

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

Кафедра безпеки життєдіяльності та захисту довкілля

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему:

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ
МАЩЕННЯ ЦИЛІНДРОВОЇ ГРУПИ СУДНОВИХ
КРЕЙЦКОПФНИХ ДИЗЕЛІВ**

Студента 2-го року навчання заочного відділення
навчально-наукового інституту інженерії
Чуйкіна Івана Сергійовича

Керівник: к-т техн. наук, професор Колегаєв М.О.

Нормоконтроль

Професор к.т.н., доц. Парменова Д.В.

Роботу заслухано на засіданні кафедри БЖ та ЗД та рекомендовано до
захисту в ЕК, протокол № 9 від 15 грудня 2025 р.

Завідувач кафедри БЖ та ЗД

к-т техн. наук, доцент

Професор
підпис

Дана ПАРМЕНОВА

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

Професор
(підпис)

Сергій САГІН

Рецензент (зовнішній)

(ПІБ, підпис, дата)

Професор *А. Мейсак*

28.12.25

Рецензент (внутрішній)

(ПІБ, підпис, дата)

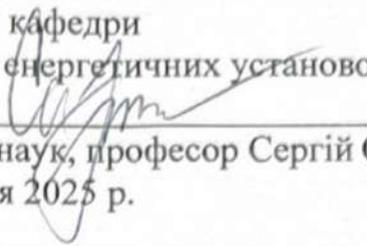
Професор М.В. Мінцов к.т.н., проф.

24.12.2025

Одеса – 2025

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 _____ Чуйкін Іван Сергійович _____

1. Тема дипломної роботи: _____ Підвищення ефективності процесу _____
_____ мащення циліндрової групи суднових крейцкопфних дизелів _____

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

2. Об'єкт дослідження _____ процес мащення циліндрової групи _____
_____ суднових мало-обертових двигунів внутрішнього згоряння _____

3. Предмет дослідження _____ технічний стан пари тертя _____
_____ втулка циліндра-поршневе кільце судового малообертового двигуна _____

4. Обсяг пояснювальної записки: _____ 80...90 стор. _____

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи: _____

_____ Аналіз літературних джерел з проблеми підвищення ефективності роботи _____
_____ циліндрових систем мащення суднових дизелів _____

_____ Загальна методика наукового дослідження _____

_____ Дослідження стратифікації в'язкості моторного мастила в вузлах тертя _____
_____ суднових дизелів _____

_____ Розробка методики підтримання гідродинамічного режиму мащення в парах _____
_____ тертя суднових дизелів _____

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

_____ Аналіз літературних джерел з проблеми підвищення ефективності роботи _____
_____ циліндрових систем мащення суднових дизелів _____

_____ Дослідження стратифікації в'язкості моторного мастила в вузлах тертя _____
_____ суднових дизелів _____

_____ Розробка методики підтримання гідродинамічного режиму мащення в парах _____
_____ тертя суднових дизелів _____

7. Перелік графічного матеріалу:

_____ Оптимізації технічної експлуатації циліндрової групи суднових МОД _____

_____ Моделювання процесу мащення в парах тертя суднових дизелів _____

_____ Дослідження стратифікації в'язкості моторного мастила в парі тертя МОД _____

_____ Використання присадок до моторних мастил _____

_____ Використання зносостійких плазмових покриттів _____

_____ Контроль та діагностування технічного стану циліндрової групи суднових МОД _____

_____ Результати досліджень _____

_____ Висновки _____

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 92 сторінки, 27 рисунків, 6 таблиць, 59 літературних джерел.

Дипломна робота магістра присвячена розв'язанню важливого науково-прикладного завдання – підвищенню ефективності роботи циліндрових систем мащення суднових дизелів.

Наведені конструктивні схеми та технологічні рішення провідних фірм (Wartsila, MAN-B&W, Hans Jense) стосовно рішень з забезпечення процесу мащення циліндрової групи суднових мало-обертових дизелів.

Експериментально підтверджено, що у трибо-сполученні циліндрова втулка – поршневе кільце виникає явище стратифікації в'язкості моторного мастила, яке виражається у відхиленні значення в'язкості в діапазоні 0,9...1,12 від його величини для великого об'єму.

Доведено, що для забезпечення гідродинамічного режиму мащення у трибо-сполученні циліндрова втулка – поршневе кільце доцільно використовувати спеціальні присадки до моторного мастила, а також виконувати обробку поверхонь цього трибо-сполучення спеціальними зносу-стійкими матеріалами.

Контроль технічного стану трибо-сполучення циліндрова втулка – поршневе кільце суднового мало-обертового дизеля запропоновано здійснювати за допомогою аналізу мастила, що отримано з під поршневого простору дизелю.

СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ, СУДНОВЕ МОТОРНЕ МАСТИЛО, ЦИЛІНДРОВА СИСТЕМА МАЩЕННЯ, ЗНОС ЦИЛІНДРОВОЇ ГРУПИ, ПРИСАДКИ ДО МАСТИЛА, СТРАТИФІКАЦІЯ В'ЯЗКОСТІ МОТОРНОГО МАСТИЛА

ABSTRACT

Master's thesis: 92 pages, 27 drawings, 6 tables, 59 references.

The master's thesis is devoted to solving an important scientific and applied problem - improving the efficiency of cylinder lubrication systems for marine diesels.

The constructive schemes and technological decisions of the leading firms (Wartsila, MAN-B&W, Hans Jense) concerning decisions on a group cylinder greasing process maintenance of ship low-speed diesels are given.

It has been experimentally confirmed that in the tribo-connection cylinder-piston ring there is a phenomenon of stratification of the viscosity of motor oil, which is expressed in the deviation of the viscosity value in the range of 0.9 ... 1.12 from its value for a large volume. It is proved that to ensure the hydrodynamic mode of lubrication in the tribo-connection cylinder liner – piston ring, it is advisable to use special additives to the engine oil, as well as to treat the surfaces of this tribo-connection with special wear-resistant materials.

The control of the technical condition of the tribo-connection cylinder liner - piston ring of the ship's low-speed diesel is proposed to be carried out by means of the analysis of the oil received from under the piston space of the diesel.

MARINE DIESEL, MARINE ENGINE OIL, CYLINDER LUBRICATION SYSTEM, CYLINDER GROUP WEAR, LUBRICANT ADDITIVES, ENGINE OIL VISCOSITY STRATIFICATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЦИЛІНДРОВИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ	13
1.1. Особливості використання мастил в суднових енергетичних установках	13
1.2. Аналіз використання суднових моторних мастил для мащення циліндрової групи суднових мало-обертових крейцкопфних дизелів	14
1.3. Конструктивне і технологічне рішення проблеми мащення циліндрової групи суднових мало-обертових дизелів різних фірм	22
1.3.1. Інженерні та конструкторські рішення фірми Wartsila (Система RPLS).....	21
1.3.2. Інженерні та конструкторські рішення фірми MAN Diesel&Turbo (Система LUBECS).....	24
1.3.3. Інженерні та конструкторські рішення фірми Hans Jense	25
1.3.4. Аналіз загальних рішень в здійсненні мащення циліндрових втулок	26
1.4. Аналіз особливостей підходів і принципів в забезпеченні мастила елементів циліндро-поршневої групи.....	27
1.4.1. Стратегія фірми Wartsila (RPLS)	27
1.4.2. Стратегія фірми MAN Diesel&Turbo	28
1.4.3. Стратегія фірми Hans Jense.....	29
1.5. Висновки за розділом 1.....	32
2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	33
2.1. Процес наукового пізнання	33
2.2. Методологічні принципи наукових досліджень	34

2.3. Обґрунтування мети і завдань дослідження	36
2.4. Висновки за розділом 2.....	38
3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕЖИМІВ МАЩЕННЯ ЦИЛІНДРОВОЇ ГРУПИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТРИБОМОНІТОРІНГА.....	39
3.1. Оптимізації технічної експлуатації циліндрової групи двигунів внутрішнього згоряння методом багатокритеріального підходу	39
3.2. Оптимізації технічної експлуатації циліндрової групи судових мало-обертових дизелів за результатами трибо-моніторингу	42
3.3. Висновки за розділом 3.....	47
4. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРАТИФІКАЦІЇ В'ЯЗКОСТІ МОТОРНОГО МАСТИЛА В ВУЗЛАХ ТЕРТЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	49
4.1. Суднове моторне мастило як дисперсна система	49
4.2. Трибологічні характеристики системи поршневе кільце - циліндрова втулка судового двигуна внутрішнього згоряння	54
4.3. Експериментальне дослідження явища стратифікації в'язкості моторного мастила, що виникає при роботі трибо-сполучення втулка-поршневе кільце	57
4.4. Висновки за розділом 4.....	63
5. РОЗРОБКА МЕТОДИЦІ ПІДТРИМАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ МАЩЕННЯ В ПАРАХ ТЕРТЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	64
5.1 Використання присадок до моторних мастил	64
5.2. Застосування багатошарових Мо-С покриттів	69
5.3. Висновки по розділу 5.....	72
6. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЦИЛІНДРОВИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	74
6.1. Діагностування технічного стану циліндрової групи судових мало-обертових дизелів за характеристиками мастила.....	74
6.2. Визначення оптимальної подачі циліндрового мастила.....	77

6.3 Визначення оптимальних зон експлуатації циліндрової групи суднового мало-обертового дизеля.....	79
6.4. Висновки за розділом 6.....	81
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ГД	–	головний двигун
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
КШМ	–	кривошипно-шатунний механізм
ММ	–	моторне мастило
МОД	–	мало-обертовий дизель
ПАР	–	поверхнево-активні речовини
СЕУ	–	суднова енергетична установка
СМ	–	система мащення
СОД	–	середньообертовий дизель
ТО	–	технічне обслуговування
ЦПГ	–	циліндропоршнева група
ACC	–	Adaptive Cylinder oil Control
CVD	–	Chemical Vapor Deposition
FR	–	Feed Rate
PQI	–	Particle Quantity Index

ВСТУП

Розвиток судноплавства пов'язано зі збільшенням чисельності суден, зростанням їх розмірів і швидкості, а також потужності суднових енергетичних установок (СЕУ). Передача потужності від дизеля супроводжується 10 % втратами енергії на тертя в деталях циліндро-поршневої групи (ЦПГ) і підшипниках кривошипно-шатунного механізму (КШМ).

Важливість вирішення завдань щодо забезпечення мінімально допустимих втрат СЕУ, в першу чергу, визначається вимогами Додатка VI конвенції MARPOL і резолюцією МЕРС.203 (62) від 15.07.2011 р. про введення нових правил енергоефективності суден, що прийнята Комітетом по захисту морського середовища Міжнародної морської організації.

Експлуатація суднових двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) неможлива без використання робочих рідин, однією з яких є мастило. Суднові ДВЗ характеризуються наявністю великої кількості трибосполучень, працездатність яких відбувається при різних умовах змащування і забезпечується моторними мастилами (ММ) з різними експлуатаційними властивостями. Для сучасних суднових дизелів основними вузлами мащення є ЦПГ і підшипники руху (рамові, мотильові, крейцкопфні). Подачу ММ до цих елементів здійснюється за допомогою лубрикаторної (циліндрової) і циркуляційної систем мащення. Навіть короткочасне відхилення від заданого режиму мащення як в одній, як в одній, так і в іншій системі, може привести до небезпечних аварійних ситуацій і пошкоджень або ЦПГ, або колінчастого вала і його підшипників. Це, в свою чергу, змушує обмежувати електропостачання судна (в разі виникнення такої ситуації з допоміжним дизель-генератором), або повністю виводити судно з ходового режиму (в разі відмови в роботі головного двигуна).

Розширення паливної бази ДВЗ передбачає застосування в них важких палив, що ускладнює функціонування їх систем мащення. Більш глибока переробка нафти неминуче супроводжується збільшенням концентрації в паливах продуктів вторинних процесів, в яких міститься значна кількість небажаних з'єднань, що погіршують експлуатацію дизельних двигунів.

Зростання витрат палива і мастила в судових ДВЗ при їх експлуатації обумовлено головним чином невідповідністю моторних властивостей мастил характеристикам палива, що використовується та форсировке дизеля. В результаті інтенсифікується зношування, що призводить до погіршення робочого процесу двигуна і збільшення витрати мастила.

Неналежне забезпечення процесів мащення деталей ДВЗ сприяє збільшенню їх теплових і механічних навантажень і призводить до зниження їх ефективної потужності. Величина цих втрат може досягати 10...15 % від номінальної потужності дизеля.

Вимоги до раціонального використання мастильних матеріалів на судах пояснюються також зростанням автономності роботи СЕУ. Необхідність транспортування на борту судна великої кількості палива і мастила, обмежені можливості в поповненні його запасів тільки підкреслюють важливість досліджень, спрямованих на підвищення ефективності використання мастила.

Актуальність завдання підтримки експлуатаційних властивостей ММ для судових мало-обертових дизелів (МОД) пояснюється також роботою сучасних моделей дизелів на низькосортних сортах палива з максимально можливим для заданих умов експлуатації морського судна вмістом сірки.

Вимоги дизелів до якості ММ зростають у зв'язку з підвищенням наддуву. Інтенсифікація робочого процесу ДВЗ посилює умови функціонування мастила в ЦПГ. Зростають питомі тиски в парах тертя, тепловий вплив на масло, що вимагає застосування ММ з більш високою гідродинамічної густиною.

В останні роки досягнуті деякі успіхи в організації раціонального використання мастильних матеріалів в ДВЗ. Однак забезпечення суднової техніки високоякісними мастилами ще далеко від досконалості. Часто нові ММ, які успішно пройшли всі види випробувань, або взагалі не ставляться на виробництво, або випускаються в недостатній кількості, що не забезпечує потреби флоту. Присадки, випущені навіть однією фірмою, можуть відрізнятися за змістом активної речовини і, отже, за паливною ефективністю.

Відсутність рекомендацій щодо ефективного використання мастила призводить до того, що навіть зараз на суднах застосовують ММ з досить низьким рівнем експлуатаційних (моторних) властивостей. Відсутність системного підходу до застосування присадок до мастил в деяких випадках має негативний результат, приводячи до пошкоджень як елементів ЦПП, так і деталей руху. Даний факт пояснюється неправильним вибором концентрації металомісткості присадки в базовому маслі. Як правило, дані типи присадок просто вводяться в обсяг систем мащення (СМ) методом разового розчинення. При цьому кожна з присадок має свої оптимальні концентрації, визначення яких відбувається при проведенні спеціальних експериментів.

У багатьох наукових роботах по вивченню експлуатаційних характеристик судових МОД і їх СМ домінуюча роль віддається мастильному матеріалу. Всі фізичні і хімічні процеси, які протікають в СМ, багато в чому обумовлені перетвореннями, які відбуваються як в самому змащувальному матеріалі, так і на поверхнях металів, які він поділяє.

Чималу роль набувають дослідження, спрямовані на управління процесами, що протікають в ММ. У цьому відкривається резерв зниження енергетичних витрат на подолання механічних втрат, зниження зносу, поліпшення технічного стану деталей судових дизелів, зниження витрати палива і мастила.

Саме цим питанням присвячена дипломна робота.

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЦИЛІНДРОВИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

1.1. Особливості використання мастил в суднових енергетичних установках

Головні та допоміжні СЕУ є порівняно невеликими споживачами мастильних матеріалів у загальному обсязі світового транспортно-енергетичного комплексу [1-3]. При цьому слід підкреслити, що ММ, які використовуються на морському флоті, в найбільшою мірою леговані присадками і відрізняються великим запасом якості за своїм первинним властивостям [4-6].

Жорсткість умов роботи циліндрових ММ в форсованих ДВЗ (у зв'язку зі збільшенням часу контакту ММ з гарячими газами і застосуванням палива з високим вмістом сірки) зажадало комплексного підходу до підвищення ефективності систем мащення циліндрів суднових МОД.

У комплекс заходів, здатних привести до підвищення експлуатаційної надійності суднових дизелів, входить забезпечення гідродинамічного режиму змащування в трібосоединенні поршневі кільця - втулка циліндра.

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 підтримання їх експлуатаційних властивостей [8, 9].

1.2. Аналіз використання судових моторних мастил для мащення циліндрової групи судових мало-обертових дизелів

Мастила, що використовуються на судах, підрозділяють на моторні і мастила для допоміжних механізмів і пристроїв. ММ в свою чергу поділяються на:

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

Основні функції мастил зводяться до забезпечення надійної роботи вузлів тертя, зменшення тертя та викликаного зносу; запобігання зносу в усіх інших його формах; видалення із зони тертя забруднюючих елементів; охолодження шляхом відведення теплоти від поверхонь, що труться; забезпечення щільності в зоні кільцевого ущільнення поршнів; запобігання корозії. Для протистояння явищу сірчистої корозії в циліндрові мастила в обов'язковому порядку вводять з'єднання лугу, зміст якої визначається в мг гідроксиду калію КОН на 1 грам мастила (її величина може досягати 70 мгКОН/г) [10, 11].

Проблеми, що пов'язані з необхідністю розробки нових циліндрових мастил, виникли ще на початку 60-х років минулого століття і були пов'язані з появою на морських судах МОД з наддувом і переведенням їх роботи на економічно вигідні палива підвищеної в'язкості. Відповіддю на посилення умов роботи мастил і потреба в наданні їм відповідних властивостей було створення поруч нафтових компаній спеціальних циліндрових мастил з вихідним лужним числом 40...50 мгКОН/г, здатних певною мірою знизити

несприятливі наслідки форсування наддувом МОД і використання в них палив низької якості, що впливають на зниження ресурсу ЦПГ. Подальші тенденції в експлуатації суднових МОД були пов'язані з широким застосуванням в них ще більш важких палив з високим вмістом сірки та інших небажаних компонентів, що збіглося з різким підвищенням цін на нафту і нафтопродукти в результаті світової енергетичної кризи 70-х років. Лужні циліндрові мастила першого покоління вже перестали відповідати зрослим вимогам до їх властивостями, в першу чергу до протизносу, миючих і нейтралізуючим. У цей період провідними зарубіжними нафтовими компаніями (Mobil oil, Shell, ESSO, Техасо, Castrol і ін.) Були розроблені і випущені на ринок циліндрові мастила з рівнем лужних чисел 60...70 мгКОН/г, що перевершують за своїми експлуатаційними властивостями мастила першого покоління.

Високолужні циліндрові мастила другого покоління (Mobilgard 570, Shell Alexia 50, Castrol S/02 та ін.) Тривалий час успішно застосовувалися в форсованих суднових МОД в умовах експлуатації на паливах в'язкістю 120...320 сСт при 50°C з вмістом сірки до 3...4 %.

Експлуатація суднових дизелів на подібних сортах палива і мастила проводилася аж до початку нинішнього століття, коли флот став поповнюватися суднами з довгоходові моделями двотактних дизелів, Високофорсовані чотирехтактними дизелями, а крім того, посилилися вимоги до екологічних параметрів роботи СЕУ в цілому і ДВЗ зокрема [12-14].

В даний час світове судноплавство, суднове дизелебудування, а також тенденції в зміні способів переробки нафти і якості палив, що поставляються для флоту, вступили в новий етап розвитку, завдання якого полягають у значному підвищенні економічності енергетичних установок і забезпеченні можливості використання в них надважких палив, отриманих із залученням вторинних продуктів переробки нафти. Наслідком такого розвитку стало створення довгоходові (Long type) і понад довгоходові (Super-long type)

моделей МОД, для яких характерне ставлення ходу поршня до діаметру циліндра до 4,0...4,3, а в самих останніх моделях (Giga-long type) – до 5,0. У всіх перспективних типах МОД прийнята прямоточна продування циліндра як забезпечує найкращий газообмін в цих умовах [1, 15]. Довгоходові МОД відрізняються від двигунів з традиційними співвідношеннями S/D зниженою частотою обертання на номінальній потужності, що забезпечує більш високий індикаторний коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна і пропульсивний ККД всієї установки [16]. Висока економічність таких двигунів досягнута і завдяки підвищенню максимального тиску згоряння p_z і поліпшенню індикаторного процесу. Всі ці зміни прямо стосуються формування мастильної плівки на поверхні змащуваних деталей, а збільшення максимальних тисків (до 15,0...16,0 МПа) і температур у верхній частині циліндра призводить до підвищення вимог до мастилу щодо запобігання утворенню відкладень і зносу.

