

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПАЛИВ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ

Курсант Абрамов Нікіта Сергійович

Керівник: к.т.н., доцент Абоleshкін Сергій Євгенович

Консультанти розділів:

Нормоконтроль Діфенд / Тарасенко Д.І.

Роботу заслухано на засіданні кафедри (Суднові енергетичні установки) та
рекомендовано до захисту в ЕК, протокол № 9 від 17.12.2025 р.

Завідувач кафедри
д.т.н., проф.

Сагін С.В.

Внутрішній рецензент

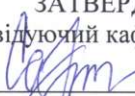
Добрянський Т.М. 22.12.2025
(ПІБ, підпис, дата)

Зовнішній рецензент

Варшавський Р.Н. 22.12.2025
(ПІБ, підпис, дата)

Одеса – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідуючий кафедрою СЕУ
 Сагін С.В.
"10" _____ 2015 р.








ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу магістра

Курсанту 6-го курсу СМФ _____ *Абрамов Нікіта Сергійович* _____

1. Тема роботи (предмет дослідження) _ *Поліпшення показників робочого процесу суднових дизелів при використанні палив з низьким вмістом сірки* _
2. Об'єкт дослідження _ *Робочий процес суднового дизеля при використанні палив з низьким вмістом сірки*
3. Предмет дослідження _ *Робочий процес суднового дизеля.*
4. Обсяг пояснювальної записки: *Пояснювальна записка складається з 60 аркушів, 23 малюнків, 11 таблиць, 35 джерел літератури.*
5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи:
Пояснювальна записка складається з вступу, дев'яти розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел
6. Зміст основної частини пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):
Розглянуто зміни фізико-хімічних властивостей палива при зниженні вмісту сірки. Показано вплив зниження вмісту сірки у паливі на його трибологічні властивості.
7. Перелік графічного матеріалу:
Графічний матеріал роботи складається із 16 слайдів. Показано основні результати проведених у роботі досліджень.

Робота повинна бути виконана у відповідності з «Методичними вказівками до виконання дипломної роботи магістра», затвердженими Радою СМФ від 24.11.2020, протокол № 4.

8. Календарний план виконання роботи

№ з/п	Назва етапу дипломної роботи	Відмітка керівника про виконання етапу (дата, підпис)
	<i>Вступ, обґрунтування актуальності теми</i>	28.10 
	<i>Склад шкідливих викидів, міжнародні правила з екологічної безпеки судових ДВЗ</i>	03.11 
	<i>Аналіз методів і способів, що забезпечують зниження викидів SOx</i>	12.11 
	<i>Аналіз можливості поліпшення протизносних властивий низкосернистих дистилятних палив</i>	20.11 
	<i>Дослідження впливу фізико-хімічних характеристик судових дистилятних палив на їх триботехнічні властивості</i>	28.11 
	<i>Дослідження властивостей сумішей судових дистилятних палив з додаванням РМ</i>	10.12 
	<i>Енергетична ефективність СЕУ</i>	17.12 

10. Дата видачі завдання 14.10.25

Термін подання дипломної роботи на випускову кафедру 27.11.25

Керівник дипломної роботи  к.т.н., доцент Аболєшкін С.Є.
(підпис) (вчене звання, посада, П.І.Б.)

Виконавець дипломної роботи Абрамов Н. С.

АНОТАЦІЯ

Абрамов Н. С. «Поліпшення показників робочого процесу суднових дизелів при використанні палив з низьким вмістом сірки»

Дипломна робота магістра: 63 с., 23 рис., 11 табл., 35 джерел

Об'єкт дослідження — процес смазки узлов ПНВТ дизеля.

У роботі проведений аналіз використання топлив с низким содержанием серы в дизелях.

Розглянуто зміни фізико-хімічних властивостей палива при зниженні вмісту сірки. Показано вплив зниження вмісту сірки у паливі на його трибологічні властивості. Показаний вплив альтернативних палив на ефективні й екологічні показники роботи дизеля. Виконаний порівняльний аналіз. Наведені результати досліджень використання різних типів паливної апаратури високого тиску на ефективні й екологічні показники роботи дизеля із застосуванням альтернативних видів палива.

ДИЗЕЛЬ, ПАЛИВО З НИЗКИМ ЗМІСТОМ СЕРИ, ПАЛИВНА АПАРАТУРА ВИСОКОГО ТИСКУ, ЕФЕКТИВНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ

ABSTRACT

N. Abramov "Improvement of the working process of marine diesel engines when using fuels with a low sulfur content"

Master's thesis: 63 p., 23 fig., 11 tab., 35 sources

The object of the study is the lubrication process of diesel fuel injection units.

The paper analyzes the use of low-sulfur fuels in diesel engines.

Changes in the physicochemical properties of fuel with a decrease in sulfur content are considered. The effect of a decrease in the sulfur content in fuel on its tribological properties is shown. The effect of alternative fuels on the efficient and environmental performance of a diesel engine is shown. A comparative analysis is performed. The results of research into the use of different types of high-pressure fuel equipment on the efficient and environmental performance of a diesel engine using alternative fuels are presented.

DIESEL, LOW-SULPHURIC FUEL, HIGH-PRESSURE FUEL EQUIPMENT, EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL INDICATORS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ЕКОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ палив СУДНОВИХ ДВЗ.....	10
2 СКЛАД ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ	12
3 МЕЖДУНАРОДНІЕ ПРАВИЛА І СТАНДАРТИ ПО ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОВИХ ДВЗ	14
4 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І СПОСОБІВ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ SO_x	17
4.1 Способи зниження оксидів сірки SO_x	17
4.2 Використання низькосірчастого дистиллятного палива.....	17
5 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПОЛІПШЕННЯ ПРОТИЗНОСНИХ ВЛАСТИВИЙ НИЗКОСЕРНИСТИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ	21
5.1 Протизносна присадка до низькосірчастих ДП	21
5.2 Додавання біоприсадок до НМДП для покращення його протизносних властивостей	22
6 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ НА ЇХ ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.....	24
7 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУМІШЕЙ СУДОВИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ З ДОДАВАННЯМ РОСЛИННИХ МАСЕЛ	29
7.1 Вплив присадок РМ на фізико-хімічні властивості ДП	29
7.2 Вплив органічних ПАР рослинних олій на взаємодії прецизійних пар паливної апаратури.....	31
7.3 Вибір раціонального складу суміші судового дистиллятного палива з пальмовою олією	32
7.4 Дослідження впливу сумішевого ДП з пальмовою олією на параметри робочого процесу судового дизеля.....	35
7.5 Розробка паливних систем під час роботи на НМДП	36
8 ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА РМ ІЗ РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ ПАЛИВОПОДАЧІ	43
9 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СЕУ	49
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	60

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДВЗ	— двигун внутрішнього згоряння
ККД	— коефіцієнт корисної дії
МКВ	— машинно-котельне відділення
ПДМНВ	— правила дипломування моряків та несення вахти
ПКВ	— поворот колінчатою валу
ПНВТ	— паливний насос високого тиску
СЕУ	— суднова енергетична установка
ЦПУ	— центральний пост управління
ДП	— діаметр плями зносу, мкм
ДТ	— дизельне паливо
МЕПО	— метиловий ефір пальмової олії
НМДП	— низькосірчисте малов'язке дистилятне паливо
ПАР	— поверхнево-активні речовини
ВГ	— відпрацьований газ

ВСТУП

Актуальність теми

Паливна апаратура (ПА) є найбільш складною та дорогою частиною сучасного суднового двигуна. Вона істотно впливає на надійність, економічність і екологічність роботи двигуна. Зношування деталей пар, що труться, ПА є однією з основних причин зниження ресурсу суднових двигунів [20].

В даний час спостерігається тенденція до зменшення вмісту сірки в бункерних паливах для суднових двигунів з метою покращення їх екологічних характеристик [3,14,16,17].

Дистилятні палива (ДП) є мастильним матеріалом для деталей паливної апаратури, що рухаються. Надійна робота дизеля багато в чому залежить від ступеня зношування вузлів та агрегатів паливної апаратури. Найбільш схильні до зносу прецизійні вузли паливного насоса високого тиску (ПНВТ) і форсунок.

Зниження вмісту сірки в паливі призводить до погіршення їх протизносних властивостей, внаслідок чого відбувається збільшення зносу пар ПА двигунів, що труться[9].

Крім того, видалення сірки з палива в процесі гідроочищення провід до видалення поверхнево-активні речовини (ПАР), які сприяють утворенню змащувальних плівок на поверхні металу.

При експлуатації дизелів на таких паливах йде інтенсивне зношування як плунжера, так і втулки ПНВТ. Зношування цих деталей призводить до збільшення зазорів у поєднанні. При збільшенні проміжків плунжерних пар знижується подача палива, погіршується якість розпилювання, порушується регулювання паливного насоса, виникають перебої в роботі двигуна і навіть його зупинки [22].

Існує ряд способів регулювання протизносних властивостей палив відповідно до сучасних вимог. Перший це застосування спеціальних протизносних присадок. Іншим є поліпшення триботехнічних характеристик палив за рахунок додавання в дистилятне паливо олії рослинного походження (рапсова, соєва, соняшникова, пальмова та ін.), біодизеля або мінеральної олії у певних співвідношеннях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки й техніки в галузі підвищення ефективності, надійності й екологічності експлуатації суднових енергетичних установок.

Мета і задачі дослідження

Поліпшення триботехнічних характеристик палив із низьким вмістом сірки. Вивчення впливу різних фізико-хімічних показників ДП на їх триботехнічні характеристики, вплив рослинних олій на фізико-хімічні характеристики сумішових суднових палив та їх протизносні властивості.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- виконати дослідження впливу фізико-хімічних показників ДП на їх триботехнічні характеристики, змащувальну здатність;
- розробити методику визначення критичних параметрів ДП, при досягненні яких інтенсивність зношування ПА ДВЗ значно зростає;
- встановити вплив рослинних олій на фізико-хімічні характеристики сумішевих суднових НМДП та їх протизносні властивості, визначити допустимі межі відсоткового вмісту різних рослинних компонентів у суднових НМДП без шкоди для їх якості;
- розробити комплексні науково-технічні рішення та рекомендації щодо застосування НМДП у ДВЗ для забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації їх ПА при роботі на цих видах палив.

Наукова новизна одержаних результатів

Показані результати теоретичних і експериментальних досліджень збереження триботехнічних властивостей палив з низьким вмістом сірки з використанням рослинних олій.

- встановлено вплив різних фізико-хімічних характеристик ДП на їхню змащувальну здатність;
- визначено критичні параметри ДП, при досягненні яких інтенсивність зношування значно зростає;
- встановлено вплив рослинних олій на фізико-хімічні характеристики сумішевих суднових НМДП, визначено фактори, що лімітують відсотковий вміст рослинних компонентів у суднових НМДП;
- встановлено вплив концентрації пальмової олії (ПО) на параметри робочого процесу ДВЗ;

- запропоновано ресурсозберігаючу систему паливопідготовки для застосування НМДП у ДВЗ.

