових органів. Крім того, для суден, оснащених дизелями, що працюють на гвинт фіксованого кроку, введення в дію яких не планується в районі судноремонтного заводу, взагалі не розглядається до моменту ходових випробувань]. Якщо великотоннажні судна після закінчення докового ремонту виводяться на відкриту воду за допомогою портових засобів, то для суден малої та середньої водотоннажності можливий самостійний вихід за територію порту. Крім того, такі судна менш інерційні, а тому більш схильні до дії факторів, що обурюють, якими можуть служити випадкове хвилювання моря або помилка в буксируванні [56]. Все це ще раз підтверджує необхідність повної готовності комплексу ГД – рушій до роботи при виході судна з доку.

Для суден середньої водотоннажності, що використовують як ГД СОД, що працюють на гвинт, крок якого регулюється (ГКР), питання підготовки дизеля та системи, що обслуговують його роботу, відносно до моменту виходу судна з сухого доку раніше розглядалися з позиції загального забезпечення СЕУ до експлуатації [52]. При цьому робота циркуляційних систем мащення вивчалась при умовах, що моторне мастило, що в них використовується, не підлягає ніякої додаткової обробки (зокрема введенню в нього поверхнево-активних речовин, що сприяють покращенню його реологічних характеристик). Також не розглядалась можливість модернізації вже існуючих мастильних систем з метою підвищення надійності їх роботи у випадку екстреного пуску дизеля [49].

5.2. Технологія проведення досліджень

Наведений огляд останніх досліджень свідчить про наявність невирішеної проблеми з можливості забезпечення додаткових маневрових якостей судна, а, отже, підвищення його керованості та живучості, що може бути досягнуте шляхом оптимізації експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів.

Експерименти, що пов'язані з даними дослідженнями, були проведені на судні водотоннажністю 9800 тонн. Як ГД на судні використовувався чотиритактний СОД Hanshin 6LF58 з номінальною потужністю 4410 кВт, що працює на ГРК [57].

Схема циркуляційної мастильної системи такого дизеля приведена на рис. 5.1. Призначення елементів схеми зрозуміло і не вимагає додаткових пояснень.

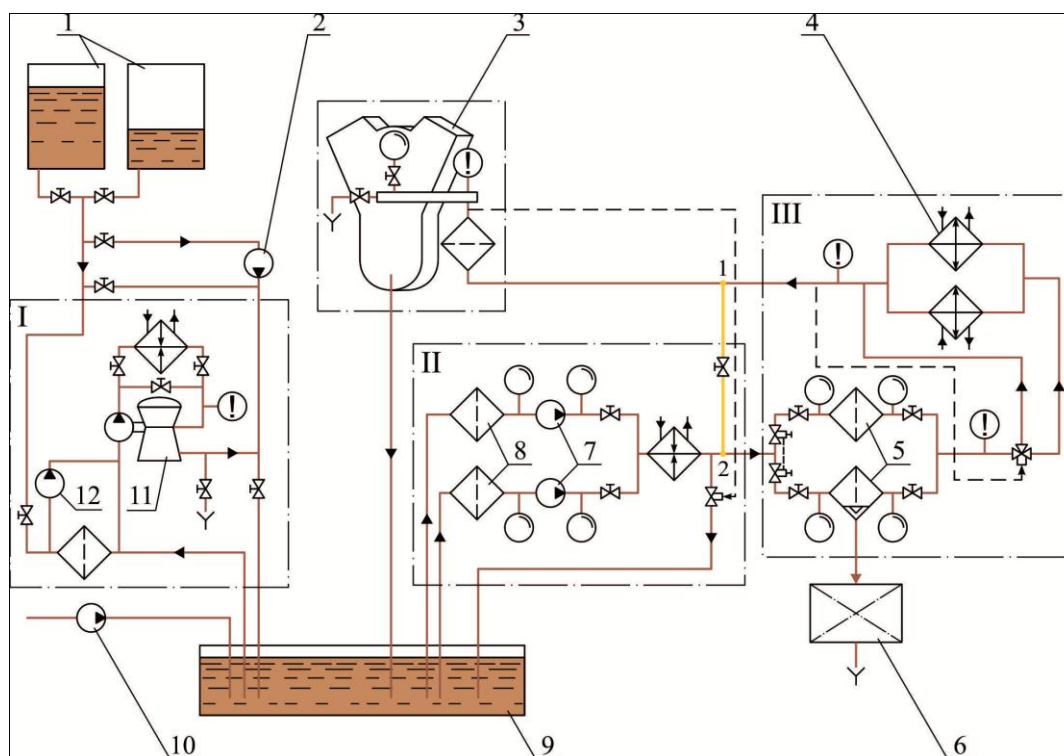


Рис. 5.1. Схема системи мащення суднового дизеля Hanshin 6LF58:

1 – витратні цистерни; 2 – мастильний насос; 3 – ГД; 4 – охолоджувач мастила; 5 – фільтр тонкого очищення; 6 – стічна цистерна; 7 – мастильний насос; 8 – фільтр грубого очищення; 9 – стічна цистерна; 10 – насос поповнення кількості мастила в системі; 11 – мастильний сепаратор; 12 – мастильний насос; I – модуль сепарації; II – модуль попереднього очищення; III – модуль остаточної підготовки

Модуль сепарації I забезпечує очищення мастила, що знаходиться в стічній цистерні 9. До сепаратора 11 мастило спрямовується насосом 12, або (у випадку непотрібності попереднього очищення в потоковому фільтрі) безпосередньо насосом сепаратора. Очищене мастило повертається до цистерни 9. Поповнення цистерні 9 забезпечується з або витратних цистерн 1 (за допомогою насосу 2), або з цистерн запасу мастила (за допомогою насосу 10). У випадку необхідності мастило, що знаходиться в витратних цистернах 1, очищується в сепараторі 11.

Модуль попереднього очищення II виконує функції очищення мастила в фільтрі грубого очищення 8 та попередній підігрів мастила (в випадку необхідності, наприклад під час «холодного» пуску ГД). Також цей модуль забезпечує рециркуляцію мастила у випадку підвищення її температури перед ГД 1.

В модулі остаточної підготовки III виконується очищення мастила в повнопотоковому фільтрі тонкого очищення 5. В залежності від температури мастила воно піддається або охолодженню в охолоджувачі 4, або спрямовується перепускною магістраллю безпосередньо до ГД 1. Збір протічок, води та забруднень, що залишаються в фільтрах 5, відводиться до стічної цистерни 6.

Перед пуском ГД прокачується одним з мастильних насосів 7, який забирає мастило з стічної цистерни 9 та через фільтр 8 і охолоджувач мастила 4 спрямовує його до поверхонь тертя дизеля (вкладишів підшипників колінчатого валу, деталей циліндрової групи та розподільного вала). Дана стандартна схема подачі мастила володіє певним часовим інтервалом, що характеризує рух мастила по системі від вихідного патрубку насоса безпосередньо до контактуємих деталей дизеля. У режимі штатної підготовки дизельної установки до пуску даний параметр не має переважаючого значення, а сам процес прокачування мастилом має за мету не тільки збагачення поверхонь мастильною плівкою, а й прогрів дизеля. Крім того, прокачування дизеля мастилом починається задовго до безпосереднього пуску дизеля, особливо це відноситься до мало-оберткових двотактних дизелів.

Під час режимів екстреного пуску час надходження мастила до вузлів тертя (в першу чергу до підшипників руху) має суттєве значення, а функціональність даного процесу перевищує фактор необхідності прогріву дизеля. У зв'язку з цим стандартна схема була дообладнана лінією 1-2. Слід зазначити, що мастило по магістралі 1-2 надходило до ГД 1 минаючи модуль

остаточної підготовки III, та не підлягало додаткової фільтрації та охолодженню. З експлуатаційної точки зору це пояснювалося наступним. У момент пуску дизеля мастило, що знаходиться в системі, ще не володіє високими температурними значеннями, тому необхідність в його охолодженні відсутня. Безпосередньо на вході в дизель мастило проходить через мастильний фільтр, який забезпечує необхідний ступінь очищення, а сам процес фільтрації для режимів екстреного пуску можливо проводити без додаткового проходження мастила через систему фільтрів тонкого очищення в модулі остаточної підготовки. Крім того, при екстреному пуску дизеля було рекомендовано використовувати обидва мастильних насоса 7, при цьому їх паралельна робота підвищувала тиск мастила в системі та, відповідно, в парах тертя вал – вкладиш підшипника, а також поршневе кільце – втулка циліндра.