Потужність суднових дизелів визначається за виразом

$$N_{e_{ном}} = \frac{V_s z i n}{60} p_e,$$

де $V_s = \frac{\pi D^2}{4} S$ – робочий об'єм циліндра (D – діаметр циліндра, S – хід поршня);

z – коефіцієнт тактності;

i – кількість циліндрів;

n – частота обертання колінчастого вала,

і прямо залежить від геометричних розмірів циліндра. Тому одним із способів підвищення циліндрової потужності є збільшення ходу поршня S , яке в сучасному дизелебудуванні реалізується за рахунок збільшення відносини ходу поршня до діаметру циліндра – S/D . Значення даної

відносини для дизелів 2-ий і 3-ій (Mk-2 і Mk-3) модифікацій дизелів фірми «MAN-B&W» становило 1100/500, 1400/620, 1600/740 (тобто $S/D=2,16...2,26$). Ця ж величина для сучасних моделей (Mk-8 і Mk-9, S-модифікація) лежить в межах 2000/500, 2400/600, 2800/700 (тобто $S/D=4,0$), а в деяких моделях (G-модифікація) 2500/500, 2790/600, 3256/700 (тобто $S/D=4,65...5,0$).

Однак підвищення потужності суднових дизелів за рахунок збільшення ходу поршня пов'язане з вирішенням ряду конструкційних і технологічних проблем, однією з яких є необхідність забезпечення якості змащення ЦПГ, площа поверхні якої (в зв'язку з підвищеним ходом поршня) принципово збільшується. Наприклад, для судового дизеля VTBF62 ($D=0,62$ м, $S=1,4$ м) площа внутрішньої поверхні циліндрової втулки складає $S_{\text{пов}}=2,72$ м², а для відповідного йому сучасного дизеля G60ME-C Mk9 ($D=0,6$ м, $S=2,79$ м) $S_{\text{пов}}=5,26$ м². При цьому (в зв'язку з незмінністю значення довжини кола циліндричної втулки для дизелів з однаковими діаметрами циліндра) кількість точок циліндрового змазування (кількість плунжерів лубрикатора, розташованих у втулці циліндра) залишається незмінним. Одночасно зі збільшенням ходу поршня у сучасних дизелів підвищені значення всіх показників робочого циклу, зокрема тиску надувочного повітря p_s , з яким продувочний повітря надходить в циліндр, і тиск в кінці згорання p_z , що також негативно впливає на стан тонкого масляного шару, що знаходиться на дзеркалі циліндричної втулки.

Проведений аналіз основних проблем застосування циліндрових мастил в довгоходові МОД і шляхи їх вирішення показані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Використання мастил для змазування ЦПГ довгоходові МОД

Проблема	Шлях вирішення	Засоби вирішення
Збільшена площа змазування	Поліпшення растекаемости мастила; поліпшення змочуваності металу	Базове масло і присадки
Збільшення тиску на поршневі кільця	Збільшення міцності і товщини мастильної плівки	Базове масло і присадки
Великий час контакту з полум'ям і газами при згорянні	Висока термічна стабільність	Базове масло і присадки
Тенденція до корозійного зносу	Більш висока швидкість нейтралізації кисло	Присадки
Тенденція до зростання вуглецевих відкладень	Високий рівень миючих властивостей (детергентні)	Присадки

Аналіз сучасних тенденцій розвитку МОД показує, що для забезпечення необхідної довговічності і надійності сучасних двигунів до циліндровому мастилу пред'являються особливі вимоги, багато в чому більш жорсткі, ніж ті, які висувалися для МОД попередніх моделей [17]. Зокрема, вимоги до забезпечення плинності мастила і смачиваємості металу набувають нового значення, якщо врахувати, що менше 1 г мастила подається в циліндр двигуна за кожен оборот колінчастого вала, при цьому площа змащувати поверхні становить до 10 м², а хід поршня до 4,5 м. Ці властивості повинні забезпечувати рівномірність розподілу мастила по втулці циліндра. У довгоходові МОД збільшено в порівнянні зі звичайними МОД час знаходження мастильної плівки до її поновлення на поверхні

втулки, в результаті чого масло повинне витримувати більшу термічну навантаження, виконуючи необхідні функції [18].

Однією з найважливіших завдань є забезпечення товщини і міцності мастильної плівки в умовах низьких швидкостей поршня, наприклад, при русі судів на економічних ходах, що досить широко поширене в сучасному судноплаванні [19].

Висока потужність, яка припадає на одиницю робочого об'єму циліндрів сучасних МОД, дає велике тепловиділення, значна частка якого сприймається масляною плівкою [20]. При недостатній термічній і окислювальній стабільності мастила створюються передумови для підвищення нагарообрання в зоні поршневих кілець, що знижує ресурс між перегорідками ЦПГ. Тому масло повинне мати достатню ступенем детергентні (миючими властивостями) і високою термоокислювальною стабільністю.

Таким чином, якісний стрибок у розвитку судових дизелів спостережуваний протягом останнього часу, безпосереднім чином вплинув на зміну вимог до циліндровим оливам і висунув завдання створення нового покоління мастил, що відповідає їм [21]. В оцінці умов роботи циліндрового мастила не менш важливим фактором, ніж прогрес в розвитку МОД, є якість застосовуваних палив [22]. Протягом останніх 10...15 років особливості застосування палив в СЕУ зазнали значних змін – знизилася споживання палив, отриманих з використанням вторинних процесів: термічного і каталітичного крекінгу, віскрекінга і ін. Інтенсифікація переробки нафти спричинила за собою ускладнення залишкових і дистилатів компонентів. При цьому спостерігається збільшення щільності палив навіть при постійній їх в'язкості. В процесі експлуатації в'язкість палива піддається ефективному регулюванню шляхом зміни його температури; що стосується щільності, то в силу порівняно слабкою її залежності від температури, цей важливий показник палива залишається практично незмінним в процесі підготовки

палива до використання в дизелі. При використанні вторинних продуктів переробки нафти порушилося традиційне для прямогонних продуктів відповідність між в'язкістю палива і іншими його фізико-хімічними показниками, зокрема, вмістом сірки, смол, асфальтенів. Першорядне значення придбали такі показники, як вміст каталізаторної пилу (алюмосилікати), співвідношення змісту ванадію і натрію, а також сумісність і стабільність палив. Суднові МОД і системи обробки палива сучасних суден модифіковані на застосування надважких палив з в'язкістю до 750 сСт при 50°C і густиною до 1010 кг/м³. Особливості умов роботи циліндрового мастила на поверхні деталей ЦПГ при використанні високов'язких і високоплотних палив визначаються наступними факторами:

- більш тривалим згоряння палива на лінії розширення;
- високим ступенем термічного впливу на масляну плівку;
- попаданням на поверхню олійною плівки щодо великої кількості сажі в результаті неповноти згоряння палива;
- попаданням крапельок незгорілого палива всередину плівки через збільшення дальності розпилення палива великої щільності.

Такий процес змішування частинок, що знаходяться на поверхні циліндра, чинить негативний вплив на змащувальні властивості мастила, сприяє зниженню його термічної і термоокислительной стабільності.

Серйозний вплив на виникнення корозійного зносу деталей ЦПГ надає міститься в паливі сірка. Особливо відчутним знос стає в умовах сильної конденсації парів сірчаної і сірчистої кислот при порівняно низьких температурах втулок циліндрів і підвищенні максимальних тисків згоряння палива (що знижує температуру точки роси H₂SO₄).

Використання важких і надважких палив в крейцкопфних дизелях зумовлює посилення вимог до ряду властивостей циліндрового мастила [23]. Перш за все, це стосується забезпечення нейтралізуючої здатності, високої термоокислительной стабільності і антїнагарних властивостей мастила [24,

25]. Конструктивне вдосконалення мало-обертових дизелів й посилення умов їх експлуатації формують основні вимоги, що пред'являються до циліндровим мастил нового покоління. Масло має:

- створювати ефективне ущільнення між поршневими кільцями і втулкою циліндра;
- знижувати до мінімальної величини тертя ковзання і забезпечувати високі антифрикційні властивості;
- нейтралізувати сильні мінеральні кислоти, які утворюються при спалюванні палив, що містять сірку;
- запобігати утворенню нагару в зоні поршневих кілець, вікнах втулки циліндра, на клапанах газорозподілу і забезпечувати рухливість кілець в процесі тривалої експлуатації;
- спалюватися в циліндрі, залишаючи якомога менше нагару можливо більш м'якої консистенції.

Провідні компанії випускають в даний час по одній – дві марки циліндрових мастил. Це, як правило, мастила класу в'язкістю SAE50, рідше SAE60 з лужним числом 70...100 мгКОН/г, що представляють собою за якістю і властивостями високолужні мастила третього покоління. До них відносяться мастила фірм: Mobil oil (Mobilgard 570 клас SAE50, лужне число 70 мгКОН/г); ESSO (Exxmar X70 і X90, класи в'язкості відповідно SAE50 і SAE60, лужні числа 70 і 90 мгКОН/г); Shell (Alexia 50 і Alexia X, клас в'язкості обох марок SAE50, лужні числа відповідно 70 і 100 мгКОН/г); Castrol (S/D Z65 і Cyltech 80, клас в'язкості обох марок SAE50; лужні числа відповідно 65 і 80 мгКОН/г), British Petroleum (Energol CLO50M клас в'язкості SAE50, лужне число 70); Teboil (Ward Heavy SAE50, лужне число 70) і ін.

Викладене підкреслює актуальність вирішення завдань щодо забезпечення якісного змащування деталей циліндропоршневої групи.

1.3. Конструктивне і технологічне рішення проблеми мащення циліндрової групи судових мало-обертових дизелів різних фірм

Останнім часом на судових двигунах з'явилися нові системи змащення циліндрових втулок від різних виробників. Світовими лідерами у виробництві даних систем є такі виробники: Wartsila (система RPLS); MAN Diesel&Turbo система (LUBECS); Hans Jensen.

Аналіз підходів названих вище виробників до вирішення завдань якісного функціонування систем циліндричної мастила дозволяє простежити сучасні тенденції в забезпеченні оптимальних режимів мастила сучасних судових дизелів з підвищеним ходом поршня.

Вирішення зазначених завдань (відповідно до судовим тестів розглянутих виробників) призводить до зменшення витрати циліндрового мастила приблизно в два рази. Кожна фірма-виробник пропонує свої способи, завдяки яким вирішуються дані проблеми і поставлені завдання.

1.3.1. Інженерні та конструкторські рішення фірми Wartsila (Система RPLS)

Основні конструкторські рішення, розроблені фірмою Wartsila щодо змащування ЦПГ дизелів зводяться до наступних позиціях.

Система RPLS подачі циліндрового мастила через неповернуті клапана під високим тиском зображена на рис.1.1 і включає в себе окрему систему гідравлічного мастила для приводу в дію гідравлічного активатора за допомогою соленоїдного клапана (рис.1.2).

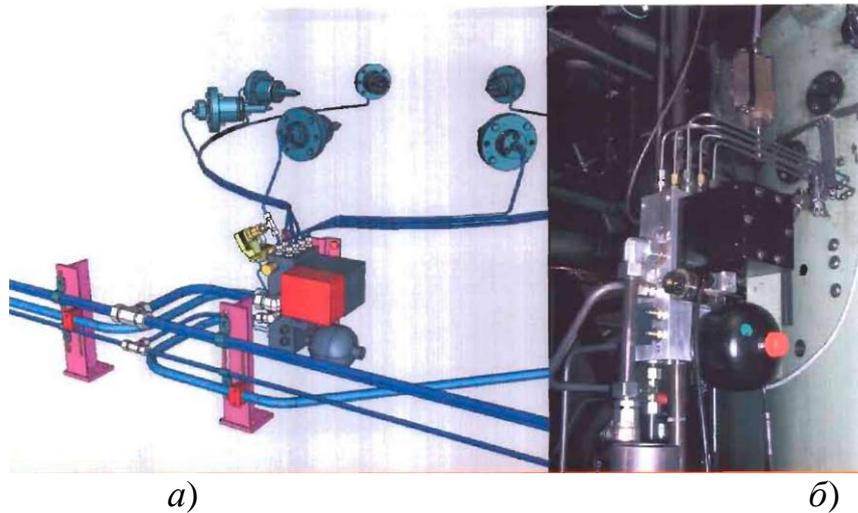


Рис.1.1. Система подачі циліндрового мастила до деталей циліндро-поршневої групи фірми Wartsila:

а) загальна компоновка системи; б) схема установки на дизелі

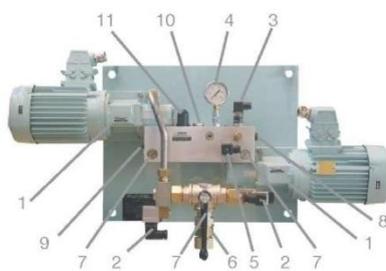


Abb.14
Bauteile des Ölversorgungsaggregat SA/B

Pos.	Benennung	
1	Zahnradpumpen UD	M/P1, M/P2
2	Druckschalter Eingangsdruck	P3, P4
3	Drucktransmitter Systemdruck	P1
4	Manometer Systemdruck	M
5	Drucktransmitter Leckageöl	P2
6	Rückschlagventile	RV1, RV2, RV3
7	manuelles Ölumschaltventil	WV
8	Absperrschrabe	SV1
	Betriebszustand NO = offen	
	(2 Umdrehungen offen)	
9	Absperrschrabe	SV2
	Betriebszustand NC = geschlossen	
10	Sicherheitsventil	DB1
11	Druckbegrenzungsventil	DB2
12	Druckentlastungsschrabe	SV3

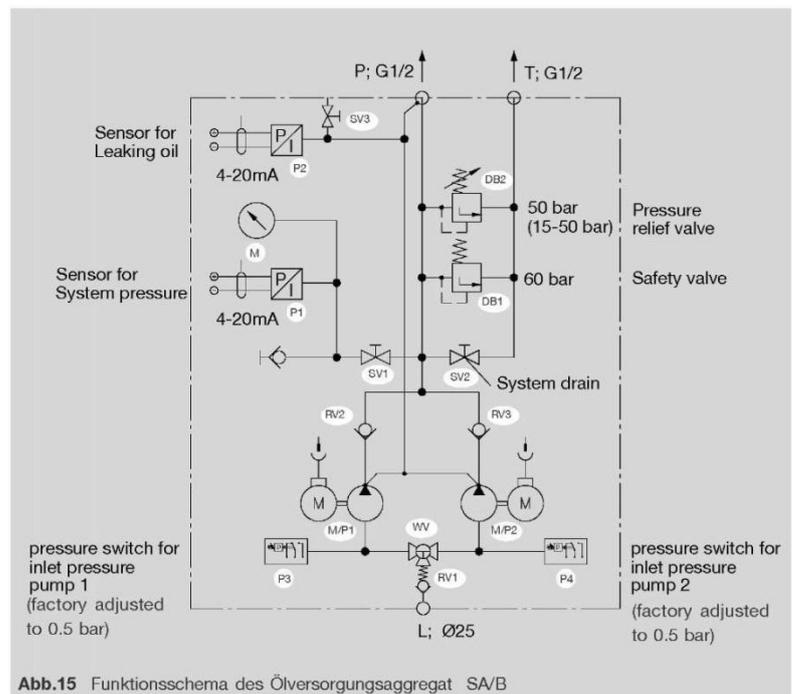


Abb.15 Funktionsschema des Ölversorgungsaggregat SA/B

Рис.1.2. Функціональне побудова системи гідравлічного мастила

Крім того, до складу системи RPLS входять система визначення положення колінчастого вала двигуна і впорскування мастила в точно зазначений момент з урахуванням частоти обертання колінчастого вала, навантаження і заданої подачі (задається процесором).

1.3.2. Інженерні та конструкторські рішення фірми MAN Diesel&Turbo (Система LUBECS)

Розроблена фірмою MAN Diesel&Turbo система LUBECS забезпечує подачу циліндрового мастила через неповернуті клапана під високим тиском шляхом вприскування в кожну контрольну точку плунжерами, які приводилися в рух гідравлічним маслом від сигналу соленоїдного клапана на циліндровий лубрикатор, встановлений на кожен циліндр.

Циліндровий лубрикатор встановлений заводом-виготовлювачем на HCU (гідравлічний контрольний блок циліндра), не вимагає окремої системи контролю та моніторингу (додаткових процесорів) – вбудована в головну систему (головна панель управління).

Гідравлічний контрольний блок фірми MAN Diesel&Turbo показаний на рис.1.3.

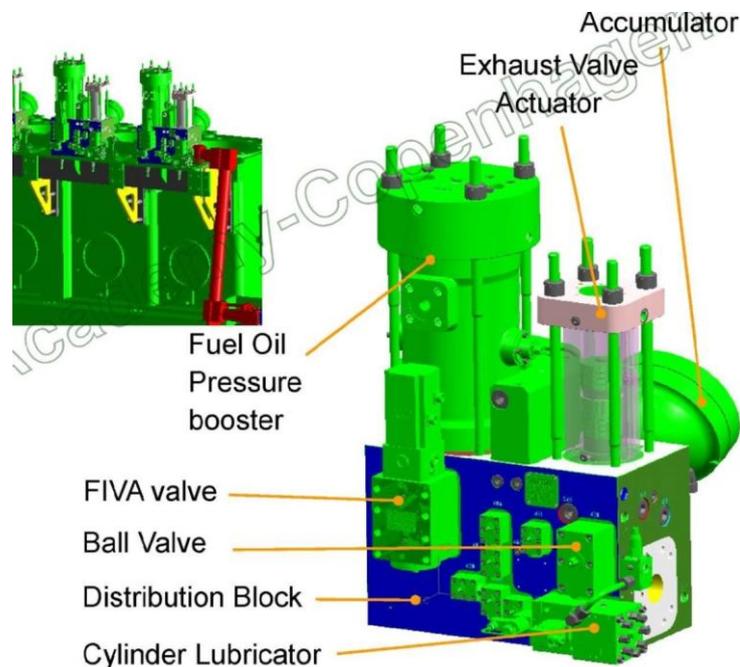


Рис.1.3. Комплектація гідравлічного контрольного блока системи циліндрового смазування LUBECS фірми MAN Diesel&Turbo

Подача мастила в циліндр дизеля здійснюється лубрикатори, схема якого наведена на рис. 1.4.

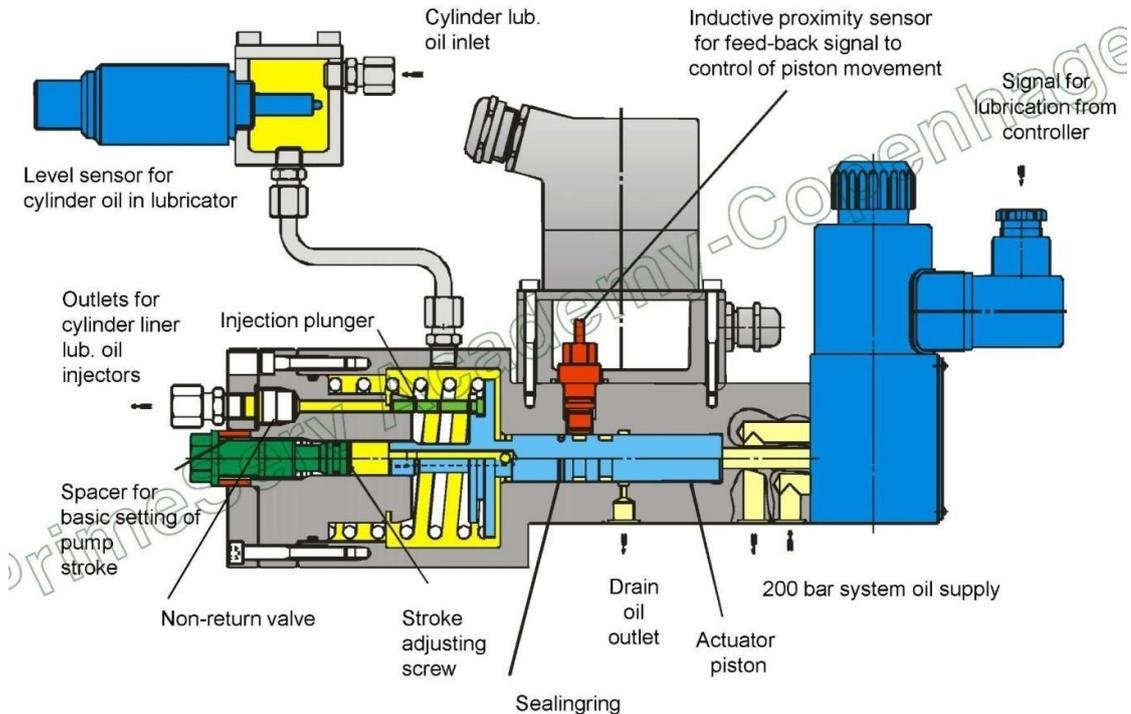


Рис.1.4. Лубрикатор системи змащування LUBECS фірми MAN Diesel&Turbo

1.3.3. Інженерні та конструкторські рішення фірми Hans Jensen

Дана система недавно була протестована в одній з контейнеровозних компаній. Згідно з угодою з судновласником функціональні вузли даної системи встановлюються на нові судна з літа 2014 року.