Практичне значення одержаних результатів

Обґрунтовано можливість використання паливних сумішей на основі НМДП с додавленням ПО и МЕРМ в ДВЗ. Отримано результати економічної і екологічної ефективності.

Разработана ресурсосберегающая система топливоподготовки для применения в судовых дизелях НМДП.

Особистий внесок здобувача

Основні наукові положення й результати, представлені в дипломній роботі, одержані в 2025 р. на кафедрі СЕУ.

Апробація результатів.

Результати досліджень доповідалися 2025 р. на науково-технічній конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт»

1 ЕКОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЛИВ СУДНОВИХ ДВЗ

Питанням екологічної безпеки мореплавання в комплексі проблем сучасного морського транспорту приділяється підвищена увага. Найбільший збиток навколишньому середовищу завдається судновою енергетичною установкою, в результаті роботи якої утворюються такі шкідливі компоненти, як незгорілі вуглеводні, тверді частинки, оксиди азоту, парникові гази і, в окремих випадках, сполуки сірки. [4] У той час як на освіту ряду небезпечних компонентів, що містяться у відпрацьованих газах, можна впливати за рахунок спеціальної організації процесів в циліндрі двигуна, емісія сірковмісних компонентів цілком і повністю визначається вмістом сірки у використовуваному паливі. Як наслідок, рішення проблем скорочення викидів SO_x вимагає специфічних рішень. З 2020 року набули чинності нові правила щодо обмеження до 0,5% вмісту сірки у використовуваному на судах паливі [13].

Принциповим питанням є те, що досягнення нормативних показників щодо викидів SO_x може бути отримано в результаті використання спеціальних видів низькосірчистого палива або шляхом очищення в спеціальних периферійних пристроях відпрацьованих газів двигунів на традиційних високосірчистих сортах палива. Цій проблемі присвячені матеріали міжнародних організацій: IMO (International Maritime Organization — Міжнародна морська організація), ICS (Міжнародна палата судноплавства — International Chamber of Shipping), ISO (Міжнародна організація по стандартизації — International Standard Organization), класифікаційного товариства *Det Norske Veritas* и *Germanischer Lloyd* (далеє — DNV GL), в яких відображені останні нормативні зміни і заходи щодо забезпечення дотримання вимог до викидів сполук сірки, а також технологічні і ринкові розробки для альтернативних рішень з проблеми скорочення викидів SO_x . [1,2,3]

З урахуванням того, що суднові енергетичні установки є основними споживачами високосірчистих важких палив — High-Sulphur Fuel Oil (HSFO), для регулювання викидів SO_x IMO в 2015 г. були введені зони контролю — Sulphur Emission Control Areas (SECA).

Після огляду допустимості застосування сумісного низько сірчистого мазуту, IMO було прийнято рішення про те, що глобальне обмеження вмісту сірки в паливі 0,5% для всіх районів плавання що набула чинності з 1 січня 2020 г. Ця

вимога було введено в додаток до обмежень в 0,1% сірки в північноамериканських і американських районах Карибського басейну, Північного та Балтійського морів. При цьому судам, на енергетичних установках яких встановлені системи очищення відпрацьованих газів від сполук сірки, буде дозволено не припиняти використання HSFO.

2 СКЛАД ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ

Судовий ДВЗ, виробляючи механічну енергію за рахунок окислення палива киснем повітря, в процесі роботи здійснює неперервний тепловий і масовий обмін з атмосферою.

Паливо для судових дизелів умовно ділиться на два основні класи дистильоване (легке) і важке, складається:

- вуглець C (83...87%);
- водень H (12...14%);
- сірка S (< 5%);
- кисень O (0,1...1%).

До складу повітря входить:

- кисень O 21% ;
- азот N 79%.

У робочому процесі дизеля беруть участь 79% азоту N_2 з повітря, 87% вуглецю C і до 4% сірки S в паливі. В ВГ дизеля залишається до 75% азоту, до 6% двоокису вуглецю CO_2 і до 13% кисню плюс вода H_2O (рисунок 2.1). Ці чотири компоненти складають понад 99...99,9% обсягу ВГ. Решта 1...0,1% обсягу ВГ складають домішки.

Склад відпрацьованих газів дизелів представлений в таблиці 2.1.

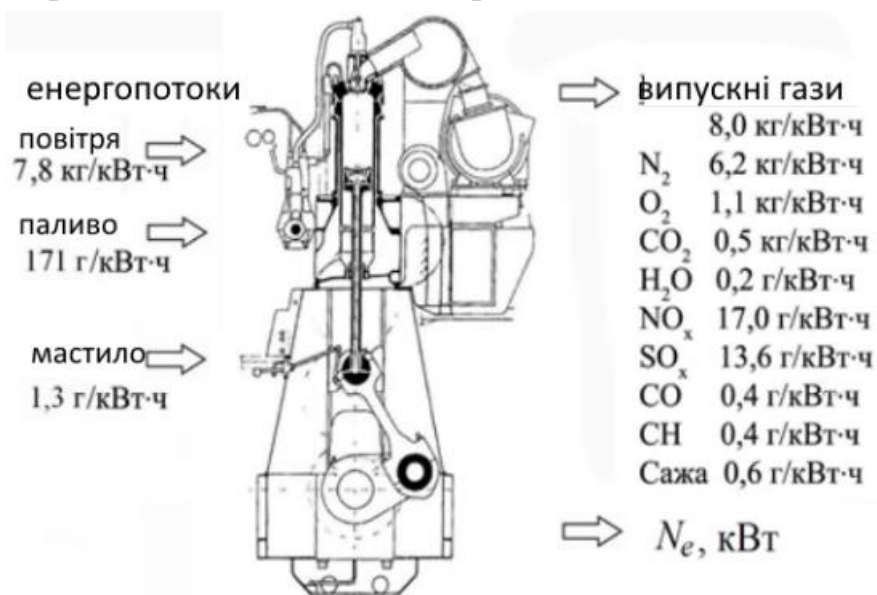


Рисунок.2.1 - Співвідношення вхідних енергопотоків і складу випускних газів дизеля (джерело - «Wärtsilä»)

Таблиця 2.1 Склад відпрацьованих газів дизелів

Компоненти	Токсичність	Дизелі
Азот, %	-	76...78
Кисень, %	-	2...18
Пари води, %	-	0,5...4
Вуглекислий газ, %	створює парниковий ефект	1...10
Окис вуглецю, %	+	0,01...0,5
Оксиди азоту, %	+	0,001...0,4
Вуглеводні, %	+	0,01...0,5
Сажа, г/м ³	може нести канцерогенні речовини	0,01...1,1

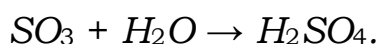
Найбільш небезпечними забруднювачами (шкідливими викидами) атмосфери є наступні газоподібні речовини і частинки, що викидаються з випускними газами:[4,11]

- окис вуглецю CO і двоокис вуглецю CO_2 , які утворюються в результаті згоряння палива;
- оксиди азоту NO_x , що утворюються в циліндрі двигуна при температурі вище $1500^\circ C$, коли азот стає хімічно активним газом;
- оксиди сірки SO_x : ангідриди SO_2 і SO_3 , що утворюються в результаті окислення сірки в паливі;
- продукти неповного згоряння C_xH_x ;
- дрібні тверді частинки в повному обсязі згорілого палива, масла, сажі та ін.

Оксиди сірки SO_x утворюються під час горіння сірки S , що міститься в паливі. Отриманий в результаті реакції діоксид сірки SO_2 може окислюватися далі до сірчистого ангідриду:



Далі, при температурі нижче $815K$, відбувається реакція SO_3 з парами води, що призводить до утворення сірчаної кислоти H_2SO_4 , що викликає потім корозію стінок ЦПГ.



3 МЕЖДУНАРОДНІ ПРАВИЛА І СТАНДАРТИ ПО ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОВИХ ДВЗ

3.1 Вимоги міжнародних конвенцій

В даний час діють кілька міжнародних Правил і стандартів щодо обмеження шкідливих викидів двигунів морських і річкових суден.

- Правила ІМО (International Maritime Organization - ІМО) - Додаток VI «Правила запобігання забруднення атмосфери з суден» до Конвенції МАРПОЛ 73/78 (MARPOL 73/78, Annex VI);
- Директива Європейського парламенту 2005/33 / ЄС;
- Глава 8А «Викиди дизельними двигунами вихлопних газів і забруднюючих частинок» Резолюції № 61 Європейської Економічної Комісії ООН (ЄЕК ООН) для суден внутрішнього плавання.
- Крім того, Додатком VI визначено рівні граничного вмісту сірки в паливі (рисунок 3.1).
- Додатком VI Міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78. При цьому значно посилилися вимоги щодо обмеження шкідливих викидів з суден, в тому числі і окислів сірки (SO_x), перш за все в призначених Районах контролю викидів SECA (SO_x Emission control areas).[1,2,11]

Додаток VI Міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 вступило в силу в липні 2010 року. Головні зміни нової редакції пов'язані з підвищенням вимог щодо зниження емісій SO_x з морських суден. З 1 січня 2012 року кількість сірки в судовому паливі було обмежено до 3,50%. А після цього з 1 січня 2020 року діє обмеження до 0,50% по всьому світу, Обмеження щодо викидів SO_x в зонах SECA (SO_x Emission control areas), з 1 січня 2015 року вміст сірки в рідкому паливі, що використовується на судах в районі Контролю викидів SO_x , не повинно перевищувати 0,10%.

Директивою ЄС - 2005/33 / ЄС обмежується вміст сірки величиною 0,1% у всіх сортах морського палива, використовуваного у внутрішніх водах Євросоюзу і біля причалів ЄС (більше двох годин), починаючи з 01 січня 2010 року. В окремих Європейських країнах Адміністрація порту встановлює конкретні процедури переходу на палива з низьким вмістом сірки для всіх елементів судової енергетичної установки СЕУ.[14,15,16,17,18]

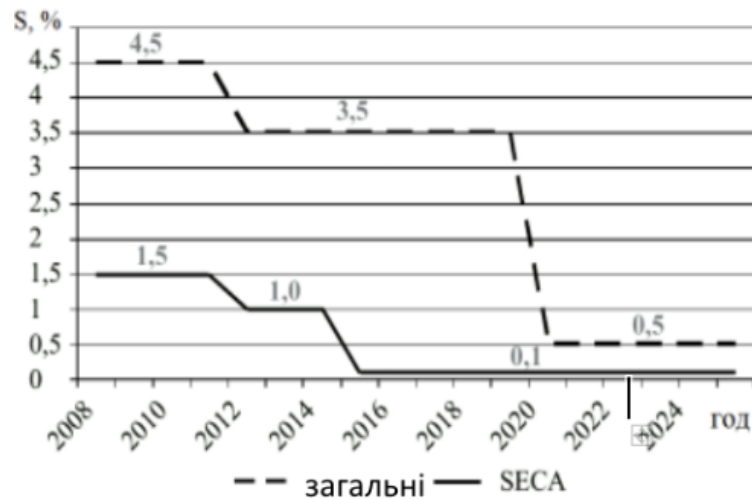


Рисунок.3.1 Граничні рівні вмісту сірки в паливі для суднових ДВЗ (MARPOL 73/78, Annex VI Fuel Sulfur Limits)

Географіязон SECA стрімкорозширюється. В даний час вона включає в себе: Балтійськеі Північне моря, втому числі протоку Ла-Манш, атакож Західнеі Східне узбережжя Північної Америки, Мексиканську затоку і Карибськийба-сейн, якістосуються США (рисунок. 3.2). Крім того, слід зазначити, що в зону SECA може бути включений і будь-який інший морський район, включаючи портове, призначений Організацією ІМО відповідно до критеріїв і процедурами, викладеними в додатку III до IV Додатку конвенції MARPOL 73/78.