Безумовно, дані умови роботи мастильної системи відрізняються від «штатних». Перш за все, це пов'язано з необхідністю очищення мастила в фільтрах тонкого очищення, розташованих в «відсіченій зоні» системи. Однак, з огляду на відносну нетривалість даних умов роботи, а також переважаюче значення надійного пуску дизеля в екстрених умовах, вони можуть бути рекомендовані до експлуатації. Крім того, клапан, за допомогою якого в разі екстреного пуску мастило може бути переспрямовано по додатковій магістралі, може автоматично перекриватися при наборі дизелем мінімально стійкої частоти обертання, забезпечуючи таким чином, роботу мастильної системи в даному режимі лише певний час [54].

Неодмінним супутником пускових режимів роботи будь-якого механізму є режим напіврідинного або граничного тертя в його контактуємих елементах. Для судових СОД найбільш відповідальними з таких вузлів є сполучення втулка-поршневі кільця, вал-вкладиш підшипника. У першому випадку на дзеркалі циліндрової втулки і особливо на поршневих кільцях залишається залишковий шар мастильної плівки, який здатний забезпечити

необхідний режим тертя. У другому, після тривалого виведення дизеля з експлуатації гідравлічний підпір шийки вала в підшипнику припиняється і під впливом сил тяжіння відбувається просідання вала на ліжку підшипника, що призводить до витіснення мастильного матеріалу з сполучення. Таким чином, пуск суднового дизеля спочатку відбувається в режимі напіврідинного або граничного тертя. Ще більш ускладнюється забезпечення мастилом пари вал-вкладиш під час екстреного пуску, коли контактуємі елементи не прокачуються мастилом за допомогою мастильного насоса. На жаль, дані режими роботи можливі під час експлуатації суднового пропульсивного комплексу і один з таких випадків – спуск судна на воду із сухого доку. Можна стверджувати, що використання в суднових умовах запропонованих рішень призведе до більш якісного забезпечення мастилом елементів дизеля, які труться і підвищенню надійності його роботи.

Для підтвердження цього припущення була проведена наступна серія експериментів.

Змазування деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) суднових чотиритактних ДВЗ відбувається розбризкуванням, а подача мастила до підшипників колінчастого вала здійснюється навішеним мастильним насосом, з чого випливає, що навіть при знаходженні дизеля в положенні «stand-bay» до пари колінчастий вал-вкладиш підшипника не здійснюється подача мастильного матеріалу.

Пуск дизеля проводився стисненим повітрям з автоматичним переключенням на роботу на паливі при досягненні необхідної частоти обертання. Як контрольовані параметри визначалися: тиск мастила в системі змащення колінчастого вала, частота обертання колінчастого вала, середній індикаторний тиск. Слід зазначити, що тиск мастила в системі є одним з параметрів, за яким спрацьовує захист дизеля. Якщо протягом 8 секунд тиск в системі не досягає мінімально допустимої величини ($3,6 \text{ кг/см}^2$), пуск дизеля припиняється навіть при досягненні необхідного числа обертів

колінчастого вала. У разі експерименту на дизелі з модернізованою мастильною системою, тиск мастила знаходилося в межах $6...7 \text{ кг/см}^2$. Мастильний трубопровід, по якому мастило додатково подавалося до дизелю, був забезпечений електромагнітним відсічним клапаном і при досягненні дизелем мінімально стійкої частоти обертання (і відповідно введенням в дію навішеного мастильного насоса) здійснювалось його автоматичне закриття.

Результати проведених експериментів показані на рис. 5.2, а, б, в, де представлені залежності тиску в системі мащення колінчастого валу, індикаторного тиску в циліндрі дизеля і частоти обертання вала в функції від часу [57].

Крім того, на даному дизелі методом постійної витрати палива виконувалось визначення механічного коефіцієнту корисної дії η_m (рис. 5.2, г). Тривалість проведення цього експерименту вибиралася відповідно до часу спрацьовування поверхнево активних речовин присадки, яка додається у мастило.

Результати досліджень, що виконані, дозволяють зробити наступні висновки.

Додаткове забезпечення мастилом ще непрацюючого дизеля суттєво підвищує його надійність роботи. Більш швидка стабілізація тиску мастила в парі вал-вкладиш підшипника зрозуміла і пояснення не вимагає (рис. 5.2, а). Підвищена величина середнього індикаторного тиску в пусковий період, перш за все, пояснюється зниженням механічних втрат в дизелі (рис. 5.2, б) [54].