Система змащування фірми Hans Jensen традиційно забезпечує подачу циліндрового мастила через неповернуті клапана під високим тиском, при цьому подача циліндрового мастила проводиться не в поршневі кільця, а в надпоршневу простір, вгору на втулки із закручуванням потоків циліндрового мастила (SWIRL принцип).

Лубрикатор фірми Hans Jensen показаний на рис. 1.5.

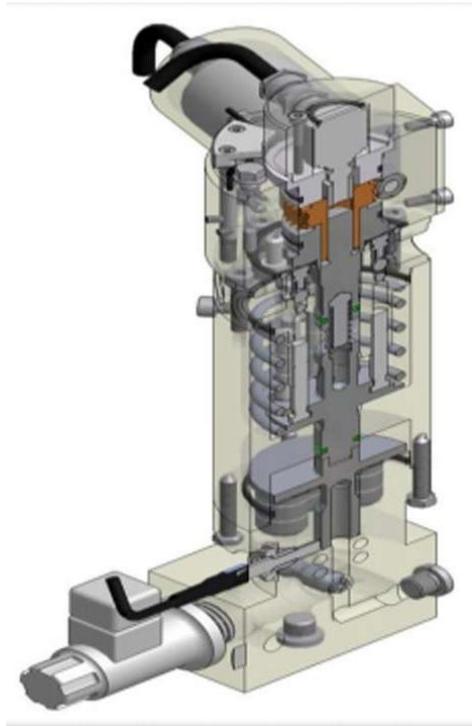


Рис. 1.5. Лубрикатор фірми Hans Jensen

1.3.4. Аналіз загальних рішень в здійсненні мащення циліндрових втулок

В даний час провідні виробники суднових двигунів ведуть посилено розробки для своїх систем змащування циліндро-поршневих груп, багато в чому відштовхуючись своїх інженерних розробок, але основне це досвід експлуатації суднових дизелів в морських умовах. Системи контролю і регулювання подачі циліндрового мастила постійно і регулярно оновлюються (через програмне забезпечення) і фірми постійно контролюють виконання цих вимог.

Аналіз систем циліндрового змащування фірмами Wartsila (система RPLS), MAN Diesel&Turbo (LUBECS), Hans Jensen дозволяє простежити хід

інженерної думки розробників систем і зводиться до визначення загальних рішень і тенденцій в системах:

- установка неповоротних клапанів перед надходженням циліндрового мастила в циліндр;
- -використання системи гідравлічного приводу (гідравлічний актуатор) дозуючих насосів (Lubricators Hydraulic Units);
- -забезпечення точного впорскування циліндрового мастила в точно зазначений момент Центральним Процесором (Контроллером) з урахуванням оборотів, навантаження двигуна і кількості мастила заданого для кожної системи (в обов'язковому порядку включає в себе датчик положення колінчастого валу);
- -забезпечення економії циліндрового мастила за рахунок пропусків ходів поршня (крім, що знаходяться в розробці системи Hans Jensen);

1.4. Аналіз особливостей підходів і принципів в забезпеченні мастила елементів циліндро-поршневої групи

1.4.1. Стратегія фірми Wartsila (RPLS)

Система циліндрового змазування RPLS, розроблена фірмою Wartsila, забезпечує вирішення наступних завдань:

- контроль напрямки вприскування;
- впорскування циліндрового мастила в точно зазначений час процесором з урахуванням положення циліндрових кілець в співвідношенні:
 - 40% -верхні кільця;
 - 40% -нижні кільця;
 - 20% -юбка поршня.

Напрямок уприскування циліндрового мастила вказано на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Напрямок уприскування циліндрового мастила системи RPLS

Економія здійснюється за рахунок пропуску ходів поршня (в описі не вказано— згідно з випробуваннями на пароплаві - не більше 6 ходів поршня в разі малих навантажень, тобто встановлений мінімальний витрата $г / (кВт \cdot ч)$ на кількість ходів поршня - обов'язковий впорскування).

Мінімальний заявлений витрата циліндрового мастила $0,8 г/(кВт \cdot ч)$.

1.4.2. Стратегія фірми MAN Diesel&Turbo

Система циліндрового змазування LUBECS, розроблена фірмою MAN Diesel&Turbo, як і Wartsila вирішує ці ж завдання аналогічним способом – уприскування циліндрового мастила в точно зазначений час процесором без точного розподілу по верхнім, нижнім кільцям поршня. Напрямок уприскування вказано на рис. 1.7.

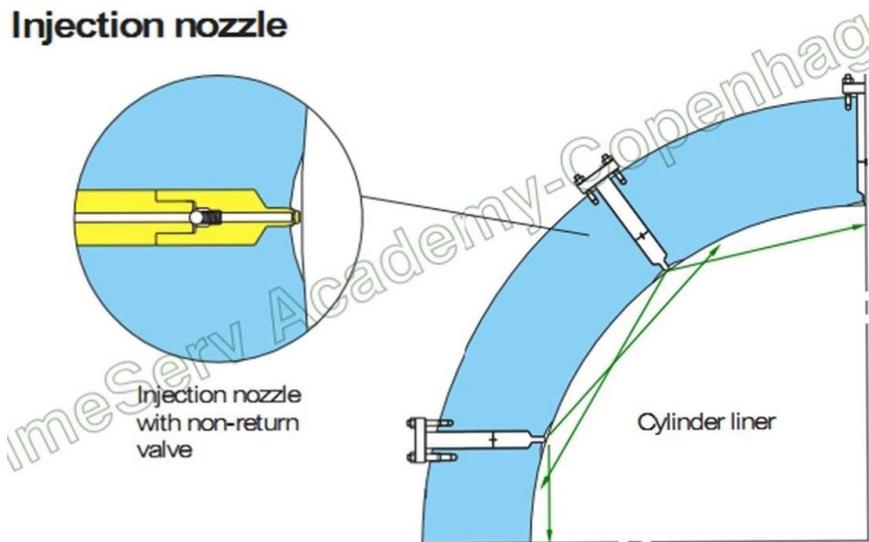


Рис 1.7. Напрямок уприскування циліндрового мастила системи LUBECS

Економія здійснюється за рахунок пропуску ходів поршня (не більше 12 ходів поршня в разі малих навантажень, тобто встановлена мінімальна витрата $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ – обов'язкове уприскування). Мінімальний заявлений витрата циліндрового мастила – $0,6 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$.

1.4.3. Стратегія фірми Hans Jensen

Сама остання система циліндричної мастила фірми Hans Jensen розроблена і випробувана в 2014 році і запущена у виробництво в 2015 році. Фірма пішла іншим шляхом в забезпеченні мастила циліндрових втулок. Основний принцип - уприскування циліндрового мастила відбувається на кожен хід поршня і циліндрові масло надходить над поршнем на циліндричну втулку із закручуванням потоку уприскуваного циліндрового мастила (SWIRL-принцип) за допомогою неповоротних клапанів під високим тиском гідравлічної системи і додатковим імпульсом наддувочного повітря.

Замість традиційних штуцерів з'явилися спеціальні пристрої, що отримали назву Swirl Injection Principle (SIP) – рис. 1.8.

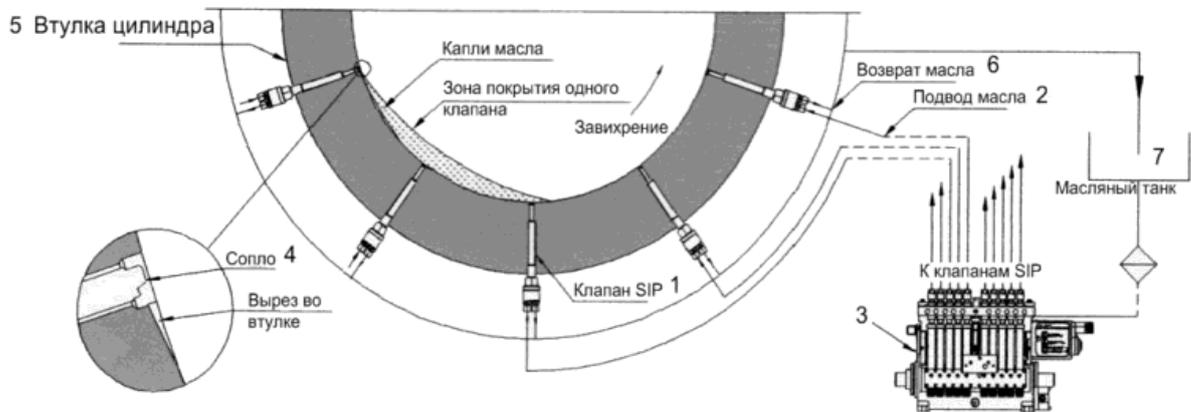


Рис. 1.8. Принципова схема лубрикаторной системи N1 SIP

В системі циліндрового мастила SIP застосовані спеціальні форсунки, розпилюючи циліндровим масло по всьому колу втулки циліндра в верхню її частину. За рахунок хорошого розпилювання і рівномірного розподілу циліндрового мастила по поверхні втулки циліндра під час кожного циклу можна домогтися задовільного стану поверхонь, що труться, використовуючи меншу кількість мастила, в порівнянні зі звичайною системою змащення. Кожна форсунка SIP має сопло, завдяки якому при певному тиску в трубопроводі здійснюється розпил циліндрового мастила. Його надлишки і витоку не потрапляють в циліндр, а за допомогою поворотного трубопроводу стікають в цистерну мастила. Система SIP дозволяє скоротити витрату циліндрового мастила більш ніж на 60% при відмінному стані поверхні циліндричної втулки і поршневих кілець.

Напрямок уприскування вказано на рис. 1.9.

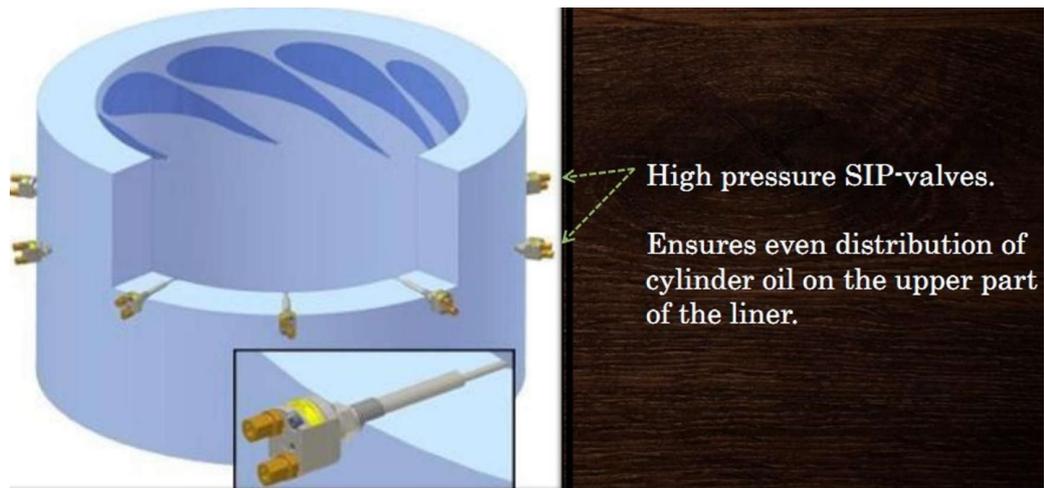


Рис 1.9. Напрямок уприскування циліндрового мастила системи Hans Jensen

На рис. 1.10 показана поверхня, що покривається мастильною плівкою при традиційній системі циліндрового мащення і при використанні лубрикаторної системи Hans Jensen.

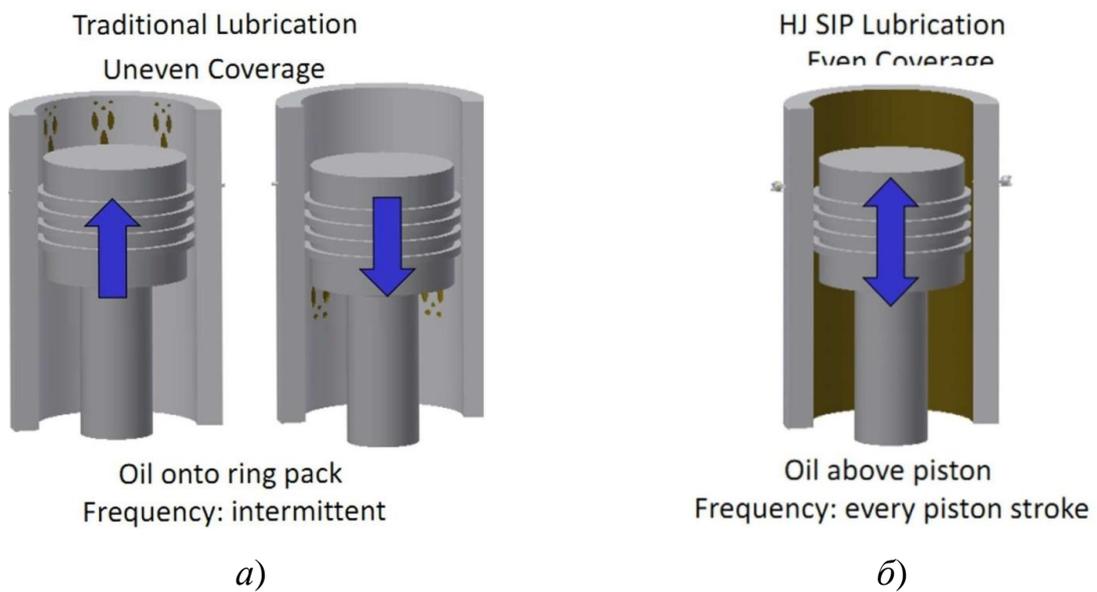


Рис 1.10. Поверхня, що покривається мастильною плівкою на традиційній системі циліндрового мащення (а) і на системі циліндрового мащення фірми Hans Jensen (б)

1.5. Висновки за розділом 1

В результаті проведеного аналізу 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) форсировка судових МОД за ступенем наддуву призводить до підвищених динамічним і тепловим навантаженням на деталі ЦПГ і КШМ, що посилює вимоги до експлуатаційних характеристик ММ, що забезпечує надійну роботу всіх елементів дизеля;

3) найбільші теплові навантаження відчують ММ, що використовуються в системах змащування циліндричної групи судових МОД, оскільки забезпечують режими не тільки режими змащування, а й охолодження ЦПГ.

Наведені факти свідчать про необхідність досліджень, що спрямована на підвищення ефективності роботи циліндрових систем мащення судових МОД, яке може бути досягнуте за рахунок забезпечення гідродинамічного режиму мащення, або граничного режиму мащення без контактних взаємодій.

2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Процес наукового пізнання

Наукове пізнання починається із спостереження навколишньої дійсності – природи, техніки, технологій і т.і. Процес наукового пізнання включає, щонайменше, п'ять етапів: спостереження, вивчення, дослідження, апробацію й підтвердження [26]. На етапі спостереження дослідник накопичує інформацію про явища й процеси навколишньої дійсності, не впливаючи на неї. Спочатку формується загальне враження про пізнаванність явищ або процесів, потім здійснюється угруповання фактів дійсності за певними важливими ознаками з наступним виділенням із цих груп проблемних (не зрозумілих або не очевидних) фактів дійсності [27].

Етап вивчення необхідний для вибору найбільш актуальної, принципової й вчасно розв'язуваної в результаті наступних досліджень, наукової проблеми або завдання. При цьому необхідно спочатку спланувати й систематизувати дослідження в цьому напрямку.

Об'єктом наукового дослідження є процес, явище, матеріальна або ідеальна система. Предмет дослідження – це параметри внутрісистемної структури.

Головне завдання дослідження спрямоване на встановлення умов досягнення мети після одержання нових наукових результатів, що є наслідком рішення ряду допоміжних наукових завдань.

При постановці головного завдання дослідження виходять із необхідності доказу реальності передбачуваної наукової новизни. Передбачувана наукова новизна представляє нову ідею, гіпотезу, закономірність або наукову тезу про шляхи досягнення поставленої мети [28].

Процес рішення головного завдання традиційно розділяється на ряд самостійних допоміжних завдань, результати рішення яких мають елементи

наукової новизни. Наукові результати надалі використовуються при доказі передбачуваної наукової новизни дослідження [29].

Наукове дослідження є процесом виробітку нових наукових знань, одним з видів пізнавальної діяльності. Наукове дослідження характеризується об'єктивністю, відтворюваністю, доказовістю й точністю, що може по різному визначатися в різних галузях науки.

На етапі апробації відбувається обговорення постановки, методології й результатів досліджень на різних рівнях: науково-технічних семінарах, конференціях, симпозіумах, наукових і координаційних радах і т.п.

Етап підтвердження припускає закінчення процедур апробації й публікації доказів і підтверджень у вигляді наукових положень і наукових результатів досліджень на підставі оцінки їхніх переваг і недоліків відповідно до вимог до висновки з наукової праці.

Одним з важливих елементів підтвердження є впровадження. Під ним розуміють імплементацію нових видів конструкцій, матеріалів, прогресивних технологій із застосуванням нових механізмів, пристосувань і т.д.

2.2. Методологічні принципи наукових досліджень

З філософської точки зору методологія – це навчання про формування пізнання й перетворення дійсності, застосування принципів світогляду до процесу пізнання, духовній творчості й практиці.

Метод – це послідовність дії для досягнення якої-небудь мети, рішення конкретного завдання, сукупність прийомів або операцій практичного або теоретичного пізнання дійсності.

Приступаючи до наукового пошуку доцільно розробити технологічну карту дослідження (рис. 2.1).

2.3. Обґрунтування мети і завдань дослідження

Важливість проведення досліджень, пов'язаних з питаннями забезпечення режимів мащення циліндрової групи судових МОД, підтверджується програмою економічних реформ, що проводяться в Україні, а також Транспортною стратегією України на період до 2030 р. Однією з цілей цього документа в області розвитку транспортного сектора економіки України на період до 2030 року, є модернізація транспортної інфраструктури і рухомого складу для забезпечення зростаючої мобільності населення та товаропотоків, забезпечення конкурентоспроможних та якісних транспортних послуг, підвищення екологічної і енергетичної ефективності транспортних процесів та безпеки перевезень пасажирів і вантажів.

Крім того, проведення подібних досліджень узгоджується з вимогами резолюцій МЕРС.203 (62) і МЕРС.213 (63) Міжнародної морської організації про введення нових правил енергетичної ефективності суден і про розробку плану енергетичної ефективності судна. В останній, зокрема, в якості одного із способів підвищення енергетичної ефективності розглядається вдосконалення технічної експлуатації судових дизелів.

Як об'єкт дослідження обрано процес мащення циліндрової групи судових мало-оберткових двигунів внутрішнього згорання.

Предметом дослідження є технічний стан пари тертя втулка циліндра-поршневе кільце судового МОД.

Актуальність теми дослідження базується на запиті практики про необхідність пошуку нових шляхів збереження працездатного стану циліндрової групи судових МОД.