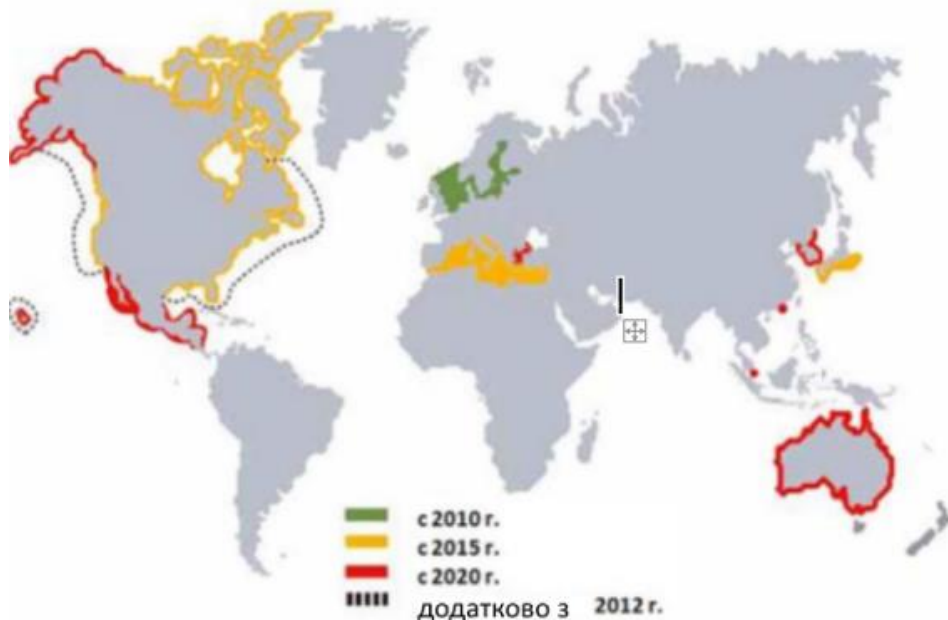


Рисунок.3.2 Географічне розташування зон SECA

В ІМО намітилася тенденція щодо посилення існуючих інструментів щодо запобігання забруднення середовища, а також по створенню нових конвенцій. Крім того, що ІМО регулює шкідливі викиди в атмосферу з морських суден, ще більш жорсткі вимоги пред'являються різними країнами при заході судна в територіальні води.

4 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І СПОСОБІВ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ SO_x

4.1 Способи зниження оксидів сірки SO_x

Наявність сірки в паливі призводить до утворення продуктів її окислення в камері згоряння двигуна. [13,28]

Комплекс оксидів сірки SO_x палива нафтового походження складається в основному з SO_2 (близько 93%) і SO_3 (близько 7%). Вони сприяють корозії деталей двигуна при появі на випуск умов для появи сірчаної кислоти H_2SO_4 .

Скорочення викидів SO_x дизеля досягається:

первинний метод шляхом застосування малосірчистого палива;

вторинний метод шляхом застосування технології уловлювання оксидів сірки з ВГ.

4.2 Використання низькосірчистого дистиллятного палива

Відповідно до вимог конвенції знизити кількість SO_x в вихлопних газах судів є використання низькосірчистих дистиллятів палив (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 Основні характеристики дистиллятів палив по ISO 8217 2017

Показник	розмірність	межі	ISO 8217:2017			
			DMX	DMA	DMZ	DMB
Щільність при 15°C	кг/м ³	max	–	890	890	900
в'язкість при 40°C	сСт (мм ² /с)	min max	1,40 5,50	1,50 6,00	3,0 6,0	– 11,0
Температура спалаху	°C	min	43	60	60	60
Температура застигання	°C					
- зимовий		max	–	–6	6	0
- літній	max	–	0	0	6	
Вміст сірки	%	max	1,00	1,00	1,00	1,50
Цетанове число	%	min	45	40	40	35
Коксуємость	%	max	0,30	0,30	0,30	0,30
Зольности	%	max	0,01	0,01	0,01	0,01

З аналізу літературних даних випливає, що при застосуванні НМДП в енергетичних установках може виникати низка проблем щодо надійності роботи ПА, через зниження змащувальної здатності та в'язкості палива на вході в двигун.

Дистилятні палива в суднових дизелях є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури. Надійна робота дизеля багато в чому залежить від ступеня зношування вузлів та агрегатів паливної апаратури. Найбільш схильні до зносу прецизійні вузли ПНВТ і форсунок. На поверхні пар, що труться, при контакті з паливом утворюється граничний шар, що володіє специфічними властивостями. Цей граничний шар виконує функцію мастильної плівки. Він запобігає безпосередній контакт поверхонь тертя, при цьому зменшується сила тертя і знос деталей, що труться.[34]

Залежність протизносних властивостей ДП від вмісту сірки обумовлена її здатністю утворювати на поверхнях тертя нові хімічні сполуки у вигляді твердих плівок з оксидів та сульфідів металу. Ці тверді плівки грають величезну роль в процесах тертя і зносу – збільшують зносостійкість і зменшують силу тертя.

У ДП з низьким вмістом сірки зі збільшенням глибини очищення відбувається зміна як кількості, а й складу сірчистих сполук. Насамперед видаляються сірчисті сполуки з найбільшою реакційною здатністю (сульфіди), а залишаються відносно стабільні речовини, переважно тіофени. Бензо- і дибензтіофени мають недостатню хемосорбційну активність для утворення поверхневих плівок, що перешкоджають зносу металу. Видалення з'єднання сірки в процесі виробництва малосірчистих дизельних палив призведе до погіршення їх протизносних властивостей.[29,30]

Зі збільшенням вмісту сірки з 0,01 до 0,5 % (поліпшуються протизносні властивості дизельних палив в 1,2...1,5 рази (рисунок 4.1).

В'язкість ДП істотно впливає на знос металу. Так, зі зменшенням в'язкості палива з 5,24 до 0,8 сСт, ДП збільшується з 345 до 816 мкм (в 2,4 рази), а площа плями зносу поверхонь, що труться, зростає в 5,5 рази. Зменшення її значення нижче 2,5 сСт істотно погіршує протизносні властивості ДП, що тягне за собою зниження надійності та ресурсу паливної апаратури двигунів.

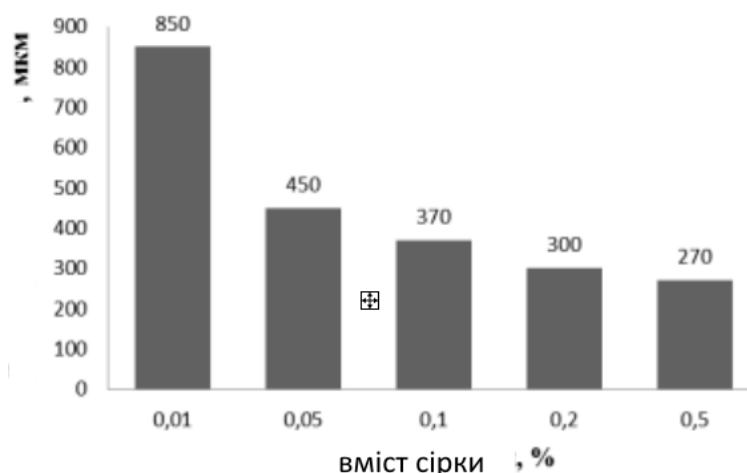


Рисунок.4.1 Залежність величини діаметра плями зношування від концентрації сірки в ДП

Компанія MAN Diesel & Turbo вважає, що в'язкість дистильованого палива має один із серйозних впливів на інтенсивність зношування прецизійних пар паливної апаратури. Компанія MAN Diesel & Turbo особливо вказує на серйозні проблеми, які можуть виникати у ПНВТ, якщо в'язкість палива буде нижче 2 сСт.[23,27]

Компанія Wartsila солідарна у цьому питанні з компанією MAN Diesel & Turbo. Так, залежно від типу дизеля та конструкції ПНВТ, вона встановлює обмеження на нижні значення цього параметра для ДП. Причому в деяких випадках мінімальна допустима величина в'язкості становить не менше 3 сСт.[33]

Мінімальна в'язкість палива для дизелів Wartsila знаходиться в інтервалі 1,8...3,0 стС. У таблиці 4.2 представлені рекомендації підприємства для різних типів дизелів.[20]

Таблиця 4.2 Допустима мінімальна в'язкість палива для СДВЗ

Тип 4-тактного двигуна	Мінімальна в'язкість палива, сСт	
	ПНВТ	Common rail
Wartsila 20	1,8	1,8
Wartsila 26	2,0	
Wartsila Vass 32/32LN	2,0	
Wartsila 32	2,0	2,0
Wartsila 38	2,0	2,0
Wartsila 46	2,8	2,0
Wartsila 64	2,8	
Sulzer S20	3,0	
Sulzer Z40, ZA40, ZA40S	2,0	

При збільшенні температури, отже зменшенні в'язкості палива, величина ДПЗ зростає. Однак її зростання залежить від вмісту сірки в паливі та вихідної в'язкості. Для малов'язких низькосірчистих палив приріст ДПЗ мінімальний і становить лише 3,7 %. Для більш високих значень сірки та в'язкості вплив температури виявляється більшим і становить орієнтовно 10 %.[21]

Тому компанія MAN Diesel & Turbo рекомендує встановлення додаткового охолоджувача в паливній системі, для регулювання в'язкості на вході в двигун, щоб вона була не нижче 2 сСт перед ПНВТ. На рисунку 4.2 наведено приклад такої системи паливопідготовки.[22]