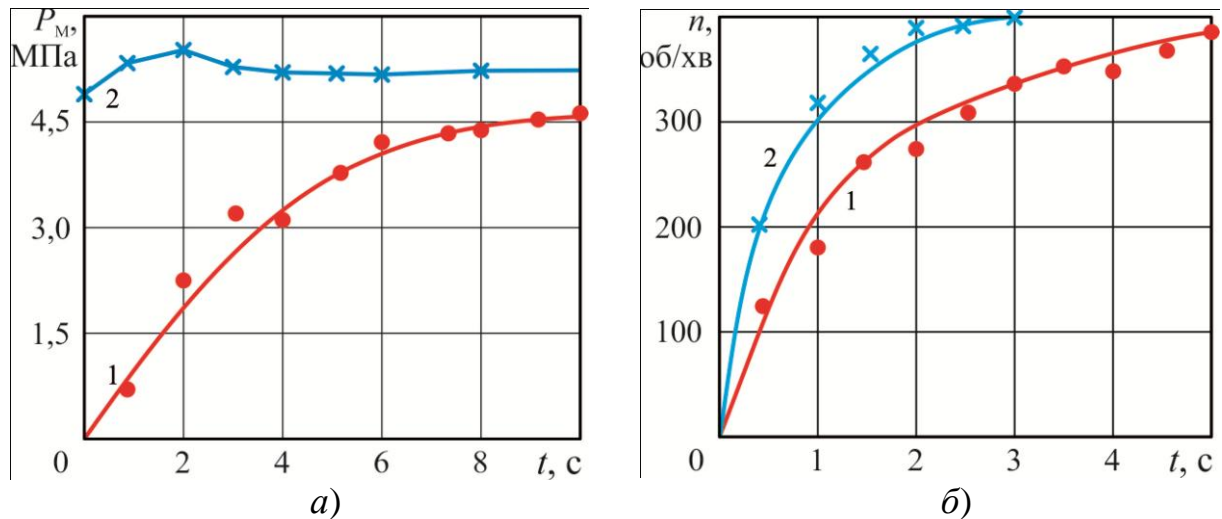


Рис. 5.2. Зміни в пусковий період роботи дизеля Hanshin 6LF58:
 a – тиску мастила в системі циркуляційного мащення $p_{ц}$; b – частоти
 обертання колінчастого вала n ;

1 – штатна циркуляційна масляна система;

2 – модернізована циркуляційна масляна система

Отримані результати можуть бути з достатньою достовірністю перенесені на випадок екстреного пуску суднового СОД, що використовується в як ГД.

5.3. Висновки за розділом 5

Як результат виконання розділу 5 зробимо наступні висновки.

1. Підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил, що використовуються в циркуляційних системах мащення, особливо

актуальне для пускових режимів СОД у випадку їх використання у функції ГД.

2. Оптимізація експлуатаційних характеристик моторних мастил сприяє підвищенню надійності роботи не лише циркуляційних система, але й дизельної енергетичної установки, забезпечуючи при цьому зменшення незворотних втрат, які визначаються механічним ККД.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота магістра присвячена розв'язанню важливого науково-прикладного завдання – оптимізації експлуатаційних показників систем мащення суднових дизелів.

Результати магістерського дослідження підтверджують існування керованого впливу на трибологічні системи суднових дизелів, що забезпечує мінімальний рівень механічних втрат енергії під час експлуатації систем мащення суднових дизелів.

Головним науковим результатом роботи є розробка технології підтримання експлуатаційних характеристик мастил, що використовуються у циркуляційних системах мащення суднових дизелів.

Основні наукові та практичні результати дослідження.

1. Механізм енергоперетворення на суднах з залежить від трибологічних процесів, що відбуваються в підшипникових вузлах на лінії трансформації енергії КШМ – колінчастий вал – споживач потужності.

2. 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.

3. Зміну в'язкості граничного мастильного шару 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 $(0,93...1,14)\nu$, де ν – в'язкість моторного мастила у великому об'ємі.

4. У процесі експлуатації суднового дизеля в'язкість моторного масла, що забезпечує його роботу, підвищується. Для циркуляційної системи мащення це, передусім, зумовлюється потраплянням до нього палива і частинок незгорілих вуглеводнів, а також його поступовим окисленням.

5. З цілого ряду методів щодо підтримання експлуатаційних характеристик моторних мастил найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору) є використання оптимального доливання масла в систему і застосування поверхнево активних речовин.

6. Зниження рівня механічних 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).