З огляду на тему дипломної роботи, була сформульована мета магістерського дослідження – збереження необхідного технічного стану циліндро-поршневої групи судових МОД.

Гіпотеза наукового дослідження полягає в тому, збереження необхідного технічного стану циліндро-поршневої групи судових МОД можливо шляхом забезпечення гідродинамічного режиму мащення пари тертя циліндрова втулка-поршневе кільце або граничного режиму мащення без контактних взаємодій.

Головне завдання магістерського дослідження полягає у визначенні найбільш інформативного методу контролю технічного стану циліндро-поршневої групи судових МОД в умовах експлуатації морського судна.

Для розв'язання головного завдання необхідне розв'язання ряду допоміжних завдань, а саме:

1) оптимізація технічної експлуатації циліндрової групи судових МОД за результатами її трибо-моніторингу;

2) дослідження явища стратифікації в'язкості моторного мастила у парі тертя втулка-поршневе кільце при експлуатації судових МОД;

3) визначення найбільш ефективного способу, що сприяє підтриманню гідродинамічного режиму мащення та попередженню безпосереднього контакту пари тертя втулка-поршневе кільце.

При вирішенні кожної допоміжної завдання отримані відповідні наукові результати, а саме:

1) визначені основні показники, що характеризують якість технічної експлуатації циліндрової групи судових МОД;

2) визначено діапазон зміни в'язкості моторного мастила у парі тертя втулка-поршневе кільце при експлуатації судових МОД;

3) визначені способи обробки поверхонь тертя циліндрової групи та зміни молекулярної побудови змащувальних шарів моторного мастила.

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

2.4. Висновки за розділом 2

1. В результаті вибору теми магістерського наукового дослідження за ознаками актуальності, наукової новизни, практичної значущості сформульована тема, спрямована на пошук нових шляхів збереження працездатного стану циліндрової групи суднових МОД за рахунок забезпечення гідродинамічного режиму мащення пари тертя втулка-поршневе кільце, або режиму граничного мащення без контактних взаємодій.

Об'єктом дослідження обрано процес мащення циліндрової групи суднових мало-обертових двигунів внутрішнього згорання.

Предметом дослідження є технічний стан пари тертя втулка циліндра-поршневе кільце судового МОД.

2. Метою дослідження є збереження необхідного технічного стану циліндро-поршневої групи суднових МОД.

3. Головне завдання магістерського наукового дослідження полягає у визначенні найбільш інформативного методу контролю технічного стану циліндро-поршневої групи суднових МОД в умовах експлуатації морського судна.

4. Розв'язання головного завдання магістерського наукового дослідження виконано на основі синтезу результатів допоміжних завдань. На базі системного підходу замкнутий цикл наукового дослідження представлений у вигляді технологічної карти дослідження.

3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕЖИМІВ МАЩЕННЯ ЦИЛІНДРОВОЇ ГРУПИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТРИБОМОНІТОРИНГА

Третій розділ присвячений розв'язанню першого допоміжного завдання магістерського наукового дослідження, яким є оптимізація технічної експлуатації циліндрової групи судових МОД за результатами її трибомоніторингу.

3.1. Оптимізації технічної експлуатації циліндрової групи двигунів внутрішнього згоряння методом багатокритеріального підходу

При експлуатації судових крейцкопфних МОД основні дефекти, відмови і експлуатаційні витрати припадають на деталі ЦПГ [30]. Існуючі в даний час схеми управління по станам засновані на ймовірнісно-статичному аналізі надійності. Постановка завдання досягнення оптимального управління будується на припущенні, що можливо здійснити оптимальне з точки зору економічності і надійності в роботі управління. Відповідне підмножина станів назовемо «оптимальним до управління».

Кращим є рішення задачі оптимізації технічної експлуатації ДВЗ методом багатокритеріальної оптимізації як для процесу технічного обслуговування (ТО), так і для процесу мінімізації витрат при технічній експлуатації.

В реальних задачах вибору найкращого рішення, що виникають на практиці, як правило, присутні кілька критеріїв оптимальності. Найбільш поширена завдання, яке вирішують в експлуатації, – це пошук технічних

рішень, які б мінімізували витрати на ТО, змінно-запасні частини, паливо та мастило при одночасному збільшенні ресурсних показників ДВЗ за рахунок зниження швидкості зношування основних деталей.

Завдання вибору деякого рішення з безлічі допустимих рішень з урахуванням кількох критеріїв оптимальності отримали назву багатокритеріальної задачі оптимізації, яка вперше була сформульована італійським економістом В. Парето [31].

Під багатокритеріальним завданням ми розуміють не власне опис завдання, а її модель, а саме: «багатокритеріальна задача – математична модель прийняття оптимального рішення за кількома критеріями.

Ці критерії відображають оцінки різних якостей об'єкта, з приводу яких приймається рішення [32].

Формально багатокритеріальна задача як модель задається у вигляді

$$\begin{aligned} F(x) &\rightarrow \max, \\ x &\in D; \end{aligned} \tag{3.1}$$

де D – безліч допустимих рішень;

$F(x)$ – векторна функція векторного аргументу x , яку можна уявити як $F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\}$ – скалярні функції векторного аргументу x , кожна з яких є математичним виразом одного критерію оптимальності. Так як в даній моделі використовується векторна цільова функція, її часто називають завданням векторної оптимізації. Очевидно, що завдання (3.1) не належить класу задач математичного програмування, так як моделі цього класу задач містять завжди тільки одну цільову функцію векторного аргументу, а тут представлений їх набір. Інакше завдання (3.1) можна переписати у вигляді

$$\begin{cases} f_1(x) \rightarrow \max, \\ f_2(x) \rightarrow \max, \\ f_k(x) \rightarrow \max, \\ x \in D. \end{cases} \quad (3.2)$$

Сутність поставленого завдання полягає в знаходженні такого її допустимого рішення, тобто $\{x \in D\}$, яке в тому чи іншому сенсі максимізує (мінімізує) значення всіх цільових функцій $f_i(x), i = 1, k$. Існування рішення, буквально максимізує всі цільові функції, є рідкісним винятком.

Звідси випливає, що принциповим моментом при вирішенні такого роду завдань є попередня домовленість, а що вважати найкращим рішенням, тобто треба домовитися про використаний принцип оптимальності. Використовуваний в задачах математичного програмування принцип оптимальності – «добре те, що приносить найбільше (найменше) значення наявного єдиним критерієм оптимальності» - в багатокритеріальних задачах очевидно «не працює» [31].

Завдання векторної оптимізації в загальному випадку не має строго математичного рішення. Для отримання того чи іншого її рішення необхідно використовувати додаткову суб'єктивну інформацію фахівця в даній галузі, якого прийнято називати особою, яка приймає рішення, в англійській мові – decision maker. Це означає, що при вирішенні завдання фахівцями із залученням різних джерел інформації, скоріше за все, будуть отримані різні відповіді [31].

Завдання векторної оптимізації в даний час прийнято розглядати в рамках теорії прийняття рішень, основною особливістю завдань якої є наявність невизначеності. Ця невизначеність не може бути виключена з допомогою різних прийомів моделювання та об'єктивних розрахунків. В багатокритеріальних задачах невизначеність полягає в тому, що невідомо, яким критерієм віддати перевагу і в якій мірі. Для усунення цієї

невизначеності необхідно, по-перше, сформулювати спеціальний принцип оптимальності, а також залучити додаткову суб'єктивну інформацію, засновану на його досвіді і інтуїції.

3.2. Оптимізації технічної експлуатації циліндрової групи судових мало-обертових дизелів за результатами трибо-моніторингу

Розглянемо загальні підходи до розв'язуваної задачі оптимізації технічної експлуатації судових ДВЗ за результатами трибо-моніторингу. Нехай вирішується завдання (3.1) і $x', x'' \in D$ – допустимі рішення даної задачі. Кажуть, що x' – більш детально визначений рішення в порівнянні з x'' , якщо $f_i(x') \geq f_i(x'')$. Іншими словами, будемо вважати, що рішення x' більш переважно в порівнянні з рішенням x'' , якщо воно не гірше за всіх розглянутих критеріям, причому серед всіх критеріїв є хоча б один критерій з номером i_0 , для якого рішення x' краще, ніж x'' .

Деякий рішення $x' \in D$ задачі (3.1) називається ефективним рішенням даної задачі, якщо для нього не існує більш бажаних рішень. Інакше можна сказати, що ефективним рішенням називається таке рішення, яке не можна поліпшити за будь-якою з критеріїв, які не погіршивши при цьому значення інших критеріїв.

Безліч ефективних рішень називається безліччю Парето і позначається $P(D)$. Принцип Парето: сенс введеного поняття ефективного вирішення полягає в тому, що оптимальне рішення слід шукати тільки серед елементів множини Парето – безлічі $P(D)$. В іншому випадку завжди знайдеться точка

х, що виявляється більш кращою незалежно від розстановки пріоритетів і щодо важливості окремих приватних критеріїв.

Принцип Парето дозволяє звужити клас можливих претендентів на остаточне рішення і виключити з розгляду свідомо не здатні на конкуренцію варіанти. А остаточний вибір здійснюється на основі додаткової інформації про перевагу особи, що приймає рішення.

Таким чином, ефективне управління технічною експлуатацією деталей ЦПГ крейцкопфних МОД, представленої в цілеспрямованому вигляді, буде відображено двома взаємовиключними критеріями: зниженням витрат на циліндрові мастило f_E і мінімізацією швидкості зношування деталей ЦПГ f_3 і, як наслідок, зменшенням експлуатаційних витрат на запасні частини, паливо, мастило, ТО.

Функції f_E , f_3 – невід'ємні, опуклі, монотонно зростаючі функції, які можуть бути апроксимувати рівняннями будь-якого виду, в тому числі і на окремих ділянках.

Дані технічної експлуатації деталей ЦПГ крейцкопфних МОД, представлені провідним дизелебудівному концерном MAN Diesel&Turbo [32] (рис. 3.1, 3.2), дають можливість здійснити Парето – оптимальне управління на практиці.

Аналогічні результати можна отримати і в умовах рядовий експлуатації конкретної судноплавної компанії.

З представлених результатів слід, мінімум функції f_E досягається там, де величина швидкості зношування досить висока, і навпаки. Крім того, тут очевидна тільки взаємозв'язок між швидкістю зношування і витратами на запасні частини, паливо, мастило та технічне обслуговування. Це дає можливість провести конструювання простору станів об'єкту.

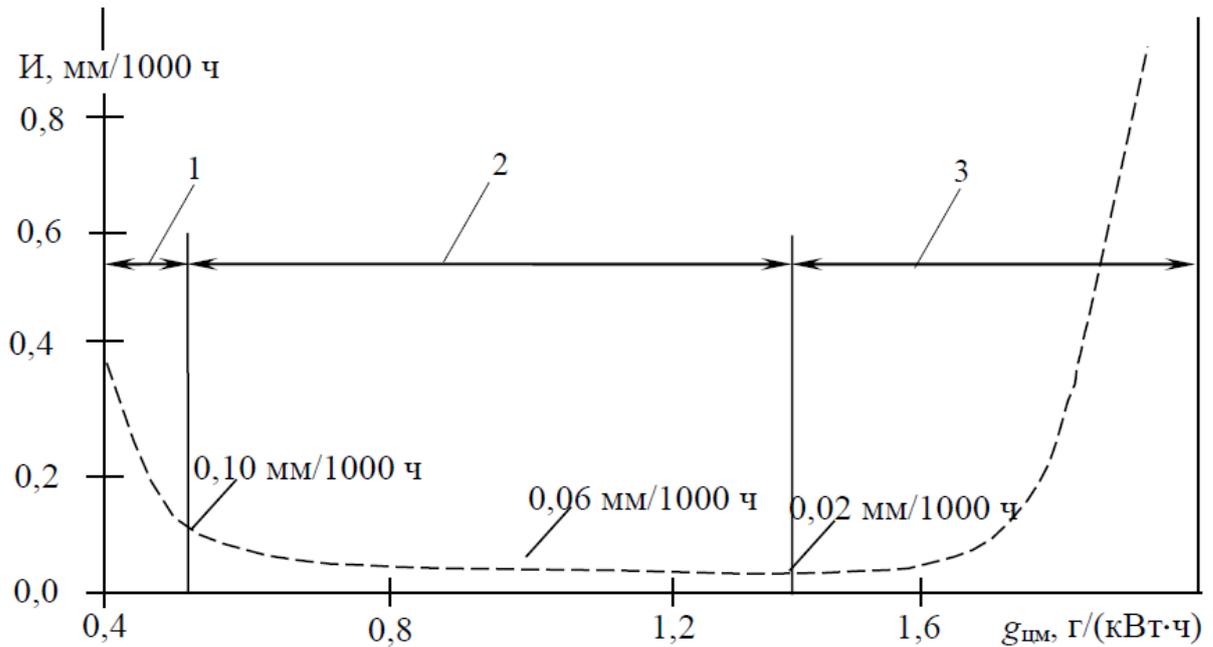


Рис. 3.1. Знос циліндрової втулки:

- 1 – високий знос через «мастильне голодування»; 2 – нормальний знос;
3 – високий знос через полірування дзеркала циліндрової втулки

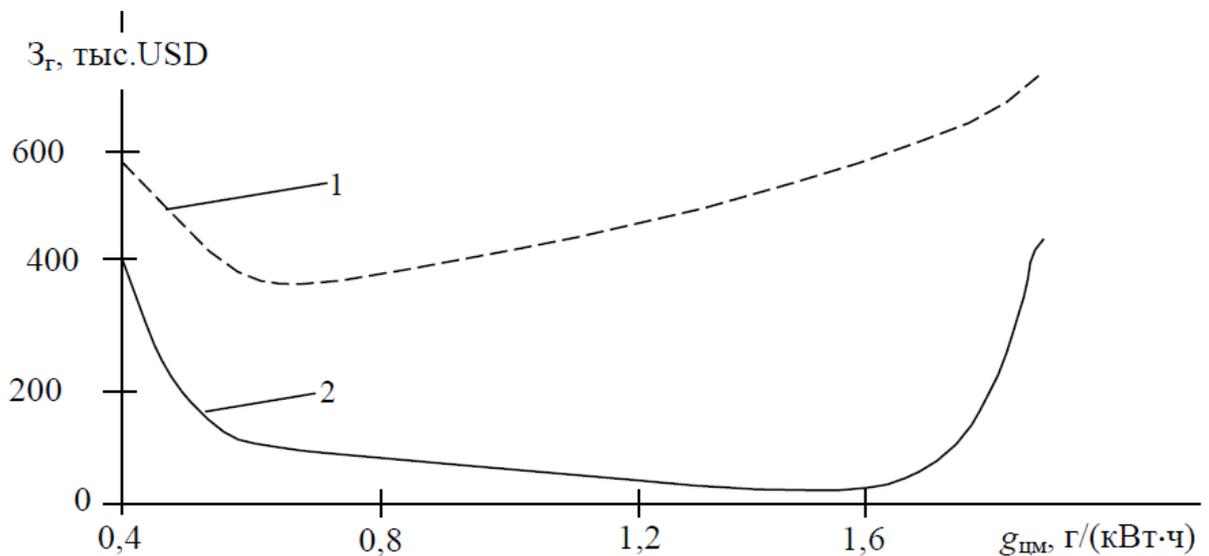


Рис. 3.2. Експлуатаційні витрати на деталі ЦПГ крейцкопфних МОД

З викладеного випливає, що одночасна мінімізація критеріїв f_{Σ} , $f_{И}$ неможлива, так як при цьому виникають взаємовиключні вимоги. З чого випливає, що завдання ресурсозберігаючого економічно ефективного

управління технічною експлуатацією деталей ЦПГ крейцкопфних МОД класифікується як задача багатокритеріальної векторної оптимізації. Для її вирішення необхідно формалізувати цільові функції.

Обробка даних технічної експлуатації деталей ЦПГ крейцкопфних МОД (див. рис. 3.1, 3.2) дозволила отримати цільові функції $f_3(Z_{\text{ЦПГ}})$, $f_E(g_e^{\text{ЦМ}})$ у вигляді лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} f_3(Z_{\text{ЦПГ}}) &= 101,06 \cdot Z_{\text{ЦПГ}} + 0,0947; \\ f_E(g_e^{\text{ЦМ}}) &= 355,52 g_e^{\text{ЦМ}} + 6,9137; \end{aligned} \quad (3.3)$$

де $Z_{\text{ЦПГ}}$ – швидкість зношування циліндричної втулки в верхньому поясі, мм/1000 год,

$g_e^{\text{ЦМ}}$ – питома ефективна витрата циліндрового масла, г/(кВт·год).

Квадрати коефіцієнтів множинної кореляції R^2 склали відповідно 0,988 і 0,9989, що свідчить про високий рівень достовірності отриманих математичних залежностей.

Додатково слід також встановити взаємозв'язок між величинами $Z_{\text{ЦПГ}}$ і $g_e^{\text{ЦМ}}$. Вона описується поліномом шостого ступеня такого вигляду:

$$\begin{aligned} Z_{\text{ЦПГ}} = & 0,5671(g_e^{\text{ЦМ}})^6 - 3,96(g_e^{\text{ЦМ}})^5 + 11,755(g_e^{\text{ЦМ}})^4 - 19,049(g_e^{\text{ЦМ}})^3 + \\ & + 17,721(g_e^{\text{ЦМ}})^2 - 8,9448(g_e^{\text{ЦМ}}) + 19639. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Квадрат коефіцієнта множинної кореляції $R^2=0,9944$, що свідчить про хорошу збіжність розрахункових і експериментальних даних.

Таким чином, формалізація задачі багатокритеріальної векторної оптимізації управління технічною експлуатацією деталей ЦПГ крейцкопфних МОД може бути записана в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} f_3(z_{\text{ЦПГ}}) &\Rightarrow \min; \\ f_E(g_e^{\text{ЦМ}}) &\Rightarrow \min; \\ z_{\text{ЦПГ}} &= F(g_e^{\text{ЦМ}}); \\ 0,02 &< z_{\text{ЦПГ}} < 0,12; \\ 0,4 &< g_e^{\text{ЦМ}} < 0,18. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Записана завдання векторної оптимізації має рівнозначні критерії, так як відсутній пріоритет в будь-якому критерії. Методи вирішення таких завдань засновані на нормалізації критеріїв і принципі гарантованого результату [33].

Нормалізація критеріїв передбачає зведення їх до безрозмірного вигляду за допомогою спеціального перетворення. Це перетворення має задовольняти, по крайній мере, таким умовам:

- мати загальне початок відліку і один порядок зміни значень на всій множині допустимих рішень;
- бути монотонним перетворенням, так як має зберігати відношення переваги на множині D , тобто не змінювати безліч Парето;
- враховувати необхідність мінімізації відхилення від оптимальних значень по кожній цільовій функції.

Для отримання такого роду нормалізованих критеріїв $\omega_i(x)$ в якості таких перетворень $W_i(f_i(x))$ використовують такі:

$$W_i(f_i(x)) = \omega_i; x = \begin{cases} \left[\frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right]^{\mu} \in 0,1 \\ \left[\frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max}} \right]^{\mu} \in 0,1 \end{cases}$$

де $\mu=1,2$, як правило, вважають $\mu=1$; f_i^{\max}, f_i^{\min} – найбільше та найменше значення і-го критерію (найбільша і найменша ефективна оцінка) відповідно.

Причому $\omega_i(x) \rightarrow \min$, тобто мінімізується різниця між шуканим рішенням і субоптимальних.

Виконаємо зазначену нормалізацію для наших критеріїв (3.5)

$$W(f_3(z_{\text{ЦПГ}})) = \omega(z_{\text{ЦПГ}}) = 120946,9 - \frac{101,06 \cdot z_{\text{ЦПГ}} + 0,0947}{120946,9 - 20000} = 1,2 - 10,053 \cdot z_{\text{ЦПГ}}. \quad (3.6)$$

$$W(f_E(g_e^{\text{ЦМ}})) = \omega(g_e^{\text{ЦМ}}) = 6838,15,1 - \frac{355,52 g_e^{\text{ЦМ}} + 6,9137}{683815,1 - 176139,1} = 1,286 - 0,714 g_e^{\text{ЦМ}}. \quad (3.7)$$

Виконані розрахунки критеріїв у найкращій і найгіршою точках дають після нормалізації значення, рівні відповідно 1 і 0. Таким чином, ми отримали наведену область безлічі допустимих рішень задачі управління технічною експлуатацією деталей ЦПГ крейцкопфних МОД.