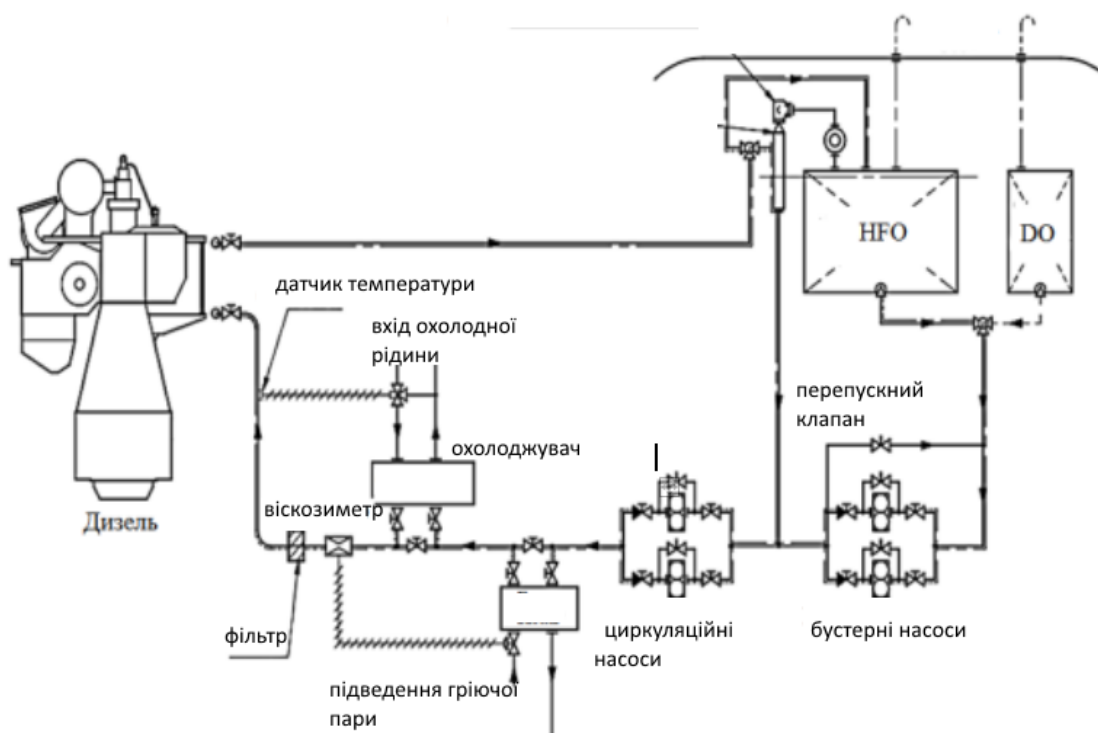


Рисунок.4.2 Паливна система з охолоджувачем після циркуляційного насосу

Змащувальна здатність ДП мало досліджена. Комплексні дослідження впливу різних показників ДП на їх триботехнічні властивості взагалі відсутні. ДП, як правило, мають важкий фракційний склад, іншу в'язкість та інші фізикохімічні характеристики. Наявної інформації недостатньо прийняття рішень про те, коли і як слід використовувати протизносні присадки і чи потрібно це робити взагалі.

5 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПОЛІПШЕННЯ ПРОТИЗНОСНИХ ВЛАСТИВИЙ НИЗКОСЕРНИСТИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ

Існує ряд способів регулювання протизносних властивостей низькосірчистих малов'язких дистилятних палив палив (НМДП) відповідно до сучасних вимог. Перший – це застосування спеціальних протизносних присадок. Іншим є поліпшення триботехнічних характеристик палив за рахунок додавання в ДП олії рослинного походження (рапсова, соєва, соняшникова, пальмова та ін), біоопалива або мінеральної олії у певних співвідношеннях.[30]

5.1 Протизносна присадка до низькосірчистих ДП

Поверхнево-активні речовини (ПАР), присутні у паливі, значно впливають на протизносні властивості. Так, багато сірчистих сполук, що містяться в ДП – сульфіди та бензотіофени, характеризуються високими протизносними властивостями. Однак при обмеженні вмісту сірки в паливі нижче 0,1% потрібне застосування спеціальних присадок для забезпечення змащувальної здатності.

Основою протизносних присадок є карбонові кислоти. В якості ефективних змащувальних присадок можуть бути використані технічні алкілсаліцилові кислоти (ТАСК), присадки Dodilube-4940, Kerokorr LA99C, Lubrisol 539. Вплив протизносної присадки на протизносні властивості НМДП з вмістом таблиця 5.1.[8]

Таблиця 5.1 Вплив присадок на протизносні властивості ДП

Найменування зразка	Концентрація присадки у ДП, ppm	Діаметр плями зносу, мкм, ДП із вмістом сірки, ppm	
		350	500
ДП	–	660	556
Протизносна присадка на основі ТАСК	100	386	
Dolilube 4940	150	384	–
Kerokorr LA 99C	150	379	–
Lubrisol 539	200	–	434

Принцип дії протизносних присадок полягає в утворенні міцної плівки на поверхні, що захищається. Плівка складається з продуктів ме-ханохімічних пе-

ретворень присадки на поверхні металу. Спосіб формування залежить від режиму тертя. При рідинному режимі цілком достатньо ефективною адсорбції (фізична адсорбція, хемосорбція) присадки, що покращує змащувальні властивості палива. У режимі граничного тертя шар змащувальної рідини між парами, що труться, постійно порушується і виникає загроза схоплювання тертьових поверхонь.

З таблиці 5.1 видно, що значення діаметра плями зношування значно зменшується від 20% до 45% при використанні присадок з концентрацією 0,015 ... 0,02% маси. З наведених даних випливає, що застосування присадок для поліпшення протизносних властивостей суднових ДП виявляється дуже ефективним.

Важливою властивістю рослинних олій є здатність поєднуватися в будь-яких пропорціях з нафтопродуктами. Ця особливість рослинних олій дозволяє отримувати моторні палива із заданими фізикохімічними властивостями змішуванням різних компонентів у необхідних пропорціях

Рослинні олії у вигляді моторного палива можна використовувати як у чистому вигляді, так і в суміші з дизельним та іншими нафтовими паливами, а також із газовими конденсатами, спиртами, ефірами, іншими нетрадиційними паливами.

Дослідження щодо застосування рослинних олій та палив на їх основі проведені найбільшими двигунобудівними фірмами: Allis Chalmers, Caterpillar, Cummins, General Motor, John Deere, Harvester (США), Perkins, Ricardo (Великобританія), Mercedes-Benz, Daimler-Benz, Deutz, Volkswa (Німеччина), Volvo (Швеція), Isuzu, Toyota, Komatsu (Японія).

5.2 Додавання біоприсадок до НМДП для покращення його протизносних властивостей

Біодизельне паливо виробляється переважно на основі рослинних олій (рапсова, соєва, арахісова, пальмова, рицинова та ін) і продуктів їх переробки етерифікацією. Цільові продукти реакції, відомі як метилові ефіри, мають властивості пального матеріалу і вже застосовуються в якості альтернативних дизельних палив і добавок до традиційних нафтових палив. Так, у Європі та США використовуються такі палива, як метилові ефіри рапсової олії (Rape Methyl Ester

(RME) та соєвої олії (Soybean Methyl Ester), відомі ще як Fatty Acid Methyl Esters.[5,6,7,8]

Основною відмінністю біодизеля від звичайного дизпалива є його екологічна чистота, оскільки використання цього палива знижує емісію практично всіх шкідливих речовин, порівняно з нафтовими дизельними паливами.[26]

Біодизель, незважаючи на значно менший вміст сірки, характеризується хорошими мастильними властивостями, що підвищує надійність двигуна.

Використання біодизельного палива як компонента змішування з нафтовим дизпаливом не потребує модернізації звичайного дизельного двигуна на відміну від таких альтернативних палив, як крекований природний газ, скраплеваний природний газ та етанольні суміші. Ефіри рослинних олій добре змішуються з нафтовими дизельними паливами і не розшаровуються навіть за наявності розчиненої води.

Вплив змісту 1, 2, 5, 10 та 20% МЕРМ у НМДП на силу тертя представлено на рисунку 5.1.

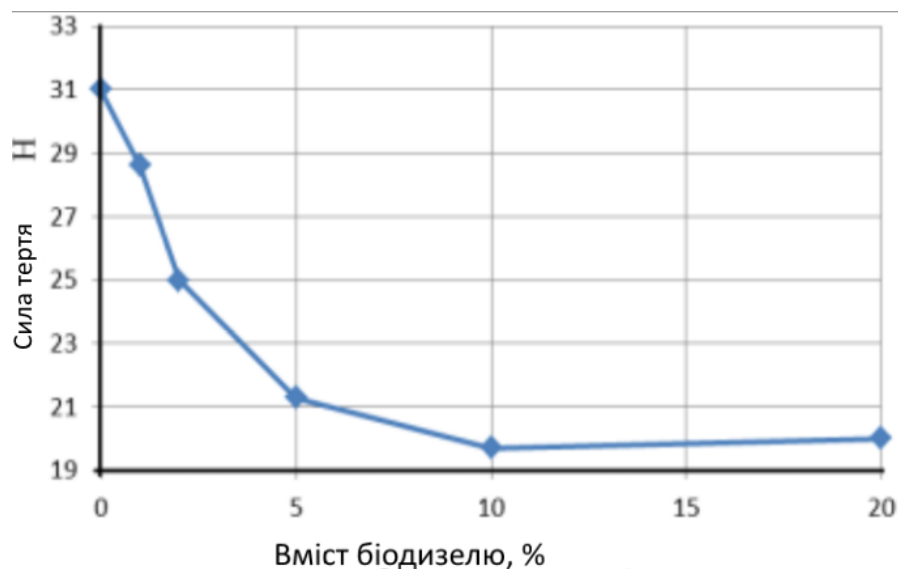


Рисунок.5.1 Залежність сили тертя від вмісту біодизеля у сумішевому паливі

Видно, що мінімальна сила тертя досягається при 10% вмісті біодизеля. Найбільш значно сила тертя знижується в інтервалі концентрацій 1 ... 5%. Однак вартість біодизельного палива вища, ніж вартість дизельного палива, в 2...3 рази. Застосування біодизеля сильно збільшує вартість палива, що призведе до збільшення витрат на експлуатацію суден.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ НА ЇХ ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Суднові палива мають бути виготовлені відповідно до вимог цього стандарту за технологією, затвердженою в установленому порядку. За фізико-хімічними показниками суднові дистильтані палива повинні відповідати вимогам, зазначеним у таблиці 6.1.[9,10]

Таблиця 6.1 Основні характеристики дистильтаніх палив по ISO 8217 2017

Characteristic	Unit	Limit	Category ISO-F-			
			DMX	DMA DFA	DMZ DFZ	DMB DFB
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s ^a	Max	5,500	6,000	6,000	11,00
		Min	1,400	2,000	3,000	2,000
Density at 15 °C	kg/m ³	Max	-	890,0	890,0	900,0
Cetane index	-	Min	45	40	40	35
Sulfur ^b	mass %	Max	1,00	1,00	1,00	1,50
Flash point	°C	Min	43,0	60,0	60,0	60,0
Hydrogen sulfide	mg/kg	Max	2,00	2,00	2,00	2,00
Acid number	mg KOH/g	Max	0,5	0,5	0,5	0,5
Total sediment by hot filtration	mass %	Max	-	-	-	0,10 ^c
Oxidation stability	g/m ³	Max	25	25	25	25 ^d

З метою оцінки впливу в'язкості на протизносні властивості ДП було досліджено зразки палив з різною в'язкістю, які незначно відрізняються як за вмістом сірки, так і за іншими показниками. Результати експериментальних досліджень СДП на чотирикульковій машині тертя представлені в таблиці 6.2, рисунку 6.1.