7. Збільшення періодичності поповнення системи мащення свіжим мастилом, а також введення в мастило поверхнево активних компонентів уповільнює процес підвищення його в'язкості, оптимізуя таким чином його експлуатаційні характеристики.

8. Підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил, що використовуються в циркуляційних системах мащення, особливо актуальне для пускових режимів СОД у випадку їх використання у функції ГД.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – С.109-118.
2. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
3. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59
4. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13(4). – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
5. Голікова В.В., Крайнова В.І., Парменова Д.Г., Сінюта К.О. Особливості ергономіки робочого місця майбутніх фахівців водного транспорту // // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). С. 218-223. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.18.
6. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
7. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.

8. Заблоцкий Ю.В. Снижение тепловой напряженности судовых дизелей за счет использования присадок к топливу // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2018. – № 38. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 78-89.

9. Zablotsky Yu.V. Reducing of thermal factor of exit-gas system of marine medium-speed diesel engine due to the usage of fuel additives // Science and Education : material of the XIII international research and practice conference, Munich, November 2nd – 3rd, 2016. – Munich : Vela Verlag Waldkraiburg. – 2016. – P. 96-103.

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

11. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

12. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.

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

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

15. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

16. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт.

Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.

17. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

18. Куропятник О. А., Sagin S.V. Ensuring efficiency and environmental of marine diesel engines which using exhaust gas bypass system // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 25- 40. doi: 10.31653/smf343.2021.25-40

19. 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. – 2011. – № 3.– С. 50-56.

20. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 12-16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

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

22. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.

23. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

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

25. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 106-119. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.

26. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.

27. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

28. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

29. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.

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

31. Голіков В.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голіков, М.А. Козьмініх, О.А. Онищенко. – Одеса : ОНМА, 2014. – 164 с.

32. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.

33. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

34. Куропятник А.А. Комплексное управление выпускными газами судовых дизелей как способ обеспечения их экологических показателей работы / А.А. Куропятник // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 142-159. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-142-159.

35. Сагін С.В. Визначення розподілу тиску в шарі ньютонівських мастил у судових енергетичних установках / С.В. Сагін, М.О. Кривий // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 160-170. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-160-170.

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

37. Сагін С.В., Куропятник О.А., Руснак Д.Ю., Парменова Д.Г. Зниження емісії оксидів сірки з випускними газами судових дизелів шляхом ультразвукової обробки палива // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 121 – 138. DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-121-138.

38. Ратайчук О.В., Сагін С.В. Підвищення ефективності процесу наддува судових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

39. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

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

41. Парменова Д.Г., Кулешов І.М., Калугін В.М. Суднові установки очищення нафтовмісних вод: нормативні вимоги, методи очищення, конструкція та експлуатація: навчальний посібник // Одеса: НУ ОМА. – 2025. – 148 с. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18836212>.
42. Popovskii Y.M., Sagin S.V., Khanmamedov S.A., Grebenyuk M.N., Teregerya V.V. Designing, calculation, testing and reliability of machines: Influence of anisotropic fluids on the operation of frictional components. – 1996. – Russ. Eng. Res. № 16. – P. 1–7.
43. Сагін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О. Підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 50. – С. 102-115. DOI: 10.31653/50.2025.102-115.
44. Madey V.V. Usage of biodiesel in marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 18-21. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-18-21>.
45. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 46-56.
46. Заблоцкий Ю.В. Зниження теплової напруженості судових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 76-87.
47. 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 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany. – 2016. – P. 82-89.
48. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса: ОНМУ. – С. 68-81.
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](https://doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59).

50. Заблоцкий Ю.В., Сагин С.В. Исследование эксплуатационных характеристик судовых среднеоборотных дизелей при их работе на различных топливах // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 34. – Одесса: ОНМА. – С. 80-86.

51. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.

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

53. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2019. – Вип. 1(58). – С. 88-98.

54. Парменова Д.Г. Систематизация факторов опасности для построения профиля риска судовых работ // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – № 1. – С. 30-35.

55. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Методичні вказівки для виконання дипломної роботи магістра. – Одеса: НУОМА, 2023. – 56 с.

56. Парменова Д.Г. Визначення відповідності суден вимогам щодо енергоефективності та скорочення викидів парникових газів: методичні вказівки до практичних занять з навчальної дисципліни «Моніторинг та виконання вимог Міжнародних морських конвенцій». – Одеса: НУ ОМА, 2025. – 44 с.

57. Янцелевич О.С., Сагін С.В. Підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУОМА. –С. 216-220.