3.3. Висновки за розділом 3

Як основні висновки по розділу визначимо наступне:

1) математичне моделювання режимів мащення циліндрової групи судових МОД необхідне на підставі багатокритеріальної оптимізації;

2) кращим є рішення задачі оптимізації технічної експлуатації ДВЗ методом багатокритеріальної оптимізації як для процесу технічного обслуговування, так і для процесу мінімізації витрат при технічній експлуатації при цьому найбільш доцільно використовувати результати трибо-моніторингу технічного стану циліндрової групи судового МОД;

3) як критерії оптимізації найбільш доцільно використовувати два взаємовиключні критерії: зниженням витрат на циліндрові мастило f_E і мінімізацією швидкості зношування деталей ЦПГ f_3 ;

4) обробка даних технічної експлуатації деталей ЦПГ крейцкопфних МОД дозволяє цільові функції критеріїв зниженням витрат на циліндрові мастило f_E та мінімізацією швидкості зношування деталей ЦПГ f_3 прийняти у вигляді лінійних рівнянь.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРАТИФІКАЦІЇ В'ЯЗКОСТІ МОТОРНОГО МАСТИЛА В ВУЗЛАХ ТЕРТЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Четвертий розділ присвячений розв'язанню другого допоміжного завдання магістерського наукового дослідження, яким є дослідження явища стратифікації в'язкості моторного мастила у парі тертя втулка-поршневе кільце при експлуатації суднових МОД.

4.1. Суднове моторне мастило як дисперсна система

Нафта і похідні від неї нафтові системи (нафтові палива і нафтові мастила) є предметом вивчення багатьох природничих наук, кожна з яких вносить певний внесок у розвиток уявлень про будову і структуру цих систем [34]. З точки зору органічної хімії нафтові мастила – це суміш низько- і високомолекулярних сполук, що відносяться до різних гомологічних рядів. З позицій колоїдної хімії ММ, що отримується з нафти, – це складна багатокомпонентна суміш, яка в залежності від зовнішніх умов проявляє властивості молекулярного розчину або дисперсної системи. При цьому система набуває:

- 1) структурно-механічну міцність;
- 2) нестійкість, здатність до розшарування на фази.

Структурно-механічна міцність системи підвищує мастильну здатність моторного мастила. Особливо актуальним придбання даної властивості є для режимів граничного змащування, коли в змащувальному шарі виникає додатковий розклинюючий тиск, що підвищує несучу здатність мастильного клина.

Робота моторного мастила в судових дизелях супроводжується зміною його фізико-хімічного стану, в тому числі деформацією. Для мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні контакту, характерні основні ознаки деформації: наявність прикладеної ззовні механічної сили і зміна форми, яке полягає в зміщенні частинок тіла (в даному випадку молекул) відносно один одного. У разі розгляду вузла тертя поршневі кільця - втулка циліндра в якості механічної сили на молекули мастила діє нормальна сила, що притискає поршень до стінки циліндра. При цьому прикладена навантаження викликає поява внутрішніх сил, які протидіють зовнішнім зусиллям, які дорівнюють, але протилежні їм за напрямком. У змащувальному шарі виникає напруга P , що дорівнює відношенню сили F до одиниці площі S :

$$P = \frac{F}{S}.$$

Силу і напруга можна розділити на нормальні (тиск) і дотичні (напруга зсуву). Для пари тертя поршневі кільця - циліндрова втулка деструктуючих дію на масляний шар надає саме напруга зсуву, що сприяє зриву молекул мастила з контактуючих поверхонь.

Таким чином, реологічні характеристики мастильного матеріалу, що знаходиться в трибосопрязений поршневі кільця - циліндрова втулка, найбільш характеризує напруга зсуву, яке може бути визначено як

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (4.1)$$

Закон Ньютона для так званих істинно-в'язких (ньютоновських) рідин пов'язує зовнішню напругу і швидкість переміщення окремих шарів:

$$P = \frac{F}{S} = \eta \frac{du}{dx}, \quad (4.2)$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с;

$\frac{du}{dx}$ – градієнт швидкості [34].

Коефіцієнтом пропорційності в цій формулі є η – динамічна в'язкість системи, що є матеріальною константою рідини при даній температурі.

З урахуванням (4.1) вираз (4.2) можна записати як

$$\tau = \eta \cdot \gamma', \quad (4.3)$$

де γ' – швидкість зсуву.

Напруга зсуву і швидкість зсуву можуть бути проілюстровані моделлю паралельних площин (рис. 4.1), аналогічної процесам тертя в парі поршневі кільця - циліндрова втулка.

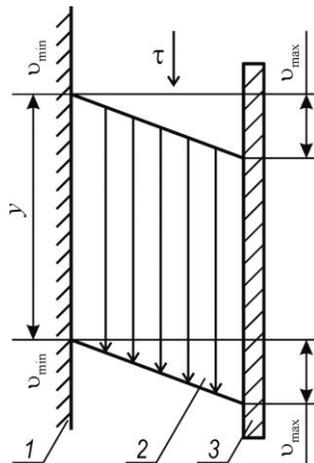


Рис. 4.1. Модель течії рідини між паралельними площинами:

1 – нерухома площина; 2 – рідина; 3 – рухома площина

Напруга зсуву τ викликає характерну картину пошарового розподілу швидкостей в шарі рідини. Максимальна швидкість течії v_{\max} спостерігається біля кордону розділу рідини з рухомою площиною. У міру віддалення від рухомої площини швидкість течії знижується і на відстані y від неї, на кордоні з нерухомою площиною, $v_{\min} = 0$. швидкість зсуву γ' є

градієнт швидкості поперек зазору і математично виражається у вигляді диференціала:

$$\gamma' = \frac{dv}{dy}, \quad \frac{M/c}{M} = c^{-1}. \quad (4.4)$$

Співвідношення між напругою зсуву і швидкістю зсуву, що характеризує поведінку рідини при перебігу, графічно зображується у вигляді кривої, на якій по осі ординат відкладають значення напруги зсуву τ , а по осі абсцис значення швидкості зсуву γ' . Такий графік називають «кривою течії».

Найбільш простий тип кривої течії наведено на рис. 4.2, а. При цьому в'язкість в рівнянні (4.3) вважають постійною і не залежить від швидкості зсуву. В цьому випадку графічним еквівалентом рівняння Ньютона (4.3) буде пряма лінія з нахилом α , яка виходить із початку координат (рис. 4.2, а). Будь-яка точка на цій прямій визначається двома величинами: τ і γ' . Розподіл першої величини на другу дає значення η . значення η може бути також визначено як тангенс кута α .

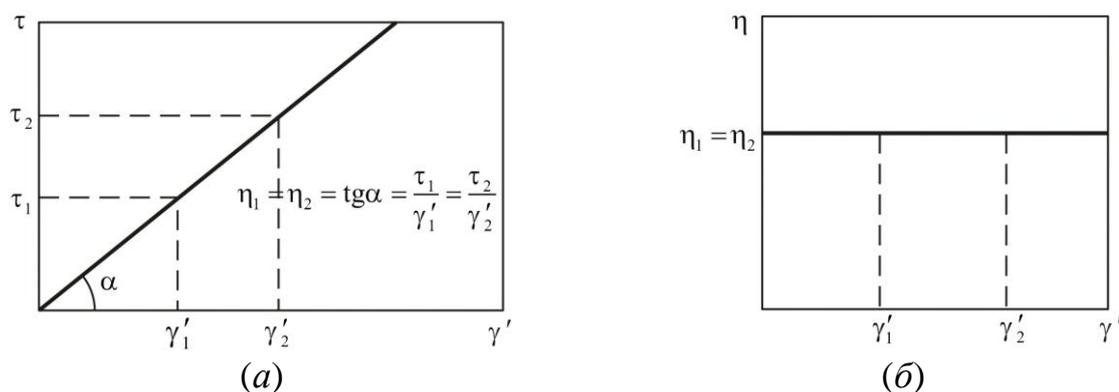


Рис. 4.2. Криві течії (а) і в'язкості (б) ньютонівської рідини

Інший широко використовується діаграмою є залежність $\eta=f(\gamma')$, така діаграма називається «кривою в'язкості» (рис. 4.2, б). Так як ньютонівської

рідини крива течії насправді являє собою пряму лінію, ставлення всіх пар величин τ і $\dot{\gamma}$, лежать на цій лінії, постійно. Це означає, що зміна швидкості зсуву не впливає на η .

Поряд з нормальними рідинами є аномально-в'язкі системи, що проявляють підвищену в'язкість при невеликих тисках; це пов'язано з утворенням в них своєрідних просторових структур внаслідок взаємодії частинок дисперсної фази.

Більшість дисперсних систем має аномальний характер в'язкості, тобто вони не підкоряються закону Ньютона. Такі системи (а, отже, і рідини їх утворюють) називаються неньютоновськими. В'язкість таких систем є функцією напруги, зрушення. Основною причиною аномальної в'язкості може бути просторова структура, що виникає при взаємодії частинок дисперсної фази між собою. За своїм реологічним властивостями структуровані системи займають проміжне положення між рідинами і твердими тілами. До подібних систем можна віднести структуровані тонкі шари мастильного матеріалу, що знаходиться у вузькому зазорі металевих пар тертя поршневі кільця - втулка циліндра [36].

Неньютоновських рідин значно більше, ніж ідеальних рідин. До них відносяться ділатантні рідини і псевдопластичні рідини, напруга зсуву і в'язкість яких залежать від швидкості зсуву. Криві течії і в'язкості цих рідин показані на рис. 4.3 [35].

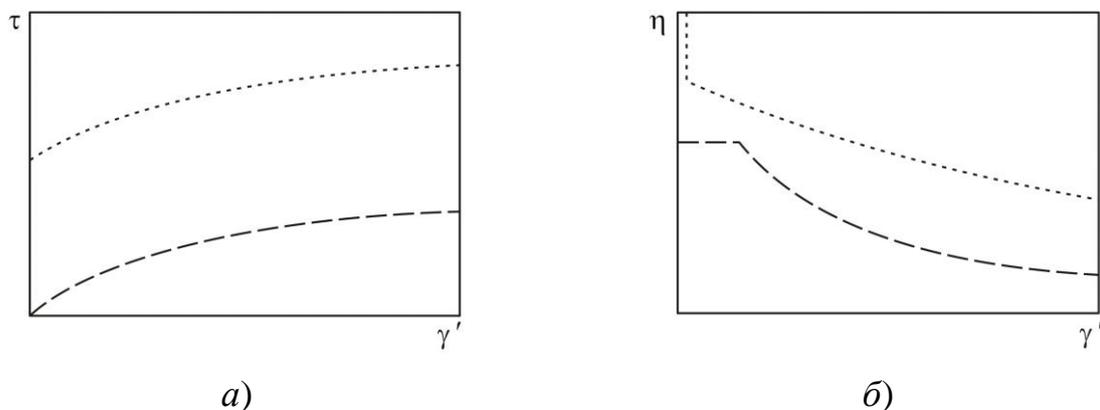


Рис. 4.3. Криві течії (а) і в'язкості (б) неньютоновських рідин

Пластичні течії дисперсних систем описуються рівнянням Бінгама-Шведова:

$$P - P_d = \eta' \frac{du}{dx},$$

де η' – в'язкість, відповідна пластичного течією системи;

P_d – межа плинності, тобто то критичне напруження зсуву, яке необхідно для руйнування структури і початку перебігу.

В області напруг менше P_d система проявляє пружні властивості, при $P > P_d$ спостерігається пластична деформація. В разі $P_d = 0$, рівняння Бінгама-Шведова переходить в рівняння Ньютона [37].

4.2. Трибологічні характеристики системи поршневе кільце - циліндрова втулка суднового двигуна внутрішнього згоряння

Основним компонентом системи поршневе кільце - циліндрова втулка на який можливо накладати керуючий вплив, є мастильний матеріал. Його властивості та характеристики визначаються не тільки його власною структурою, а й залежать від впливу металевих поверхонь, які він поділяє [38]. Мастильний матеріал, що знаходиться в трибосполученні поршневі кільця - циліндрова втулка, володіє індивідуальними властивостями, які не змінюються в «базовому» варіанті в незалежності від системи, в якій він знаходиться, і агрегатними властивостями.

Характеристики мастильного матеріалу, що входить в систему поршневі кільця - мастильний шар - втулка циліндра, як правило описуються з точки зору гідродинамічної теорії мастила [39]. При цьому враховуються тільки «об'ємні» властивості мастильного матеріалу, і не розглядаються аномалія

цих властивостей, що відбувається в тонких граничних шарах і обумовлює їх рідкокристалічною структурою. Відмінною характеристикою мастильного матеріалу, що входить в дану трибологічну систему, є його здатність утворювати структурно впорядковані граничні мастильні шари, що володіють властивостями рідких кристалів. При цьому відбувається відміну деяких індивідуальних властивостей тонких шарів рідини від аналогічних властивостей у великому обсязі [40]. Рідкокристалічний стан граничного шару мастильного шару призводить до анізотропії ряду його властивостей, зокрема таких як в'язкість і міцність [41, 42].

Основними режимами тертя і пов'язаного з ним мащення, що відбуваються в суднових дизелях, є гідродинамічний і граничний. Незважаючи на прагнення забезпечити гідродинамічний режим змащування в трибо-сполученні поршневі кільця - циліндрова втулка, процес змащування цього вузла відбувається в умовах граничного тертя. Це обумовлюється рядом причин, основна з яких - мінімізація зазору в парі тертя поршневі кільця - циліндрова втулка для забезпечення щільності контуру горіння і максимального перетворення енергії газів, що розширюються в циліндрі в корисну роботу. Подання про режими змащування циліндричної групи можна проілюструвати на прикладі моделі, показаної на рис. 4.4.

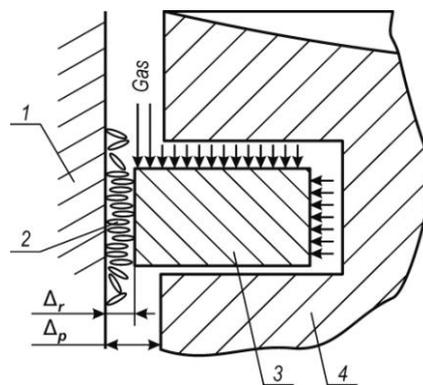


Рис. 4.4. Модель трибологічної системи циліндрова втулка - мастильний матеріал - поршневі кільця:

1 – втулка циліндра; 2 - мастильний матеріал; 3 - кільце; 4 - поршень

Гідродинамічний режим змащування спостерігається в тих місцях, де мастильний матеріал розділяє поверхні поршня і втулки. У парі тертя поршневі кільця - циліндрова втулка режим тертя і змащування змінюється на граничний. Це пов'язано з тепловим розширенням кільця (завдяки наявності «кільцевого» замку), а також з виконанням кільцем компресійного дії, коли на верхню і внутрішню частину кільця діють гази, а зовнішня поверхня кільця притискається до поверхні циліндричної втулки. При цьому зазори в парах тертя поршень - втулка Δ_p і кільце - втулка Δ_r мають різне значення і відповідають різним режимам змазування.

Характеристики мастильного матеріалу, що входить в трибологічну систему поршневі кільця - мастильний шар - втулка циліндра, як правило, описуються з точки зору гідродинамічної теорії мастила. При цьому враховуються тільки «об'ємні» властивості мастильного матеріалу, і не розглядаються аномалія цих властивостей, що відбувається в тонких граничних шарах і обумовлює їх рідкокристалічною структурою.

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 знаходяться [43, 44]. 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. Помітна структурна неоднорідність граничних мастильних шарів, визначаючи неньютонівської характер в'язкої течії, значним чином впливає на дисипативні властивості мастильного матеріалу, особливо в трібовузлах, що працюють в режимі граничного і змішаного тертя. Одним з параметрів, величина якого має різне значення для випадків об'ємної рідини і граничного шару, є в'язкість [45].

4.3. Експериментальне дослідження явища стратифікації в'язкості моторного мастила, що виникає при роботі трибо-сполучення втулка-поршневе кільце

З метою підтвердження дослідження явища стратифікації в'язкості моторного мастила виконувалося моделювання процесів тертя, що відбуваються при змазуванні ЦПГ суднового дизеля 12K98ME-C7 фірми DOOSAN-MAN-B&W, встановленого в якості головного двигуна на судні-контейнеровозі дедвейтом 131360 тонн. Основні характеристики дизеля:

тип дизеля - двотактний, крейцкопфний;

номінальна потужність – $N_{\text{ном}} = 54120$ кВт;

номінальна частота обертання – $n_{\text{ном}} = 97$ хв⁻¹;

кількість циліндрів – 12;

діаметр циліндра – $D = 0,98$ м;

хід поршня – $S = 2,66$ м;

система змащування ЦПГ - лубрикаторна (циліндрова).

Змазування ЦПГ дизеля забезпечувалося мастилом Mobilgard570 фірми Mobil, основні показники якого наведені в таблиці 4.1.

Завданням дослідження було визначення стратифікації в'язкості мастила, що виникає в граничному змащувальному шарі при зміні зсувних навантажень, які (в свою чергу) залежать від швидкості переміщення поршня і можуть бути визначені частотою обертання колінчастого вала і потужністю дизеля.

Мастило, що знаходиться в зазорі пари тертя поршневі кільця - втулка циліндра, піддається напрузі зсуву. При цьому швидкість зсуву γ' , згідно (4.4), можна розрахувати, знаючи лінійну швидкість переміщення поршня і геометричні розміри поршневого кільця:

$$\gamma' = \frac{v_m}{h_r}, \quad (4.5)$$

де v_m – середня швидкість поршня, м / с, яка, в свою чергу, визначається як

$$v_m = \frac{Sn}{30}, \quad (4.6)$$

де S – хід поршня, м;

n – частота обертання колінчастого вала, rev^{-1} ;

h_k – висота поршневого кільця, м.

Діапазон експлуатаційних режимів розглянутого дизеля визначається частотами обертання від мінімально стійкої n_{\min} до максимально допустимої номінальної $n_{\max}=1,03n_e$ і лежить в інтервалі $53\dots100 \text{ хв}^{-1}$. Тоді, з урахуванням геометричних розмірів поршневого кільця дизеля $h_r=0,025$ м, а також згідно (4.5) і (4.6), швидкість зсуву в зазорі пари тертя поршневі кільця - втулка циліндра складе $\gamma'=188\dots355 \text{ с}^{-1}$.

Визначення в'язкості мастила в граничному змащувальному шарі при різних швидкостях зсуву виконувалося за допомогою ротаційного віскозиметра, розробленого Б.А. Алтоїзом і С.В. Кіріяном [43]. Робота віскозиметра (рис. 4.5) заснована на визначенні моменту сил в'язкого тертя, що виникає в прошарку рідини між коаксіальними циліндрами 6, 7 при обертанні зовнішнього циліндра в склянці 5. Привід здійснюється від електродвигуна 10 через ремінну передачу 2 системи шківів 1. Вимірником крутного моменту сил в'язкого тертя служить система противаг 3. Можливість варіювання масою цих противаг забезпечує значний діапазон вимірювань величини в'язкості досліджуваних масел ($10\dots200 \text{ сСт}$) і швидкостей їх зсувних деформацій ($\gamma'=10^2\dots10^4 \text{ с}^{-1}$).

За куту відхилення променя, що визначається по лімбу 4, відбитого від дзеркала 8 при його освітленні лазером 9, розраховувався повертає момент, компенсуючий момент сил в'язкого тертя. Ширина зазору між циліндрами 6 і

7 (товщина прошарку рідини) задається варіюванням діаметрів набору внутрішніх змінних циліндрів. Температурний режим в зоні контакту можливо змінювати і контролювати за допомогою електричного термометра опору 11.