Таблиця 6.2 Діаметр плями зносу різних зразків

№ зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
В'язкість, сСт	7,26	6,82	5,64	5,43	5,14	4,40	3,39	3,06	2,82	2,76	2,58	1,93	1,90
ДПЗ, мкм	433	463	438	400	443	464	496	437	580	445	492	592	683

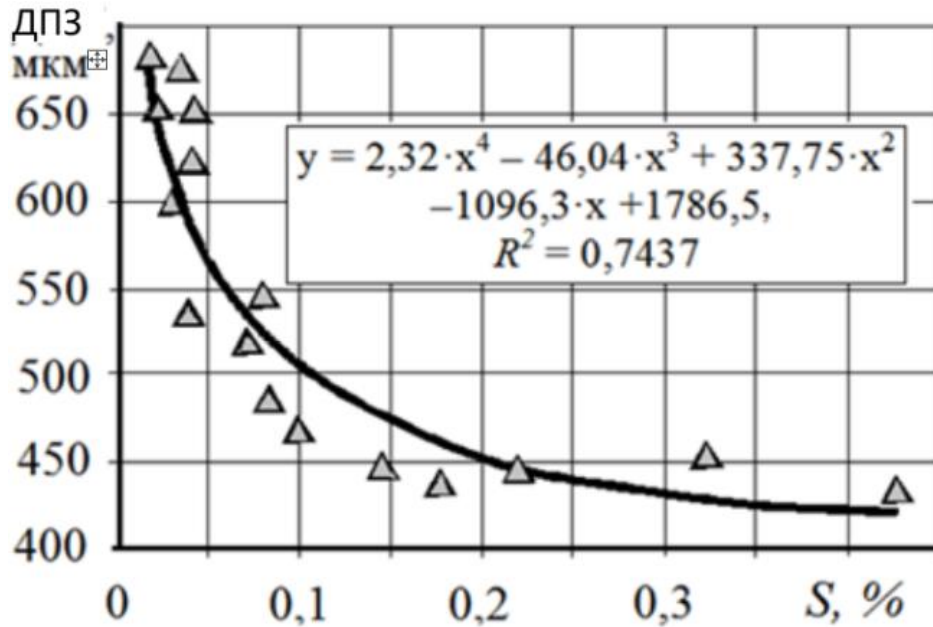


Рисунок .6.1 Залежність ДПЗ від в'язкості СДП

В'язкість ДП істотно впливає на його змащувальну здатність. З зменшенням в'язкості палива з 7,26 до 1,9 сСт ДПЗ збільшується з 433 до 682 мкм (рис. 6.1). Це пов'язано з тим, що більш в'язкі палива містять більшу кількість природних поверхнево-активних речовин, ніж малов'язкі, що покращує умови тертя та зношування.

В'язкість палива нижче 3 сСт серйозно впливає на ресурс і надійність роботи паливних насосів високого тиску. Коли в'язкість палива дуже низька, гідродинамічна змащувальна плівка в плун-жерних парах судових ПНВТ може бути недостатньою, в результаті чого йде підвищений знос і виникають задираки ПНВТ.

Результати досліджень впливу вмісту сірки в паливі на інтенсивність зношування пар, що труться, наведені в таблиці 6.3 [24,29]

Таблиця 6.3 Вплив фізико-хімічних показників ДП на його протизносні властивості

Паливо	Вміст сірки , %	ДПЗ, мкм
1	0,22	443
2	0,177	437
3	0,145	445
4	0,099	467
5	0,083	484
6	0,042	651
7	0,035	674
8	0,023	652
9	0,017	682
10	0,031	597
11	0,08	545
12	0,04	620
13	0,04	535
14	0,071	517
15	0,426	433
16	0,323	452

На рисунку 6.2 представлені трибологічні характеристики дистилатних палив залежно від вмісту сірки.[25]

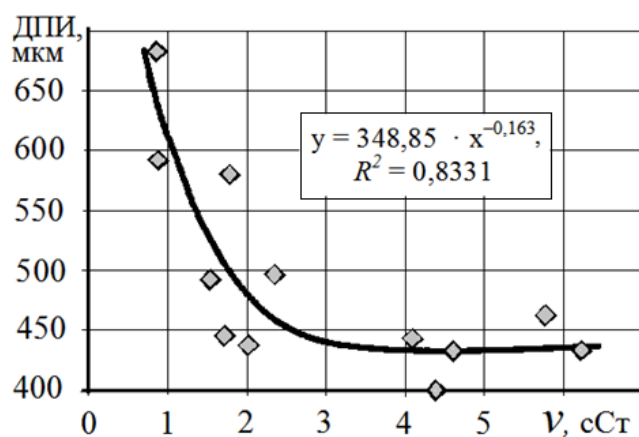


Рисунок 6.2 Вплив вмісту сірки на величину діаметра плями зносу

При збільшенні вмісту сірки в паливі більше 0,1 ... 0,15% вплив вмісту сірки в ДП на величину ДПЗ практичні відсутня. Зі збільшенням вмісту сірки з 0,019 до 0,426 % покращуються змащувальні здібності дизельних палив, діаметр плями зношування зменшується на 31 %.

Результати досліджень впливу щільності ДП на протизносні властивості представлені на рисунку 6.3.

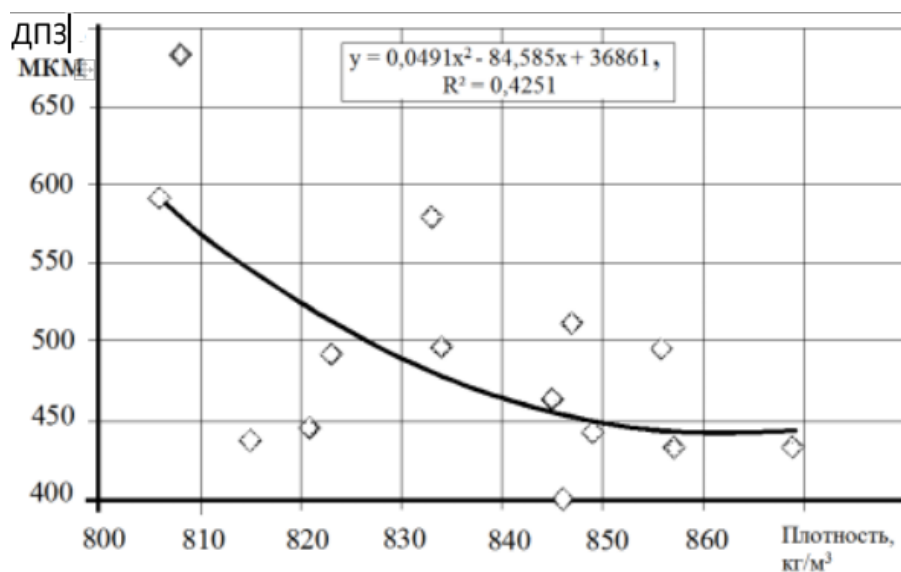


Рисунок.6.3 Залежність ДПЗ від щільності СДП

Можна стверджувати, що хорошими протизносними властивостями мають палива з щільністю більше 850 кг/м^3 при $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Виконані дослідження трибологічних характеристик ДП із різним вмістом сірки дозволило зафіксувати значне погіршення протизносних властивостей ДП. Величина ДПЗ збільшується на 41%. Причому відбувається різке зростання цього показника (на 18 %) після першого циклу знесірчування, коли вміст сірки в паливі ще досить високо і становить 0,349 % мас. А при вмісті сірки 0,22% мас. величина ДПЗ практично досягає свого максимального значення та подальше зниження концентрації сірки в паливі практично не викликає збільшення зносу пар тертя (рисунок 6.4).

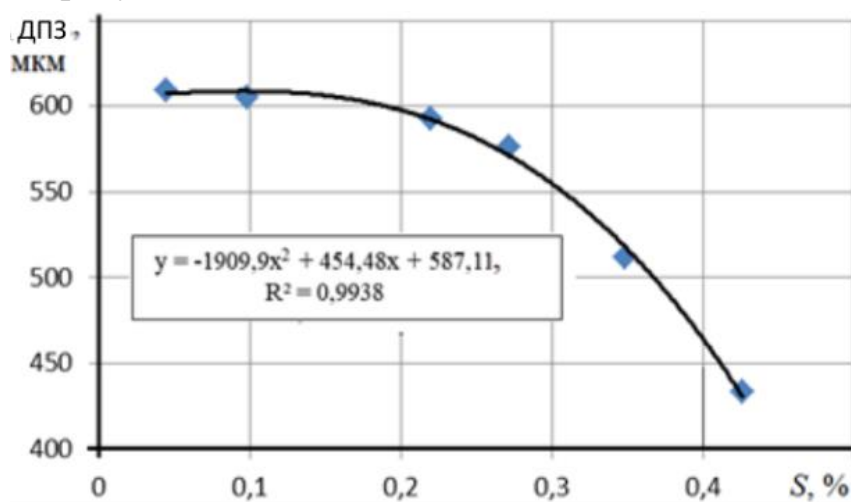


Рисунок.6.4 Вплив вмісту сірки на трибологічні властивості СДП

Залежність змащувальної здатності ДП від вмісту сірки обумовлена її здатністю утворювати на поверхнях тертя нові хімічні сполуки у вигляді твердих плівок із оксидів та сульфідів металу.

У ДП з низьким вмістом сірки зі збільшенням глибини очищення відбувається зміна як кількості, а й складу сірчистих сполук. Стійкість сірчистих сполук зростає у ряду: меркаптани – дисульфіді – сульфіді – тіофани – тіофени. У першу чергу видаляються сірчисті сполуки з найбільшою реакційною здатністю (меркаптани, сульфіді), а залишаються відносно стабільні речовини, в основному тіофени. Однак бензо- і дибензтіофени мають недостатню хемосорбційну активність для утворення поверхневих плівок, що перешкоджають зносу металу.

7 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУМІШЕЙ СУДОВИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ З ДОДАВАННЯМ РОСЛИННИХ МАСЕЛ

7.1 Вплив присадок РМ на фізико-хімічні властивості ДП [31]

Одним із способів поліпшення змащувальної здатності ДП є їх легування різними добавками рослинного та мінерального походження. Додавання олії (РО) в ДП має цілу низку переваг. Так, РО мають низький вміст сірки та ароматичних сполук, що означає практично повну відсутність у вихлопних газах оксидів сірки та канцерогенних поліциклічних ароматичних вуглеводнів (таблиця 7.1). У викидах при спалюванні РО міститься менша кількість вуглеводнів, що не горіли (наявність 6 атомів кисню в молекулі покращує повноту згоряння палива). Паливо на основі РО відносно нешкідливе для довкілля. Крім цього, у хімічному складі рослинної олії міститься значна кількість органічних ПАР, зокрема олеїнових кислот, які сприяють створенню хемосорбційних плівок на поверхні металу в процесі тертя, внаслідок чого зменшується зношування паливної апаратури. Однак компонент рослинної олії впливає на перебіг робочого процесу судового дизеля. У першу чергу додавання рослинної олії в ДП впливає на процеси розпилювання, сумішоутворення і на температуру газів.