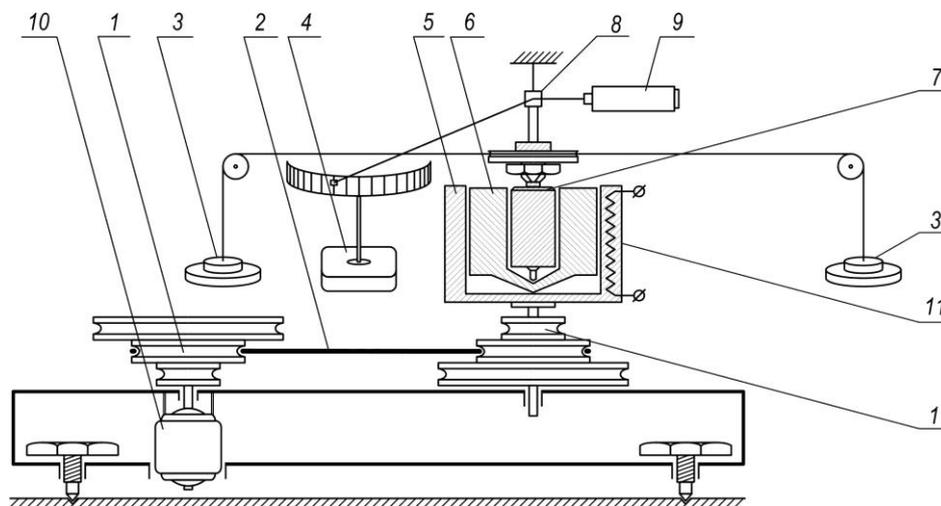


Рис. 4.5. Схема ротаційного віскозиметра:

- 1 – шківи; 2 – ремінь; 3 – вантажі (противаги); 4 – лімб; 5 – стакан (місце посадки зовнішнього циліндра); 6 – зовнішній циліндр ротаційної пари; 7 – внутрішній циліндр ротаційної пари; 8 – дзеркало; 9 – лазер; 10 – електродвигун; 11 – електричний термометр опору

При цьому для різної швидкості зсуву можливо було визначити в'язкість мастильного матеріалу в граничному змащувальному шарі v_{bl} . Її величина визначалися при товщині мастильного шару 15 мкм, величина якого відповідала експлуатаційного зазору в парі тертя поршневі кільця - циліндрова втулка. Значення об'ємної в'язкості v_{vol} визначалося за допомогою капілярного віскозиметра фірми Unitor. Експерименти, як по визначенню об'ємної в'язкості v_{vol} , так і в'язкість в граничному змащувальному шарі v_{bl} , проводилися при температурі мастильного матеріалу 40°C.

Лабораторні дослідження проводилися для моторних масел Mobilgard570 (фірми Mobil), що використовується при експлуатації

суднового дизеля, а також для моторних масел ряду провідних фірм: Energol CLO50M (BP), Cyltech70 (Castrol), Texaco Special HT70 (Chevron). Дані моторні мастила мають рівноважні значення основних характеристик (таблиця 4.1), а тому можуть бути порівняні при проведенні експерименту.

Результати вимірювань об'ємної в'язкості, а також в'язкості граничного мастильного шару при різній швидкості зсуву наведені в таблиці 4.2 і проілюстровані на рис. 4.6.

Таблиця 4.1. Основні характеристики моторних масел, що використовуються при проведенні експерименту

Typical Characteristics	Mobilgard570	Energol CLO50M	Cyltech70	Texaco Special HT70
SAE Number	50	50	50	50
Kinematic Viscosity: at 40° C, sSt	229	217	218	221
at 100° C, sSt	21	19,5	19,5	20
Total Base Number (TBN), mgKOH/g	70	70	70	70
Density at 15° C,	942	940	938	940
Flash point, ° C,	241	215	223	207

Встановлена в результаті проведених досліджень залежність в'язкості ν від швидкості зсуву γ' (рис. 4.6), підтвердила «неньютонівській» характер перебігу мастильного матеріалу у вузькому зазорі пари тертя поршневі кільця - втулка циліндра. Експериментальні залежності, отримані для моторних масел основних фірм-виробників і наведені на рис. 4.6, збігаються з залежностями, що ілюструють теорію пластичного перебігу, показаними на рис. 4.3. Крім того, отримані результати підтвердили раніше висловлену твердження, про те, що прилягають до металевої поверхні тріади тертя граничні мастильні шари більш в'язкі в зв'язку з наявністю в них орієнтаційної впорядкованості молекул [36, 46].

Таблиця 4.2. Результати реологічних випробувань судових масел

Тип мастильного матеріалу і його характеристика		Частота обертання валу дизеля, n , об/мин									
		0	–	–	–	50	60	70	80	90	100
		швидкість зсуву, $\dot{\gamma}$, с^{-1}									
		0	50	100	150	177	213	248	284	319	355
Mobilgard570	Об'ємна в'язкість, ν_{vol} , sSt	228									
	В'язкість граничного шару, ν_{bl} , sSt	256	239	233	223	221	219	218	216	215	214
Energol CLO50M	Об'ємна в'язкість, ν_{vol} , sSt	217									
	В'язкість граничного шару, ν_{bl} , sSt	228	218	213	206	203	201	198	197	195	194
Cyltech70	Об'ємна в'язкість, ν_{vol} , sSt	218									
	В'язкість граничного шару, ν_{bl} , sSt	239	223	216	209	207	206	204	203	202	201
Texaco Special HT70	Об'ємна в'язкість, ν_{vol} , sSt	222									
	В'язкість граничного шару, ν_{bl} , sSt	242	233	225	221	207	205	203	201	198	197

Стратифікація в'язкості по ширині мастильного шару підтверджує рідкокристалічну структуру граничного шару в вузькому зазорі між поршневим кільцем і втулкою циліндра. У діапазоні швидкостей зсуву $\dot{\gamma}=0\dots400 \text{ с}^{-1}$ (що відповідають основним експлуатаційним режимам роботи судових МОД), стратифікація в'язкості різних моторних масел становить (0,9...1,12) значення об'ємної в'язкості ν_{vol} . Для моторних масел, досліджуваних в роботі, стратифікація в'язкості моторного мастила показана на рис. 4.7, де верхня частина діаграми відповідає відсутності зсувних зусиль ($N_e=0 \text{ кВт}$), а нижня - зсувними зусиллям при максимальному навантаженні ($N_e = N_e^{\text{max}}$).

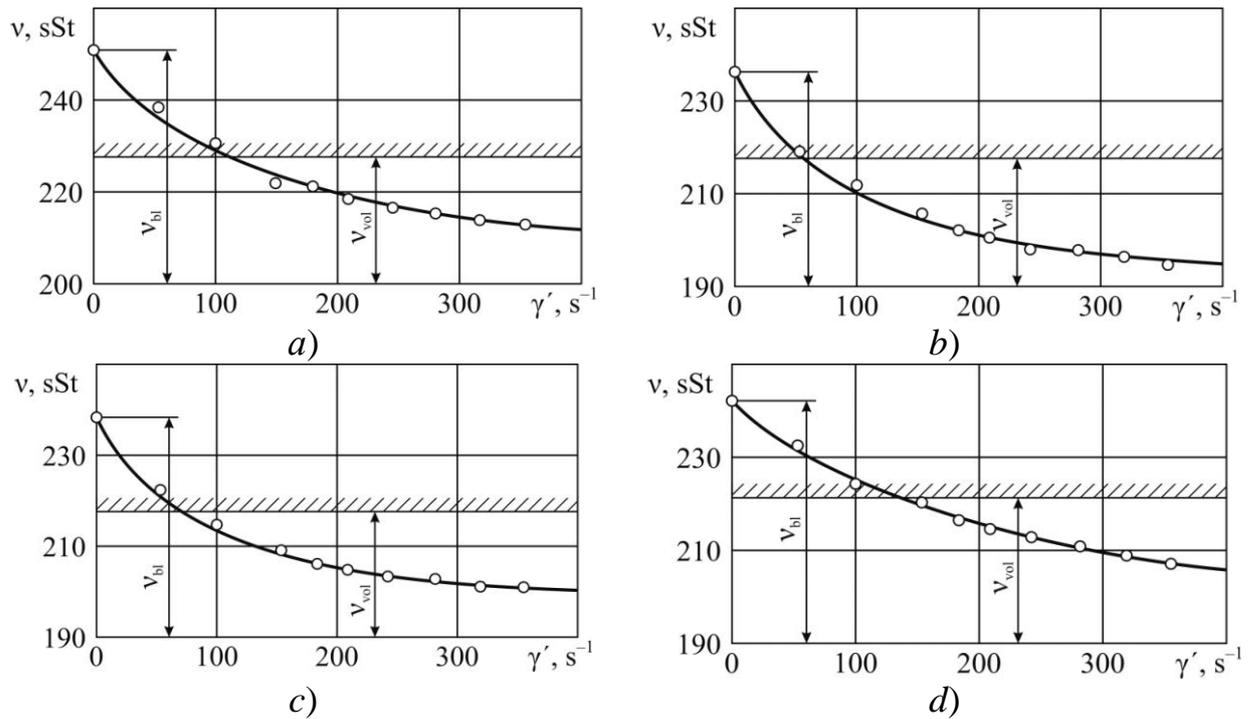


Рис. 4.6. Криві в'язкості моторного мастила

(в граничному шарі, v_{bl} і в великому обсязі v_{vol}) від швидкості зсуву γ'
при товщині мастильного шару 15 мкм:

- a) lubricated oil Mobilgard570; b) lubricated oil Energol CLO50M;
c) lubricated oil Cyltech70; d) lubricated oil Texaco Special HT70

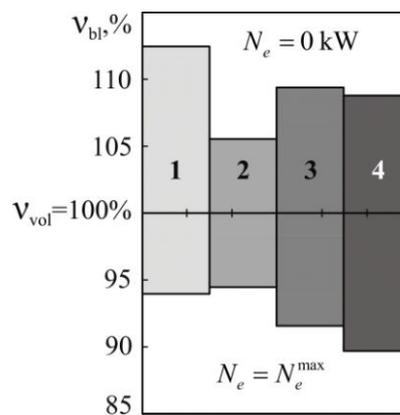


Рис. 4.7. Діаграма стратифікації в'язкості суднових моторних масел в залежності від навантаження дизеля:

- 1 – моторне мастило Mobilgard570; 2 – моторне мастило Energol CLO50M;
3 – моторне мастило Cyltech70; 4 – моторне мастило Texaco Special HT70

4.4. Висновки за розділом 4

У результаті експериментальних досліджень встановлено:

1) мастильний матеріал, що знаходиться у вузькому зазорі трибологічних системи циліндрова втулка - мастильний матеріал - поршневі кільця суднових МОД є радіально-анізотропну рідина, яка характеризується різними значеннями в'язкості по ширині мастильного шару;

2) механічні навантаження, що впливають на впорядковані молекулярні шари граничного мастильного шару, призводять до їх деструкції, що викликає зниження його в'язкості і зменшення демпфуючих властивостей мастила;

3) при збільшенні частоти обертання валу дизеля (а, отже і швидкості поршня) в масляному шарі виникають зсувні зусилля, що сприяють зменшенню його в'язкості. Цей факт необхідно враховувати при виборі сорту мастила для змащування ЦПГ, а також при визначенні бракувальних показників мастила, тому що і в тому і в іншому випадку визначається значення в'язкості для великого об'єму рідини, а експлуатація ЦПГ відбувається при значеннях в'язкості, характерних для граничного шару;

4) 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 суднових дизелів, коли швидкість переміщення поршня ще не дозволяє рівномірно розподілити масляну плівку по поверхні циліндричної втулки і створити необхідний режим змащування.

5. РОЗРОБКА МЕТОДИЦІ ПІДТРИМАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ МАЩЕННЯ В ПАРАХ ТЕРТЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

П'ятий розділ присвячений розв'язанню третього допоміжного завдання магістерського наукового дослідження, яким є визначення найбільш ефективного способу, що сприяє підтриманню гідродинамічного режиму мащення та попередженню безпосереднього контакту пари тертя втулка-поршневе кільце.

Як основні методи, що забезпечують надійну роботу пари тертя втулка-поршневе кільце судових МОД, розглянемо наступні:

- застосування багатофункціональних присадок до мастил;
- застосування керамо-металевих і металоорганічних покриттів.

5.1. Використання присадок до моторних мастил

Удосконалення технології виробництва мастила застосуванням ефективних процесів очищення, здійсненням молекулярної конверсії молекул нафти, синтезом нових масел дозволяє істотно змінити деякі експлуатаційні параметри. Вельми значно властивості масел можуть бути поліпшені додаванням в базове мастило присадок. Мастило, що містить присадки, називається компаундованим або легованим мастилом. За допомогою варіювання складу компонентів базового мастила і композицій присадок розробники мастильних матеріалів можуть створити мастила, що відповідають різноманітним вимогам виробників механізмів і обладнання, а також формувати широкий асортимент мастильних матеріалів з диференційованими властивостями для вирішення різноманітних, іноді

вельми специфічних і навіть суперечливих завдань змазування деталей двигунів [48].

Присадки - синтетичні хімічні сполуки, що вводяться в базове мастило для поліпшення властивостей в періоди експлуатації та зберігання. Майже всі присадки, як поодинокі, так і пакети, поставляються на заводи у вигляді розчинів присадок в маслі, що містять близько 50% активної речовини [49].

Деякі присадки впливають на фізичні властивості базових масел, а інші роблять хімічний ефект. Вони можуть доповнювати один одного, що створює синергетичний ефект, але можуть викликати і антагоністичний ефект. Зазвичай випускають багатофункціональні присадки. На ринок надходять в основному композиції присадок - пакети, Це пакети строго певного складу, призначені для мастила конкретного призначення і класу якості.

5.1.1. Дія присадок

Присадки можуть:

- надати мастилу нові властивості (утворення на поверхнях, що труться деталей хемосорбційних сульфідної або фосфідною плівки, що запобігає знос);
- поліпшити наявні властивості мастила (зменшити вязкостно-температурну залежність, знизити температуру застигання);
- уповільнити або зупинити небажані процеси, що відбуваються при експлуатації мастила (уповільнити окислення, утворення шламу, корозію металу).

Ефективність дії присадок обумовлюється їх хімічними властивостями і концентрацією в мастильних матеріалах, а також приємністю останніх до

добавкам, так як деякі присадки активніші для одних базових масел, ніж для інших.

Присадки повинні:

- добре розчинятися в маслі;
- мати малу летючість і не випаровуватися з мастила при зберіганні і експлуатації в широкому діапазоні температур;
- не вимиватися водою і не піддаватися гідролізу;
- не взаємодіяти з контактуючими поверхнями матеріалів;
- зберігати свої функції в присутності інших добавок і не чинити на них депресивної дії [50].

5.1.2. Класифікація присадок за функціональною дією

По головному призначенню (визначає властивості) присадки умовно об'єднують в кілька груп:

- 1) в'язкісні присадки, які покращують індекс в'язкості і інші властивості (модифікатори індексу в'язкості, депресанти);
- 2) присадки, що покращують мастильні властивості (модифікатори тертя, антифрикційні, фрикційні, протизносні, протизадирні, що підвищують жирність, металлоплакуючих і ін.);
- 3) антиокислювальні присадки, що зменшують витрата мастила і збільшують ресурс роботи мастила (антиоксиданти);
- 4) антикорозійні присадки (інгібітори корозії);
- 5) миючі присадки (детергенти);
- 6) інші присадки (протипінні) [48].

В'язкісні присадки поліпшують індекс в'язкості, однак в іноземній літературі частіше вживають термін модифікатор в'язкості. В якості

модифікаторів в'язкості застосовуються полімери та сополімери - поліізобутилен, поліметакрилат, сополімери олефінів (етилену, пропілену, бутилену), гидрорований поліізопрен і ін. [48].

Присадки, що поліпшують змащувальні властивості, підвищують змащувальну здатність навіть при низькій в'язкості мастила [51].

Антикорозійні присадки, або інгібітори корозії, діють у такий спосіб:

- нейтралізують кислоти, утворені при окисленні мастила або при згорянні сірчистого палива (для цієї мети використовуються сполуки, які мають лужними властивостями);

- утворюють захисну адсорбційну або хемосорбційну плівку, що перешкоджає реакції кислот з поверхнею металу (для цього застосовують з'єднання деяких органічних сполук сірки, фосфору й азоту, сполуки сірки, особливо дисульфіді і полісульфіді можуть бути використані в якості протизадирних і протизносних присадок);

- зв'язують вологу, без якої корозія неможлива.

Інгібітори корозії захищають поверхню вкладишів підшипників і інших деталей з кольорових металів від корозії і корозійного зносу, що викликаються органічними кислотами. Механізм захисту - утворення захисної плівки і нейтралізація кислот. Для цих цілей застосовуються діалкілдитіофосфату цинку, інші сполуки сірки і фосфору, присадки, що відрізняються також протизадирні властивості [48].

В умовах експлуатації - при високій температурі і під впливом кисню повітря відбувається інтенсивне окислення вуглеводневих сполук мастила, в результаті якого погіршуються його змащувальні та інші функціональні властивості. Ресурс присадок витрачається, і мастило підлягає заміні. Антиокислювальні присадки продовжують термін служби мастила.

Антиокислювальні присадки називаються інгібіторами окислення (корозії) і пригнічують окислення мастила в початковій стадії шляхом

взаємодії з первинними продуктами реакції окислення - перекису з утворенням неактивних сполук.

Каталітична дія іонів металів на окислення мастила пригнічується сполуками іншої групи антиокисних присадок - деактиватора металів.

Миючі присадки є поверхнево-активними речовинами (ПАР), які запобігають агломерації (злипання) нерозчинних продукті окислення з подальшим їх відкладенням на деталях двигуна. Миючі присадки за своєю дією ділять на детергенти і дисперсанти. Детергенти є поверхнево-активними речовинами, що володіють миючими властивостями, що захищають поверхню деталей від прилипання і скупчення на них продуктів окислення [52].

Основні типи присадок до судових моторних мастил наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Типи присадок до моторних мастил

Тип присадки	Основний активний елемент присадки	Рекомендована пара тертя для застосування
Консталін	Натрієві мила жирних кислот	Механізм газорозподілу
Кальцієво-натрієві	Натрієві та кальцієві мила жирних кислот	Шестеренні передачі
Графітна	Чорний графіт	Шатунова група, циліндрові втулки
Ціатіми	Літієві мила жирні кислот	Підшипники ковзання колінчастого вала

5.2. Застосування багат шарових Мо-С покриттів

Підвищення функціональних властивостей деталей шляхом використання захисних покриттів є на сьогоднішній день дуже поширеним технологічним інструментом [53].

Розглянемо отримання покриттів Мо-С шляхом термічного розкладання металовмісного з'єднання - гексакарбоніла молібдену $\text{Mo}(\text{CO})_6$ [54].

В процесі трибологічних випробувань реєстрували:

- значення сили тертя $F_{\text{тр}}$, нормальне навантаження N , контактний тиск P , за величиною яких судили про механічні втрати в трибосистемі;

- температуру елементів безперервно реєстрували в реальному масштабі часу випробувань в безпосередній близькості (1 мм) від зони тертя, із застосуванням ковзної термопари. Коефіцієнти тертя визначалися як $f = F_{\text{тр}}/N$.

На растровому електронному мікроскопі JSM-T300 проведені металофізичні дослідження отриманих зразків. На рис. 5.1 показаний зовнішній вигляд покриття Мо-С (поперечний шліф) із зазначеними зонами аналізу; приблизний хімічний склад аналізованих зон наведено в таблиці 5.2.

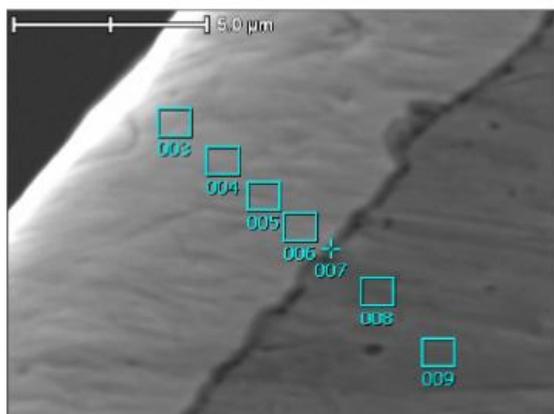


Рис. 5.1. Зовнішній вигляд покриття Мо-С на зразку з зазначеними зонами аналізу (товщина покриття ~ 10 мкм)

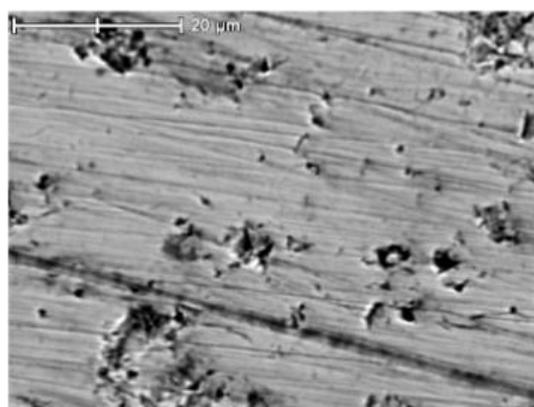


Рис. 5.2. Мікрорельєф поверхні після полірування

Таблиця 5.2. Приблизний хімічний склад аналізованих зон

№ точки	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	C	Разом, %
003					97,0	3,0	100
004					96,5	3,5	100
005			2,21		94,79	3,0	100
006			3,17		94,83	2,0	100
007		10,13	22,67	9,90	55,31	2,0	100
008	0,21	6,85	92,13			0,8	100
009	0,34	7,13	91,73			0,8	100

Власне покриття являє собою суміш чистого молибдену і карбиду молибдену. Результати досліджень показали досить високу ступінь збігу фазового складу матеріалу основи - стали X12Ф1 (зона 009).

На рис. 5.2 наведено мікрорельєф поверхні покриття після полірування.

Результати трибологічних випробувань представлені в таблиці 5.3 і на рис. 5.3-5.5.

Таблиця 5.3. Коефіцієнти тертя зразків у процесі трибологічних досліджень

Матеріал обробки валу	Матеріал обробки вкладишу	Навантаження, що прикладене до пари тертя, кН						
		1	2	3	4	5	6	7
MoN	Mo-C(1)	0,14	0,13	0,127	0,13	0,124	0,12	0,12
	Mo-C(2)	0,15	0,16	0,16	0,157	0,152	0,124	0,107
	Mo-C(3)	0,13	0,11	0,133	0,122	0,108	0,105	0,101
	Mo-C(4)	0,14	0,15	0,153	0,148	0,146	0,145	0,134
	Mo-C:H(5)	0,14	0,15	0,153	0,148	0,146	0,145	0,134
Ti-Al-N	Mo-C(1)	0,12	0,12	0,12	0,125	0,126	0,125	0,12
	Mo-C(2)	0,18	0,17	0,193	0,175	0,16	0,15	0,107
	Mo-C(3)	0,16	0,18	0,167	0,157	0,152	0,157	0,153
	Mo-C(4)	0,14	0,15	0,153	0,148	0,146	0,145	0,134
	Mo-C:H(5)	0,09	0,09	0,097	0,105	0,102	0,103	0,101

При проведенні трибологічних випробувань основна увага була приділена вивченню поведінки розроблених покриттів в трибосполучень зі сталлю.

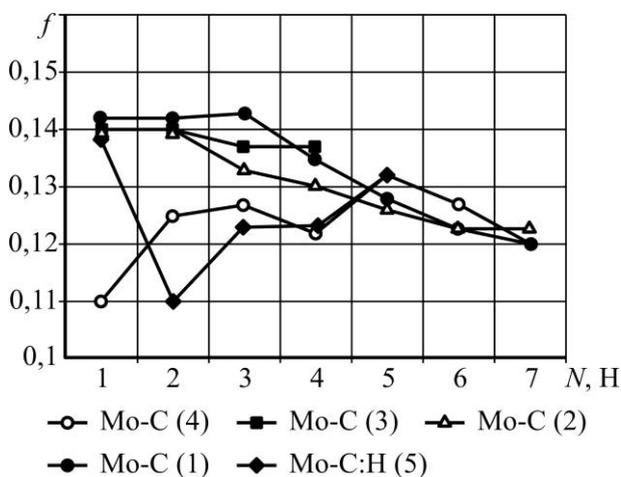


Рис. 5.3. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження для пари тертя Мо-С/сталь

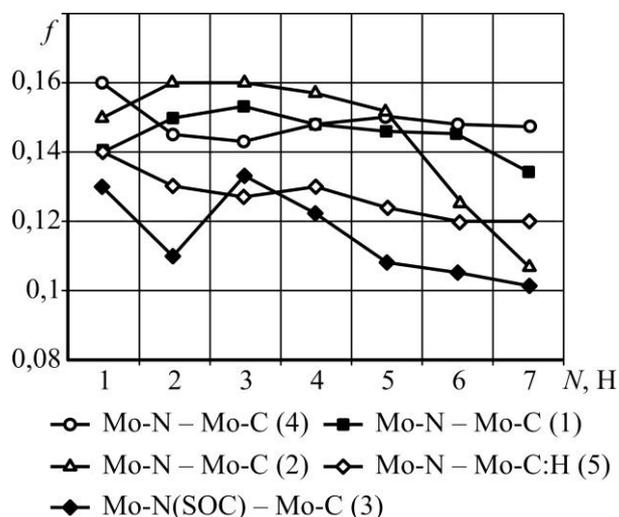


Рис. 5.4. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження для пари тертя Мо-С/Mo-N

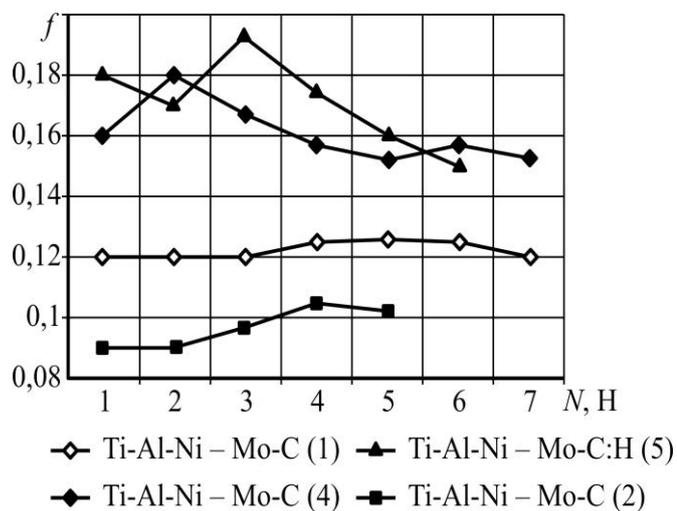


Рис. 5.5. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження для пари тертя Мо-С - Ti-Al-N

Проведені трибологіческие випробування Мо-С покриттів свідчать про перспективність розроблених покриттів при виборі оптимальних конструкцій

покриттів для пар тертя («сталь - покриття» і «покриття - покриття») з підвищеною зносостійкістю і низьким коефіцієнтом тертя в прецизійних вузлах судових дизелів [55].

Із наведених результатів можливо визначити що:

- металографічні дослідження підтверджують можливість низькотемпературного нанесення якісних високотвердих покриттів Мо-С, при цьому забезпечується хороша адгезія до матеріалів підкладки (сталь Х12Ф1) без зниження міцності сталі і без погіршення класу чистоти вихідної поверхні;

- багатошарові і нан шарові покриття на поверхнях сприяють зниженню тертя та енергетичних втрат при рухи цих поверхонь;

- трибологические випробування виявляють високі трибологічні характеристики Мо-С покриттів і свідчать про перспективність розроблених покриттів при виборі оптимальних конструкцій покриттів для пар тертя («сталь - покриття» і «покриття - покриття») з підвищеною зносостійкістю і низьким коефіцієнтом тертя в вузлах тертя судових дизелів [56].

5.3. Висновки за розділом 5

В результаті виконання розділу 5 зробимо наступні висновки:

- 1) серед досить широкого кола засобів, що сприяють підтриманню гідродинамічного режиму мащення та попередженню безпосереднього контакту пари тертя втулка-поршневе кільце для умов експлуатації судових МОД найбільш доцільно використовувати методи застосування багатофункціональних присадок до мастил та застосування керамометалевих і металоорганічних покриттів поверхонь тертя;

2) додавання до базового мастила присадок сприяє покращенню та підвищенню його різноманітних характеристик, в першу чергу – підвищення товщини мастильного шару, який розмежує поверхні тертя;

3) покриття з порошкових матеріалів на основі карбідів, оксидів і бронзи мають та особливо таких, що містять сполучення молібдену забезпечують трибо-сполученням високу зносостійкість і можуть використовуватися для підвищення якості деталей відповідальних вузлів суднових МОД у тому числі таких, які працюють у режимі граничного тертя.

6. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЦИЛІНДРОВИХ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Шостий розділ наукового магістерського дослідження призначено розв'язанню його головного завдання – визначенню найбільш інформативного методу контролю технічного стану ЦПГ суднових МОД в умовах експлуатації морського судна, що сприятиме підвищенню ефективності роботи циліндрових систем мащення суднових дизелів

6.1. Діагностування технічного стану циліндрової групи суднових мало-обертових дизелів за характеристиками мастила

Мастило, що надходить на дзеркало циліндрових втулок, постійно піддається окисленню продуктами згоряння і тому нейтралізація впливу сірчаної кислоти до моменту початку корозії циліндрових втулок є одним із першочергових завдань при експлуатації двигунів внутрішнього згоряння. Утворення в циліндрі дизеля сірчистоокислого середовища сприяє підвищеному зносу втулки, поршня і поршневих кілець, знижує ресурс і надійність їх роботи [57].

Сучасні методи діагностування, аналізують рівень корозії циліндрових втулок суднових дизелів, на основі визначення залишкового лужного числа мастила (base number - BN), взятого з підпоршневих просторів. При цьому за величиною BN можливо дати оцінку стану ЦПГ. Стан корозії циліндрових втулок, розділяється на три основні групи:

1) $BN=17...45$ – циліндрові втулки експлуатуються в допустимому режимі, їх знос не перевищує допустимого значення;

2) $BN=10...16$ – циліндрові втулки піддаються підвищеному корозійного впливу, що може сприяти інтенсифікації процесу зношування;

3) BN – до 10 – в циліндрі дизеля відбувається сірчиста корозія, що сприяє збільшенню зносу ЦПГ.

При експлуатації дизеля в умовах 1-го режиму ($BN=17...45$) циліндрова масляна система не піддається регулюванню, і питома витрата циліндрового мастила вважається оптимальним для даного режиму роботи.

Умови 2-го режиму ($BN=10...16$) свідчать про недостатню кількість мастила, що надходить на поверхню циліндрової втулки і для відновлення належного значення BN необхідно регулювання подачі циліндрового мастила.

Робота дизеля на третьому режимі (з показником $BN<10$) відноситься до аварійних умов, свідчить про підвищений знос циліндрової групи і вважається неприпустимою. При цьому необхідно не тільки регулювання подачі циліндрового мастила, але і регулювання інтенсивності охолодження циліндрових втулок, а також переклад дизеля на режим зниженого навантаження [58].

Основними показниками кількості подачі циліндрового мастила на циліндрові втулки є АСС (adaptive cylinder oil control) фактор і витрата мастила FR (feed rate). Величина АСС фактору береться за експериментальними даними, в залежності від значень PQI (Particle Quantity Index) - кількості металевих частинок і BN в аналізах мастила, взятого з підпоршневого простору. Для суднових МОД $АСС=0,2...0,35$.

Рекомендований витрата мастила розраховується за формулою, $г/(кВт\cdot ч)$

$$FR = АСС \times S,$$

де S (sulfur) - кількість сірки в паливі, %.

При цьому, необхідно враховувати що рекомендований витрата мастила не повинен бути нижче 0,6 г/(кВт·год). На сучасних морських суднах, оснащених МОД, встановлені системи автоматичного управління (зокрема система LUBECS), які підтримують мінімальний витрата циліндрового мастила 0,6 г/(кВтгод) незалежно від режиму роботи дизеля.

Для технічного стану ЦПГ дизеля по аналізах мастила, взятого з підпоршневого простору, виконувалися дослідження на судновому дизелі 12K98ME7.

Під час проведення експериментальних досліджень дизель працював на одному і тому ж сорті палива марки РМК 700 з наступними характеристиками:

густина при 15°C, кг/м³ – 1010;

в'язкість при 50°C, сСт, – 700;

температурі спалаху (min), °C – 60;

вміст сірки, % – 0,4...0,45.

Змазування циліндрів дизеля забезпечувалося мастилом Mobilgard570 з наступними показниками:

густина при 15°C, кг/м³ – 937;

температурі спалаху, °C – 256;

в'язкість при 40°C – 229;

в'язкість при t 100°C – 21;

ТВН, мгКОН/г – 50.

Завданням дослідження було визначення оптимальної витрати циліндрового мастила з одночасною діагностикою технічного стану ЦПГ дизеля.

6.2. Визначення оптимальної подачі циліндрового мастила

Дослідження з визначення оптимальної подачі циліндрового мастила виконувалися тільки на сталих режимах роботи дизеля. Сталість навантаження на дизель визначалося незмінними частотою обертання колінчастого вала і циклової подачею палива [58].

Для кожного циліндра дизеля встановлювалося своє значення подачі циліндрового мастила. Відхилення її величини по циліндрах не перевищувало 5% від середнього значення. З підпоршневого простору кожного циліндра виконувався відбір проб відпрацьованого мастила с наступним визначенням в судновий технічної лабораторії значень BN і PQI. Експерименти були виконані для десяти циклів з інтервалом відбору проб 24 години. Усереднені значення отриманих результатів експерименту показані на рис. 6.1.

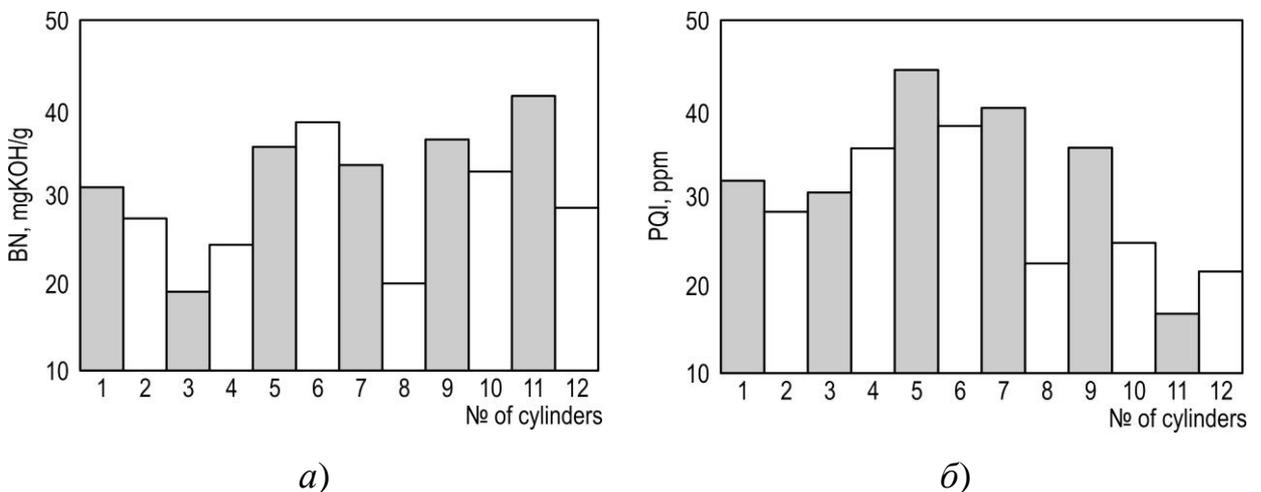


Рис. 6.1. Визначення оптимального значення подачі циліндрового мастила за величиною BN (а) і PQI (б)

З залежностей, представлених на рис. 6.1 видно, що рівень подачі мастила, встановлений для 11-го циліндра, забезпечує найбільше значення

BN при мінімальній кількості PQI. За результатами випробувань було визначено оптимальне значення АСС-фактора і надалі (з урахуванням вмісту сірки в паливі) розрахований рекомендований витрата мастила FR [59].

Дослідження показало, що оптимальна витрата циліндрового мастила для дизеля, що використовує паливо з високим вмістом сірки, досягається знаходженням оптимальної величини АСС-фактора [58].

За результатами досліджень в береговій лабораторії були також побудовані залежності (рис. 6.2), що відображають значення основних характеристик відпрацьованого мастила.

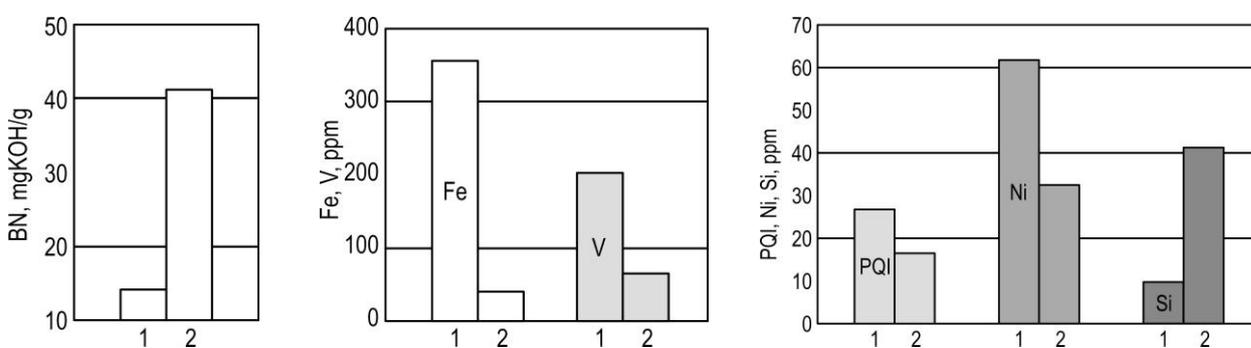


Рис. 6.2. Значення BN (base number), Fe (Iron), V (Vanadium), PQI (Particle Quantity Index), Ni (Nickel), Si (Silicon) в пробах мастила, взятого з підпоршневу простору суднового дизеля 12K98ME7 фірми Hyundai-B&W:
1 - після 9124 годин роботи; 2 - після 11364 години роботи

Отримані результати берегової лабораторії, в контрольних датах, показали збільшення BN, зменшення PQI і Fe в аналізах підпоршневого мастила, підтвердивши правильність регулювання подачі мастила в суднових умовах. Зміни в значеннях Ni, Si, V характеризують погіршення якості використовуваного палива [58].

6.3 Визначення оптимальних зон експлуатації циліндрової групи суднового мало-обертового дизеля

Також відзначимо, що правильна діагностика технічного стану дизеля за характеристиками мастила, взятого з підпоршневої порожнини, забезпечила безпечну роботу дизеля. Зміна величин BN і PQI визначає характер роботи ЦПГ дизеля (рис. 6.3).