У таблиці 7.1 наведено Фізично-хімічні показники найбільш поширених рослинних олій.

Аналіз представлених даних фізико-хімічних властивостей рослинних олій показує, що в молекулах рослинних олій міститься значна кількість атомів кисню (близько 10%). Це призводить до деякого зниження їхньої теплоти згоряння. Але одночасно це знижує і температуру їх згоряння в дизельних двигунах, внаслідок чого значно покращуються екологічні властивості цих палив. У дослідженнях роботи дизелів на рослинних оліях відзначається зниження димності газів, що відпрацювали, і концентрації в них продуктів неповного згоряння палива.[32,35]

Таблиця. 7.1 Фізико-хімічні показники найбільш поширених рослинних олій.

Найменування показника	Соеве олія	Пальмова олія	Ріпакова олія	Сняшникова олія
Щільність при 20 С, сСт	924	943	916	923
Кінематична в'язкість при 40 С, сСт	31,2	106,0	42,1	30,7
Масова частка сірки, % мас	0	0	0,005	0
Кислотне число, мг КОН/г	0,03	2,59	4,46	2,16
Температура спалаху, що визначається в закритому тигле, С	243	224	255	243
Температура охолодження	12	+30	20	16
Зміст, % (мас)				
С	77,5	77,6	78,0	77,6
Н	11,5	12,0	10,0	11,5
О	11,0	11,4	12,0	10,9
Коксування 10%-ного залишку, % (мас)	0,44		0,4	0,51

Температура спалаху всіх масел, як впливає з даних таблице 7.1, практично однакова і знаходиться в межах 224 ... 255 ° С. Рослинні олії за нормальних умов є маслянисті рідини з підвищеними проти ДП щільністю і кінематичної в'язкістю. В'язкість всіх масел більша, ніж в'язкість ДП, особливо високий показник у ПО. Крім того, ця олія відрізняється від інших високою температурою застигання. Вона становить +30 °С, тоді як у інших рослинних олій вона нижче 0 °С.

Можливими варіантами поліпшення триботехнічних властивостей ДП є додавання мінеральних мастильних матеріалів, які мають високу в'язкість, відмінну адгезію, хороші змащувальні властивості.

Оцінка триботехнічних властивостей сумішевих палив з добавками мінеральних і рослинних компонентів проводилася на чотирикульковій машині тертя ЧМТ-1. Протизносні властивості експериментальних сумішей оцінювали по діаметру плями зносу кульок. Дослідження проводили при різних співвідношеннях ДП та добавок. Результати випробувань подано на рисунку 7.1.

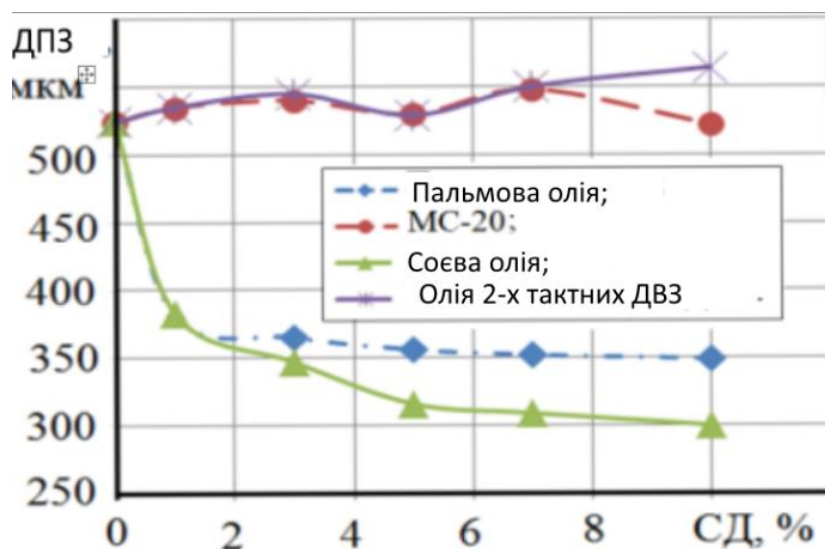


Рисунок.7.1 Вплив концентрації рослинних та мінеральних масел у суміші з ДП на ДПЗ

Величина ДПЗ значно зменшується при додаванні будь-яких рослинних олій у ДП. Особливо це проявляється за концентрації до 1 %. При концентрації рослинних компонентів від 1 до 3 % маси зменшення ДПЗ не так значно. Збільшення концентрації рослинної олії більше 3% має слабкий вплив на протизносні властивості ДП. Величина ДПЗ практично не зменшується. Даний ефект можна пояснити тим, що вже при концентрації, приблизно рівної 3%, на поверхні випробуваних деталей утворюється досить міцна плівка ПАР, що містяться в рослинній олії. Таким чином, можна припустити, що застосування сумішевого мінерально-рослинного палива призведе до збільшення терміну служби паливної апаратури за рахунок зниження зносу.

7.2 Вплив органічних ПАР рослинних олій на взаємодії прецизійних пар паливної апаратури

У рослинних оліях міститься велика кількість олеїнової кислоти, яка є ПАР. Процес тертя прецизійних пар паливної апаратури за наявності ПАР характеризується орієнтацією молекул і освітою на поверхні тертя адсорбційного шару. ПАР викликають виникнення градієнта напруг біля поверхонь тертя в міру наближення до міжфазної межі двох середовищ.[8,10]

При контакті прецизійних пар паливної апаратури з вуглеводневими рідинами, що містять органічні поверхнево-активні речовини, на поверхні ПА утворюється граничний шар, товщина якого залежить, як від фізико-хімічних властивостей рідини, так і від природи твердої підкладки. Цей граничний шар полегшує диспергування металу на поверхневому шарі, тим самим сприяючи прип-

рацюванню його при високих контактних тисках. Таким чином, при додаванні навіть невеликих кількостей рослинних олій в паливо відбувається освіта на поверхні сполучень, що труться, міцних плівок ПАР. Останні, маючи міцне зчеплення з матеріалом поверхні тертя, навіть за умов високих контактних тисків, властивих прецизійним парам ПА, оберігають їхню відмінність від інтенсивного зношування, власне виконуючи роль, яку грали сполуки сірки в ДП.

7.3 Вибір раціонального складу суміші суднового дистилятного палива з пальмовою олією

Змащувальна здатність ДП значно покращується при додаванні будь-яких рослинних олій. Однак відмінності фізико-хімічних властивостей рослинних масел від властивостей ДП може призвести до того, що при їх змішуванні фізико-хімічні характеристики не будуть відповідати вимогам нормативної документації для ДП.[5,6]

Можлива концентрація використання РО у ДП для суднових дизелів визначається їх фізико-хімічними властивостями. Кінематична в'язкість ПО складається 106 сСт при 40 оС, що у 15 разів вище, ніж у ДП. У порівнянні з ДП, пальмова олія відрізняється також високою щільністю ρ . [7]

Тож якщо ДП при 15 °З має $\rho = 843 \text{ кг/м}^3$, то ПО, характеристика якого наведено у таблиці 7.4, має $\rho = 952 \text{ кг/м}^3$. Слід зазначити помітну відмінність ПО від ДП та за фракційним складом. Температура початку кипіння ПО дуже висока (близько 280-300 ° С). Крім того, у ПО теплота згоряння дещо нижча, ніж у СДП.

При додаванні ПО до ДП воно повністю розчиняється, утворюється стабільна колоїдна суміш, не розшаровується протягом тривалого часу.

Виконане дослідження показників якості вихідного ДП та сумішових палив на його основі з ПО дозволило встановити, які параметри лімітують допустиму концентрацію ПО у складі сумішевого палива для суднових дизелів. Зміни фізико-хімічних показників сумішевого палива після додавання ПО відображені у таблиці 7.4.

Як видно з таблиці 7.4, в'язкість сумішевого палива при концентрації пальмового масла, що дорівнює 5%, збільшується на 12% від 3,29 до 3,68 ст.

Така зміна в'язкості не надає негативного впливу на роботу паливної апаратури, а навпаки, сприятливо позначається на характері тертя в прецизійних парах.

Таблиця 7.4 Фізико-хімічні властивості суміші СДП та пальмової олії

Найменування показника	ДП	Пальмова олія	Добавка ПО, %		Норма по ISO 8217
			3	5	
Щільність при 15 °С, кг/м ³	843	952	844,5	846	менше 890
Кінематична в'язкість при 40 °С, сСт	3,29	106	3,53	3,68	2,0–6,0
Масова частка сірки, % мас.	0,232	0	0,212	0,210	не більше 1,5
Кислотне число, мг КОН/г	0	2,59	0,1	0,22	менше 0,5
Температура спалаху, визначається у закритому тиглі па, °С	73	243	78	80	не менше 60
Температура помутніння, °С	0	2	7	10	
Температура застигання	-12	-9	-6	-4	
Фракційний склад					
Температура перегонки 10 %, °С	181	–	184	183	
Температура перегонки 50 %, °С	271	–	274	274	
Температура перегонки 95 %, °С	361	–	360	360	
Коксування 10%-ного залишку, % (мас.)	0,076	0,2458*	0,185	0,274	не більше 0,30
Зольність	0,0061	0,0287	0,0067	0,0070	не більше 0,01

* – коксуемость пальмового масла

Як випливає з таблиці 7.4, фізико-хімічні характеристики сумішевих палив із вмістом ПО до 5% незначно відрізняються від вихідного параметра ДП. При концентрації 5 % ПО кінематична в'язкість суміші при 40 °С зростає на 10,5 %, щільність при 15°С збільшується на 0,35% температура спалаху зростає на 7°С.

При додаванні ПО до 5 мас. температура помутніння сумішевого палива збільшується на 10 °С порівняно з вихідним ДП, а температура застигання зростає на 8 °С (рисунок 7.3).

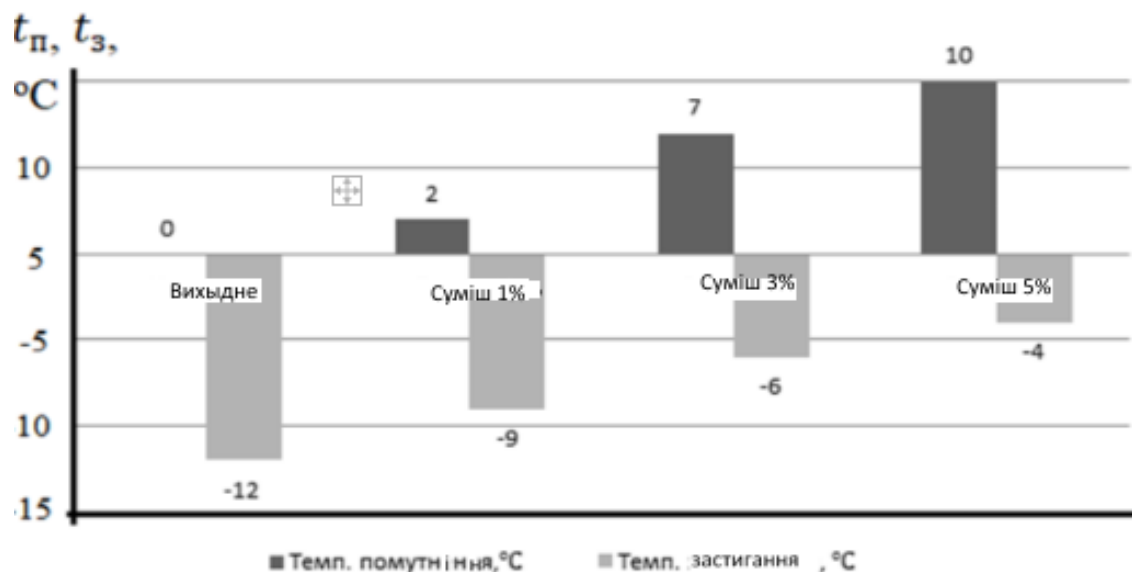


Рисунок. 7.3 Зміна температури помутніння та застигання сумішевих палив при додаванні ПО

Смолисті речовини, що знаходяться в пальмовому маслі, сприяють збільшенню коксівності сумішевих палив. При додаванні до 5 % маси ПО до ДП його коксування не виходить за межі значень, які встановлені вимогами стандартів на морські бункерні палива ISO 8217–2017

Подальше збільшення концентрації ПО у складі сумішевого палива призводить до зростання величини коксування та перевищення значення цього показника над встановленими вимогами вищевказаних стандартів. З цієї причини добавка ПО до сумішевого палива в концентрації понад 5...7 % неприпустима, тому що в результаті додавання такої кількості ПО до ДП відбувається підвищене нагароутворення, утворюються відкладення на форсунках та в камері згоряння судових дизелів.

Другим показником, що лімітує концентрацію ПО у складі суміші палива, є кислотне число. Підвищена кислотність палив викликає корозію деталей системи паливоподачі двигуна. Вимогами вищевказаних стандартів величина цього показника у ДП не повинна перевищувати 0,5 мг КОН/г, тоді як у ПО виміряне значення цього параметра становить 2,59 мг КОН/г. При додаванні 5% ПО значення кислотного числа у сумішевого палива значно зростає порівняно з вихідним ДП та становить 0,22 мг КОН/г.

Для даних зразків ДП та ПО гранична концентрація ПО у суміші не повинна перевищувати 15 %. Однак, якщо вихідні кислотні числа компонентів

сумішевого палива будуть вищими, то концентрація ПО у складі композиції повинна бути меншою. Для максимально допустимого значення кислотного числа ПО дорівнює 10 мг КОН/г. Його вміст у сумішевому паливі не повинен перевищувати 5%.

7.4 Дослідження впливу сумішевого ДП з пальмовою олією на параметри робочого процесу суднового дизеля

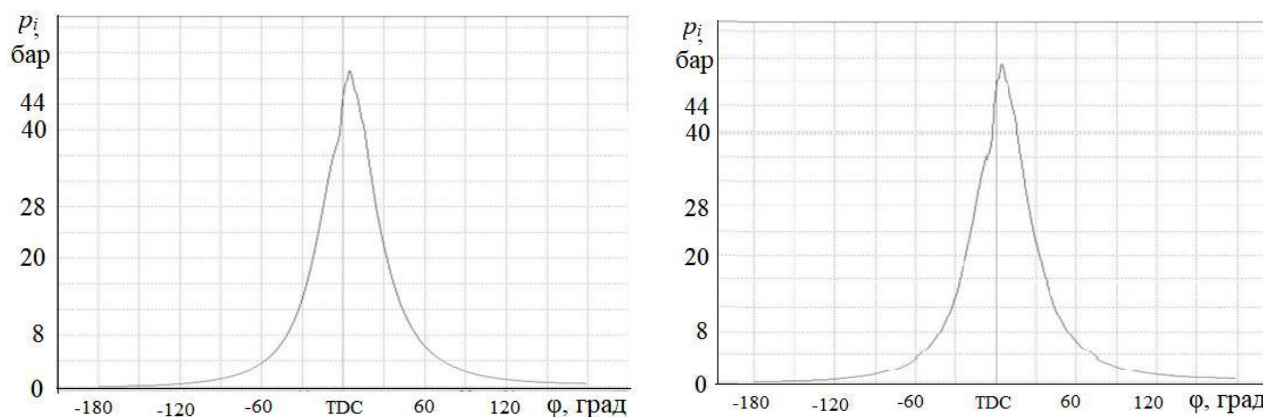
У таблиці 7.5 представлені всі результати вимірювання витрати палива та теплотехнічних параметрів, отриманих у процесі випробувань. У таблиці 7.5 дана усереднена, за результатами індикування чотирьох циліндрів, частота обертання дизеля n , максимальний тиск згоряння p_z , середній індикаторний тиск p_i сумарна індикаторна потужність.

Таблиця 7.5 Показники робочого процесу суднового дизеля під час роботи на суміші ДП та ПО

Паливо	P_z , бар	p_i , бар	n , мин^{-1}	$t_{\text{ог}}$, °C	ΣN_i , кВт	g_i г/(кВт ч)
ДП	49,4	2,80	732,6	153,8	38	187,96
ДП+3 % ПО	50,3	2,70	732,3	157,7	38	189,40
ДП+5 % ПО	49,3	2,80	732,9	159,3	39	190,70

Додатково на рисунку 7.4 наведено розгорнуті індикаторні діаграми. [10]

Представлені результати показують, що максимальний тиск, середній індикаторний тиск, а також частота обертання при роботі дизеля на суміші не змінюється. Однак вплив додавання пальмової олії позначається на температурі газів, що відпрацювали, і витраті палива. При концентрації ПО 3% значення температури газів, що йдуть, виросло на 2,5% і становило 157,7 °C, а при вмісті ПО 5% її значення становило 159,3 °C.



а СДТ; б суміш ДП + 5% ПО

Рисунок 7.4 Індикаторні діаграми, що працює на різних композиціях палив

Це тим, що у ПО міститься більше високомолекулярних сполук ніж у ДП, у результаті процес згоряння трохи зміщується на лінію розширення. З цієї причини при додаванні ПО до ДП питома витрата палива збільшується на 0,8 % при концентрації ПО 3 % та на 1,5 % при концентрації 5 %. Крім того, збільшення витрати палива пояснюється також нижчою теплотою згоряння ПО ніж у СДТ через наявність у складі ПО до 10 % атомів кисню.

На підставі проведених досліджень можна відзначити, що робота суднового дизеля на сумішевому паливі здійснюється в стандартному режимі і без явно виражених негативних явищ.

7.5 Розробка паливних систем під час роботи на НМДП

У роботі визначено зону критичних параметрів НМДП, при яких необхідно коригувати змащувальну здатність палива. При бункуванні морських суден НМДП необхідно виконати аналіз його показників.

Якщо вони перебувають у зоні критичних параметрів, у яких починається аварійне зношування деталей ПА, необхідно виконати поліпшення триботехнічних властивостей, використовуючи комплекс технічних заходів.

Рослинні олії можуть змішуватися з дистилатним паливом у будь-яких пропорціях. При додаванні ПО до ДП воно повністю розчиняється, утворюючи стабільну колоїдну суміш. Суміш є стійкою композицією і не розшаровується протягом тривалого часу. Композиція НМДП і ПО покращує трибологічні ха-

рактеристики судових дистилятних палив навіть у невеликих кількостях (до 3%).

При концентрації ПО до 5 % всі фізико-хімічні показники сумішових палив знаходяться в межах вимог нормативної документації на суднове паливо (ISO 8217-2017. Застосування сумішевого палива з ПО у судовому дизелі не істотно впливає на зміну параметрів робочого процесу. При концентрації ПО, що дорівнює 5%, температура відпрацьованих газів збільшувалася на 5,6 °С, а питома ефективна витрата палива зросла на 1,5%. Інші параметри робочого процесу двигуна, такі як p_z , p_i та частота обертання, залишилися без зміни.

Композиція НМДП і ПО або РО є одним з найперспективніших альтернативних палив для покращення їх триботехнічних характеристик, у результаті підвищується надійність роботи судових ПНВТ. Тому необхідна розробка перспективної системи паливоподачі.

Існує ряд методів адаптації сумішевих палив для судових дизелів.

Фірма Elsbett (Німеччина) пропонує свою двопаливну систему живлення дизеля Elsbett (рисунок 7.5.)

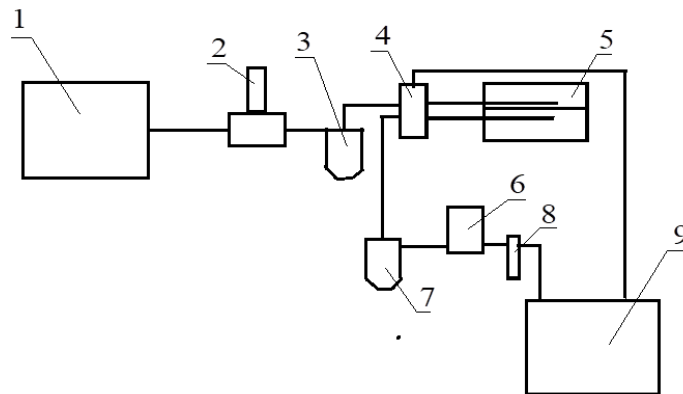


Рисунок. 7.5 Схема двопаливної системи живлення дизеля Elsbett

1 паливний бак із ДП; 2 паливопідкачувальний насос; 3 паливний фільтр для ДП; 4 керуючий вентиль та регулятор тиску; 5 ПНВТ; 6 теплообмінник для підігріву РО; 7 фільтр для РО; 8 електричний паливопідкачувальний насос із регулятором тиску для РО; 9 паливний бак з рипаковою олією

Ця система працює наступним чином: двигун запускається на дизельному паливі, яке знаходиться в баку 1. Після прогріву двигуна керуючий вентиль 4 автоматично підключає в роботу рослинне масло, яке зберігається в баку 9. Електричний паливопідкачувальний насос 8 і теплообмінник 6 забезпечують подачу підігрітої олії на фільтр 7, де відбувається необхідне очищення рипакової олії.

Пропонується паливна система, що працює на сумішевому паливі ДП та ПО (рисунок 7.5). Паливна система розрахована для змішування великих обсягів ПО.