На рис. 6.3 позначено:

I – dangerous zone (строго рекомендується не експлуатувати дизель);

II – zone of increased attention (потрібна термінова регулювання подачі циліндрового мастила);

III – safety zone;

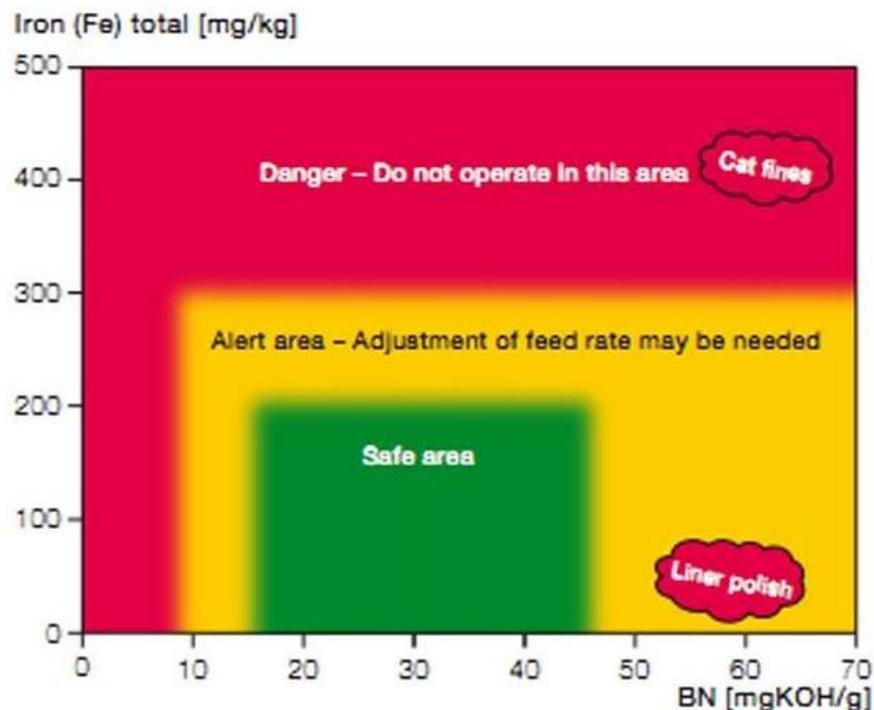


Рис. 6.3. Залежність рівня металу від залишкового лужного числа BN і Зони роботи ЦПГ суднового дизеля в залежності від величин BN і PQI

1 – cat fines zone (catalytic cracking ore «cat cracking») – зона з дуже високим ризиком ушкодження циліндрових втулок через випадають в абразивний осад частинок алюмінію і силікон з подальшим механічним пошкодженням втулок;

2 – liner polish zone ore bore polishing – зона, що характеризується «дзеркальної» поліруванням поверхні циліндрової втулки, що приводить до критичного зносу втулки за рахунок посиленого розподілу абразивних частинок по поверхні дзеркала втулки. Порушення оптимальної підробітки поршневих кілець і поверхні дзеркала циліндрової втулки з масляною плівкою є винос абразивних частинок з мікротріщин в областях з більш високим коефіцієнтом зносу і меншою товщиною масляної плівки по всій поверхні втулки.

При експлуатації суднових МОД робота циліндрової групи часто відбувається в зоні II з TBN 50...70 і рівнем металу менше 300 мг/кг. Ця зона небезпечна не тільки можливістю переходу в зону «дзеркальної» поліруванням поверхні циліндрової втулки, а й ймовірністю пошкодження масляної плівки, в результаті зриву відкладень з верхньої частини головки поршня на поверхню циліндрової втулки. Ця ймовірність є результатом більш лужного середовища в циліндрової втулки, що сприяє скачко подібному вимиванню кислотних відкладень. Однак, правильне діагностування стану ЦПГ і своєчасне прийняття рішень щодо зміни режиму змащування або навантаження дизеля дозволяє надійно його експлуатувати на всіх режимах роботи [58].

6.4. Висновки за розділом 6

В результаті виконання розділу 6 зробимо наступні висновки.

Одним з критеріїв, що дозволяє діагностувати технічний стан циліндрової групи судових МОД, є показники мастила, взятого з підпоршневого простору дизеля.

З огляду на неоднакові умови протікання робочого процесу в різних циліндрах дизеля, характеристики цього мастила для кожного циліндра мають свої значення.

Основним показником кількості мастила, що подається в циліндр дизеля, є Adaptive Cylinder oil Control factor (АСС-фактор). Його величина має оптимальне значення для кожного дизеля і визначається характеристиками використовуваного палива (зокрема вмістом сірки) і навантаженням дизеля. Для судових МОД рекомендований діапазон АСС фактору знаходиться в межах $АСС=0,2...0,35$.

До якісних показників технічного стану циліндричної групи МОД відносяться значення PQI (Particle Quantity Index) – кількості металевих частинок і залишкового лужного числа мастила (base number – BN), взятого з підпоршневу просторів.

Зменшення величини АСС-фактору забезпечується пропорційним зниженням подачі мастила в циліндр дизеля. Однак економічно виправдано це тільки в разі забезпечення максимального можливих значень PQI і мінімально допустимих величинах BN.

Безпечна робота судових МОД забезпечується на основі синтезу вирішення завдань щодо визначення оптимальних значень АСС, PQI і BN, а також підтримці ефективної потужності дизеля.

Аналіз якісного та кількісного складу мастила, що отримано з підпоршневого простору дизеля є найбільш інформативним методом

контролю технічного стану ЦПГ суднових МОД в умовах експлуатації морського судна. Вміст металевих сполук в пробах цього мастила свідчить про характер протікання процесів тертя в трибо-сполученні циліндрова втулка - поршневе кільце.

При сталому значенні вмісту металевих сполук в пробах мастила, що отримано з підпоршневого простору дизеля, а також у випадку, коли рівень залишкового лужного числа мастила знаходиться у межах $VN=17...45$, у трибо-сполученні циліндрова втулка - поршневе кільце забезпечується гідродинамічний режим тертя.

У випадку, коли відбувається постійне підвищення вмісту металевих сполук в пробах мастила, що отримано з підпоршневого простору дизеля, а також коли рівень залишкового лужного числа мастила знаходиться у межах $VN=5...10$ трибо-сполучення циліндрова втулка - поршневе кільце працює у режимі граничного тертя. При цьому для забезпечення надійної роботи суднового МОД необхідно приймати запобіжні методи, що будуть сприяти поверненню гідродинамічного режиму тертя та покращенню мастило постачання трибо-сполучення циліндрова втулка - поршневе кільце.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота магістра присвячена розв'язанню важливого науково-прикладного завдання – підвищенню ефективності роботи циліндрових систем мащення суднових дизелів.

Важливу роль у процесі перетворювання потенційної енергії палива у корисну потужність двигуна виконують циліндрова група та в першу чергу циліндрові втулка та поршневі кільця, працездатність яких забезпечує циліндрова система змащування. Технологічна вдосконаленість цих систем на сьогоднішній час практично вичерпана. Одним з нових шляхів забезпеченню режимів мащення циліндрової групи суднових мало-обертових є підтримання в них гідродинамічного режиму тертя за допомогою використання багато функціональних присадок до мастила та додаткового покриття поверхонь тертя антифрікційними матеріалами

Головним науковим результатом магістерської робота визначення методу контролю технічного стану циліндро-поршневої групи суднових МОД безпосередньо в умовах експлуатації. Запропонований метод враховує явище стратифікації моторного мастила, яка виникає при експлуатації циліндрових систем мащення, а також реалізує результати трибомоніторингу технічного стану циліндрової групи дизеля.

Основні наукові й практичні результати магістерського наукового дослідження.

1. До основних показників, що характеризують якість технічної експлуатації циліндрової групи суднових МОД, відносяться зниженням витрат на циліндрові мастило f_{Σ} і мінімізацією швидкості зношування деталей ЦПГ $f_{И}$. Обробка даних технічної експлуатації деталей ЦПГ крейцкопфних МОД дозволяє цільові функції критеріїв зниженням витрат на

циліндрові мастило $f_{\text{э}}$ та мінімізацією швидкості зношування деталей ЦПГ $f_{\text{и}}$ прийняти у вигляді лінійних рівнянь.

2. Моторне мастило, що використовується у циліндрових системах мащення суднових МОД, не підкоряється законам ньютонівської рідини, тому при накладенні зовнішніх зусиль у мастильному шарі виникають навантаження зсуву, які сприяють зміщення мономолекулярних шарів один відносно одного, що у свою чергу призводить до виникнення явища стратифікації мастила. При цьому у діапазоні частот обертання колінчатого валу дизеля (та відповідної їм потужності дизеля), що відповідають основним експлуатаційним режимам роботи суднових МОД, в'язкість моторного мастила знижується на 7...9 %. Цей факт необхідно враховувати при виборі сорту мастила для змащування ЦПГ, а також при визначенні бракувальних показників мастила, тому що і в тому і в іншому випадку визначається значення в'язкості для великого об'єму рідини, а експлуатація ЦПГ відбувається при значеннях в'язкості, характерних для граничного шару. Слід зазначити, що при відсутності зсувних навантажень, а також при початковому русі контактуємих поверхонь, в'язкість граничного мастильного шару на 10...12 % перевищує об'ємну в'язкість мастила. Цей ефект особливо важливий для пускових режимів роботи суднових дизелів, коли швидкість переміщення поршня ще не дозволяє рівномірно розподілити масляну плівку по поверхні циліндричної втулки і створити необхідний режим змащування.

3. Збільшення товщину мастильного шару, що розділяє поверхні поршневих кілець та циліндрової втулки при роботі суднового МОД, сприяє досить широке коле засобів, при цьому найбільш доцільно використовувати методи застосування багатofункціональних присадок до мастил та застосування керамо-металевих і металоорганічних покриттів поверхонь тертя. Додавання до базового мастила присадок сприяє покращенню та підвищенню його різноманітних характеристик, в першу чергу – підвищення товщини мастильного шару, який розмежує поверхні тертя. Покриття з

порошкових матеріалів на основі карбідів, оксидів і бронзи мають та особливо таких, що містять сполучення молібдену забезпечують трибо-сполученням високу зносостійкість і можуть використовуватися для підвищення якості деталей відповідальних вузлів суднових МОД у тому числі таких, які працюють у режимі граничного тертя.

4. Одним з критеріїв, що дозволяє діагностувати технічний стан циліндрової групи суднових МОД, є показники масла, взятого з підпоршневого простору дизеля. Аналіз якісного та кількісного складу мастила, що отримано з підпоршневого простору дизеля є найбільш інформативним методом контролю технічного стану ЦПГ суднових МОД в умовах експлуатації морського судна. Вміст металевих сполук в пробах цього мастила свідчить про характер протікання процесів тертя в трибо-сполученні циліндрова втулка - поршневе кільце. При сталому значенні вмісту металевих сполук в пробах мастила, що отримано з підпоршневого простору дизеля, а також у випадку, коли рівень залишкового лужного числа мастила знаходиться у межах $BN=17...45$, у трибо-сполученні циліндрова втулка - поршневе кільце забезпечується гідродинамічний режим тертя. У випадку, коли відбувається постійне підвищення вмісту металевих сполук в пробах мастила, що отримано з підпоршневого простору дизеля, а також коли рівень залишкового лужного числа мастила знаходиться у межах $BN=5...10$ трибо-сполучення циліндрова втулка - поршневе кільце працює у режимі граничного тертя. При цьому для забезпечення надійної роботи суднового МОД необхідно приймати запобіжні методи, що будуть сприяти поверненню гідродинамічного режиму тертя та покращенню мастило постачання трибо-сполучення циліндрова втулка - поршневе кільце.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. Суворов П.С. Управление режимами работы главных судовых дизелей / П.С. Суворов. – Одесса : ЛАТСТАР, 2000. – 240 с.
2. Суворов П.С. Динамика дизеля в судовом пропульсивном комплексе / П.С. Суворов. – Одесса : ОНМА, 2004. – 304 с.
3. Черниш І.І. Сучасні судові дизелі : особливості конструкції, експлуатації та автоматизованого управління / І.І. Черниш, С.А. Кар'янський, Є.М. Оженко. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – 216 с..
4. Черниш І.І. Конструкція сучасних малооборотних дизелів / І.І. Черниш, М.О. Колегаєв. – Одеса : ФЕНІКС, 2016. – 184 с.
5. Черниш І.І. Експлуатація сучасних малооборотних дизелів / І.І. Черниш, М.О. Колегаєв. – Одеса : ФЕНІКС, 2016. – 216 с..
6. Артемов Г.А. Суднові енергетичні установки : навчальний посібник / Г. А. Артемов, В. М. Горбов. – Миколаїв : УДМГТУ, 2012. – 356 с.
7. Мацкевич Д.В. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя / Д.В. Мацкевич, С.В. Сагин, С.А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: Одесса, 2010. – Вып. 25. – С. 109-118.
8. Мацкевич Д.В. Регенерация анизотропных свойств углеводородных жидкостей в процессе эксплуатации / Д.В. Мацкевич // Проблемы техники. – 2013. – № 1.– С. 63-71.
9. Судовой механик. Справочник. Том 1 / Под ред. Фока А. А. – Одесса : Феникс, 2008. – 1036 с..
10. Судовой механик. Справочник. Том 2 / под ред. Фока А. А. – Одесса : Феникс, 2010. – 1032 с.
11. Носовский А.Н. Основы эксплуатации судовых энергетических установок / А. Н. Носовский. – Николаев : Изд-во НКИ, 2010. –384 с.

12. Ханмамедов С.А. Топлива для судовых дизелей / С. А. Ханмамедов, Е. В. Царев. – Одесса: ОНМА, 2008. – 84 с.
13. Миусов М.В. Электронные системы управления главными судовыми двигателями : учебное пособие / М.В. Миусов, В.И. Ланчуковский, Е.М. Оженко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 98 с..
14. Карьянский С.А. Двигатели MAN-B&W типа ME с электронным управлением : учебное пособие / С.А. Карьянский, Е.М. Оженко. – Одесса : НУ «ОМА», 2020. – 92 с.
15. Добровольский В. В. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных двигателей / В. В. Добровольский, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.46-54.
16. Заблоцкий Ю. В. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей / Ю. В. Заблоцкий, В. Г. Солодовников // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 46-56.
17. Cylinder oil feed rate reduction // MER. – 2018. –№ 4. – P. 26-27.
18. Optimizing lubricators for two-stroke diesels // MER. – 2020. – № 3. – P. 36-37.
19. Contamination of fuel oils // Shipping world & shipbuilder. – 2021. – № 3. – P. 19-24.
20. Богач В.М. Особенности процесса истечения масла в цилиндры судовых дизелей MAN-B&W / В.М. Богач, А.А. Задорожный, И.Д. Колиев // Судовые энергетические установки. – Одесса, 2005. – Вып. 14. – С. 116-126.
21. Мельник Г.В. Развитие среднеоборотных дизелей / Г.В. Мельник. // Двигателестроение. – 2010. – № 1 (239). – С. 41–53.
22. Занько О.Н. Технология использования рабочих веществ в судовых энергетических установках / О.Н. Занько, В.Н. Калугин, И.В. Логишев. – Одесса Фенікс, 2005. – 508 с.

23. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях / С. В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.

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

25. Мацкевич Д. В. Забезпечення реологічної стійкості суднових моторних мастил / Д. В. Мацкевич // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 17-23. DOI : 10.31653/smf340.2020.17-23.

26. Голиков В.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голиков, М.А. Козьминых, О.А. Онищенко. – Одеса : ОНМА, 2014. – 164 с.

27. Кринецкий И.И. Основы научных исследований: учебное пособие для вузов / И.И. Кринецкий. – К. ; Одесса : Вища школа, 1981. – 208 с.

28. Голиков В.В. Системный подход к проблеме безопасного управления судном / Голиков В. В // Судовождение. – Одесса. – 2010. – Вып. 17. – С. 51-58.

29. Козьминых А.В. Основы системного анализа судовых энергетических установок: учебное пособие / А.В. Козьминых. – Одесса : ОГМА, 2000. – 192 с.

30. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях / С. В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.

31. Заблоцький Ю. В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів / Ю. В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.

Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 12-16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

32. Innovative piston rings promise improved cylinder running conditions / Marine Propulsion & auxiliary machinery. – 2007. – Vol. 20. – Issue 2. – P. 65-78.

33. Сагин С.В. Влияние триботехнических свойств топлив на эксплуатационные характеристики судового малооборотного дизеля / С.В. Сагин, Ю.В. Заблоцкий // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 1. – Одесса: ОНМУ. – С. 72-83.

34. Zablotsky Yu.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu.V. Zablotsky, S.V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology, Published by Indian Society of Education and Environment, May 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

35. Сагин С.В. Триботехнические процессы, протекающие в топливной аппаратуре высокого давления судовых дизелей / С.В. Сагин // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 2. – Одесса: ОНМУ. – С. 33-42.

36. Кириян С.В. Эпитропные жидкокристаллические слои синтетических масел и их влияние на сдвиговое течение / С.В. Кириян, Б.А. Алтоиз // Физика аэродисперсных систем. – 2008. – № 45. – С. 72-77.

37. Курс загальної фізики : підручник у 6 т. / за загал. ред. В.А. Сминтини. – Одеса : Астропринт, 2011. – Т. 1 : С.В. Козицький, Д.Д. Полищук. Механіка. – Одеса : Астропринт, 2011. – 472 с.

38. 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.

39. Сагин С.В. Исследование корреляционной взаимосвязи жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических

характеристик моторных масел судовых дизелей / С.В. Сагин // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 33. – Одесса : ОНМА. – С. 67-76.

40. Алтоиз Б.А. Физика приповерхностных слоев жидкости / Б.А. Алтоиз, Ю.М. Поповский. – Одесса : Астропринт, 1996. – 152 с.

41. Сагин С.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей / С.В. Сагин, Ю.В. Заблоцкий // Проблемы техники. – 2011. – № 3. – С. 78–88.

42. Поповский Ю.М. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения / Ю.М. Поповский, С.В. Сагин, С.А. Ханмамедов, М.Н. Гребенюк // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 7–11.

43. Кириян С.В. Реология моторных масел с квазижидкокристаллическими слоями в триаде трения / С.В. Кириян, Б.А. Алтоиз // Трение и износ. – 2010. – Т. 31 ; № 3. – С. 312–318.

44. Сагин С.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей / С.В. Сагин, Д.В. Мацкевич // Судовые энергетические установки: Одесса. – 2010. – Вып. 26. – С. 116-125.

45. Мацкевич Д.В. Управление реологическими характеристиками моторных масел судовых дизелей / Мацкевич Д.В. // Проблемы техники. – 2013. – № 2. – С. 52-60.

46. Сагин С.В. Исследование взаимосвязи жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел / С.В. Сагин // Технические науки — от теории к практике. – Сборник статей по материалам XXXVIII международной научно-практической конференции № 9 (34). – Новосибирск: «СибАК», 2014. – С.46-54.

47. 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>.

48. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

49. 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>.

50. Задорожний А.А. Повышение эффективности систем смазывания цилиндров судовых дизелей / А.А. Задорожний // Судовые энергетические установки. – Одесса, – 2005. – Вып. 14. – С. 79-91.

51. Мацкевич Д.В. Влияние медьсодержащих присадок на эксплуатационные свойства моторных масел / Д.В. Мацкевич, С.В. Сагин // Проблеми техніки. – 2012. – № 3.– С. 18-26.

52. Popovskii Yu.M. Dielectric investigations of associate formation process in thin nitrobenzene interlayers formed between metal substrates / Yu.M. Popovskii, A.A. Gorjuk, T.V. Naroditskaya // Journal of Molecular Liquids. – 2004. Vol. 5(38). – P.181-184.

53. Кириян С.В. Вязкостно-температурные характеристики структурно-неоднородных прослоек немезогенных предельных углеводородов / С.В. Кириян, Б.А. Алтоиз // Физика аэродисперсных систем. – 2010. – № 47. – С. 27–33.

54. Радько О.В. Управління ресурсними показниками конструкційних елементів сучасної техніки шляхом застосування енергозберігаючих технологій поверхневого модифікування / О.В. Радько // Проблеми тертя та

зношування : наук.-техн. журнал, 2017. – № 1 (74). – С. 84-89.
DOI: 10.18372/0370-2197.1(74).11447

55. Духота О.І. Концептуальний підхід до створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості / О.І. Духота // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. журнал, 2017. – № 1 (74). – С. 97-103. DOI: 10.18372/0370-2197.1(74).11476

56. Сагин С.В. Влияние триботехнических свойств топлив на эксплуатационные характеристики судового малооборотного дизеля / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 1. – Одеса: ОНМУ. – С. 72-83.

57. Sagin S.V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors / S.V. Sagin, O.V. Semenov // American Journal of Applied Sciences, Published by Science Publication, 2016. – Vol.13. – Iss. 2. – P. 200-208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208

58. Sagin S.V. Marine Slow-Speed Diesel Engine Diagnosis with View to Cylinder Oil Specification / S.V. Sagin, O.V. Semenov // American Journal of Applied Sciences, Published by Science Publication, 2016. – Vol.13. – Iss. 5. – P. 618-627. DOI: 10.3844/ajassp.2016.618.627

59. Чуйкін І.С. Підвищення ефективності процесу мащення циліндрової групи судових крейцкопфних дизелів / І.С. Чуйкін, М.О. Колегаєв // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУОМА. – С. 87-92.