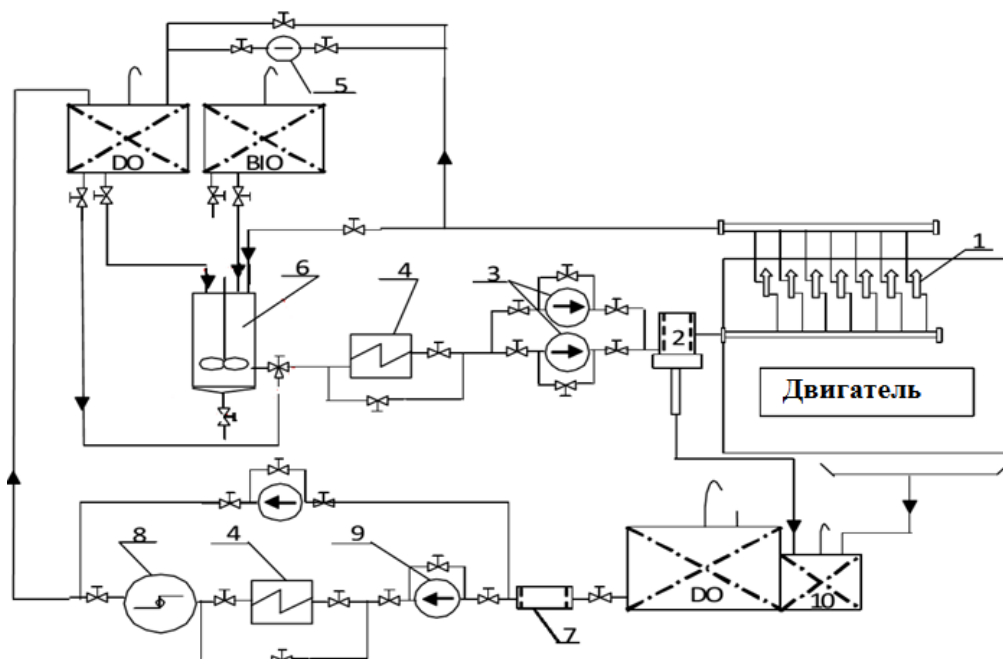


Рисунок. 7.5 Система паливopідготовки для сумішевих палив

1ПНВТ; 2фільтр тонкого очищення; 3паливopідкачуючий насос; 4теплообмінник; 5- витратометр; 6Пристрій для змішування; 7фільтр грубої очистки; 8сепаратор; 9насос, що перекачує; 10відстійний танк

Паливна система розрахована для змішування великих обсягів ПО. Концентрація ПО досягає 20% мас. Відсічне паливо повертається назад. Таким чином, постійно відбувається збільшення концентрації ПО. Однак, як показано раніше в роботі, додавання більше 5% ПО до НМДП призводить до зростання значень кислотного числа та коксування паливної суміші вище вимог НД до суднових палив.

Величезним недоліком всіх представлених систем подачі палива є те, що відсічне паливо разом з ПО повертається у відаткову цистерну, внаслідок чого концентрація ПО у ній постійно збільшується. В результаті концентрація ПО у кінцевому підсумку перевищить гранично допустиму норму, що призведе до проблем згоряння такого палива.

Запропоновано систему, яка забезпечує необхідне дозування ПО і вільна від недоліків, які були викладені раніше (рисунок 7.6).

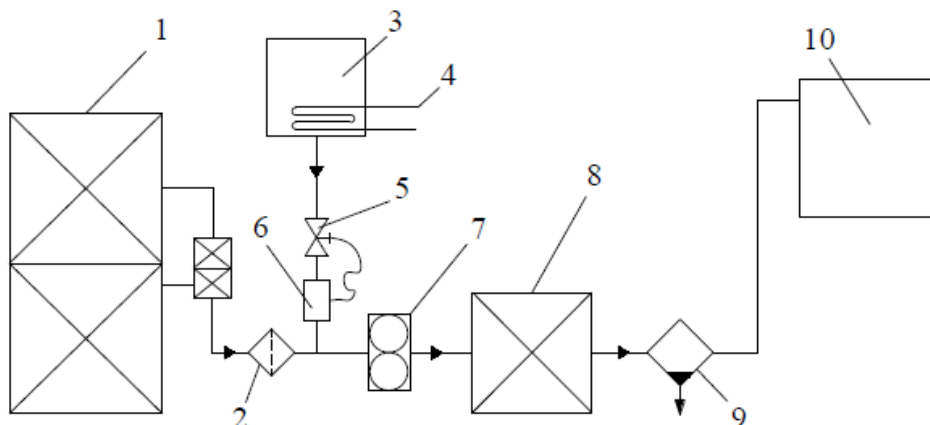


Рисунок 7.6 Запропонована схема підготовки сумішевих палив

1танки запасу СДП; 2Фільтр; 3бак для ПО; 4обігрівач; 5регулюючий клапан із електричним приводом; 6витратомір; 7паливо-підкачує насос; 8відстійна цистерна; 9сепаратор; 10-видатковий бак

Щоб виключити подібне явище, запропоновано додавати ПО в НМДП на всмоктування паливо-перекачувального насоса, який подає його з танка запасу у відстійну цистерну. У танку ПО запропоновано встановити обігрівач, який автоматично підтримує температуру ПО у фіксованому значенні 40 оС. Таким чином, змінюється в'язкість палива або розташування палива в танках на судні, але подібна система забезпечує завжди суворе дозування і вільна від недоліків, які були раніше викладені (рисунок 4.9).

Запропоновано систему особливою якої є застосування абсорбційної холодильної машини (АБХМ), яка утилізує низькопотенційну теплоту води, що охолоджує, високотемпературного контуру охолодження головного дизеля (рисунок 7.7). В результаті вирішуються питання економії паливно-енергетичних ресурсів, а також захисту навколишнього середовища від теплових та токсичних питань. Застосування АБХМ має низку переваг:

- відсутність рухомих частин;
- безшумність роботи;
- можливість роботи за рахунок утилізації теплоти води, що охолоджує дизеля;
- економія паливно-енергетичних ресурсів, при цьому енергія витрачається тільки на роботу насосів

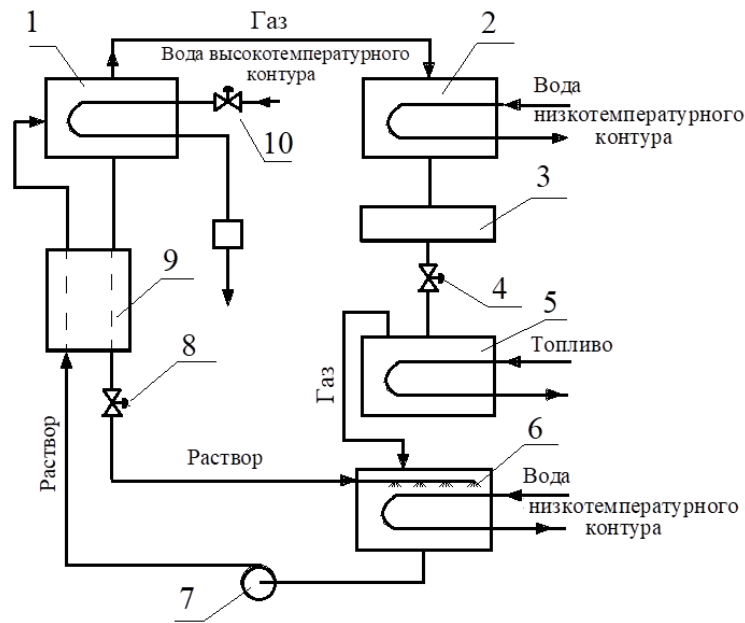


Рисунок 7.7 Принципова схема встановлення АБХМ

1генератор; 2конденсатор; 3ресивер; 4регулюючий вентиль; 5випарник; 6абсорбер; 7-насос; 8дросельний вентиль; 9розчинний теплообмінник; 10поворотна заслінка з електричним приводом

Під впливом тепла охолоджуючої води високотемпературного контуру головного дизеля, що надходить через поворотну заслінку з електричним приводом 10 в генератор 1, з розчину броміду літію виділяються пари холодоагенту, які переносяться в конденсатор 2У ньому холодоагент конденсується, віддаючи тепло охолодній воді від низькотемпературного контуру. Охолоджена вода по трубопроводах надходить через ресивер 3 і регулюючий вентиль 4 в випарник 5, де при низькому тиску закипає і забирає тепло від охолоджуваного контуру (дистилятного палива). Залишився конденсований розчин броміду літію трубопроводами через розчинний теплообмінник 9 і дросельний вентиль 8 переходить в абсорбер 6.

Для поліпшення абсорбції розчин розбризкується форсунками і поглинає холодоагент з випарника. Процес абсорбції пов'язаний із виділенням теплоти, яка відводиться охолоджувальною водою низькотемпературного контуру дизеля. Насос 7 відкачує розчин знову в генератор через теплообмінник 1 9. Рекомендуємо застосувати АБХМ в системі охолодження палива. Застосування АБХМ дозволяє використовувати теплоту води, що охолоджує головного двигуна, що сприяє збільшенню економічності роботи дизельних установок. Запропонована схема представлена на рисунку 7.8.

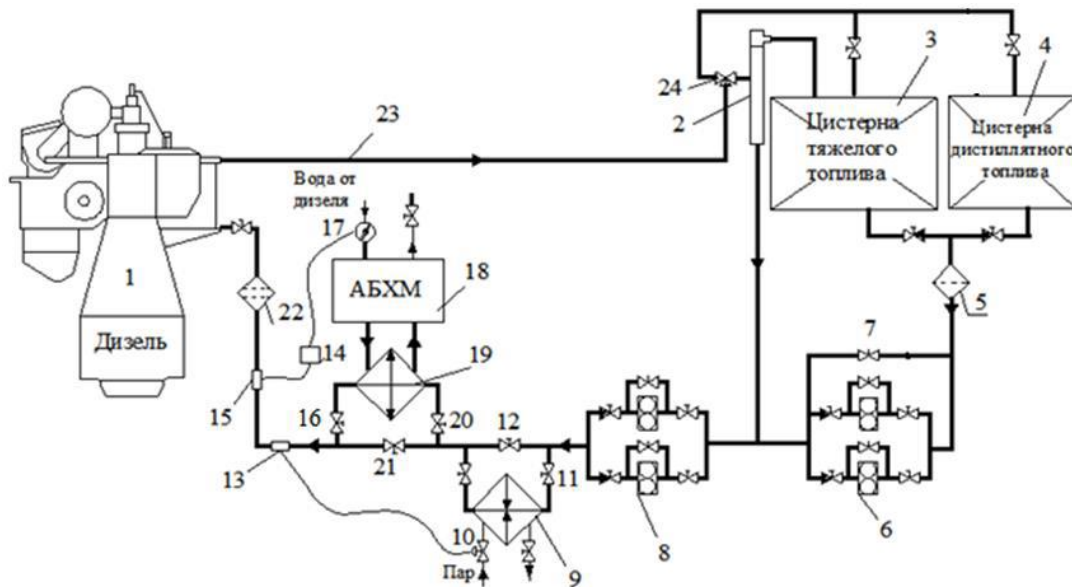


Рисунок.7.8 Пропонована схема охолодження палива

1дизель; 2змішувач палива; 3цистерна важкого палива; 4цистерна дистиллятного палива; 5фільтр грубої очистккт; 6бустерний насос; 7байпасний клапан; 8циркуляційний насос (ЦН); 9паливопідігрівач; 10електромагнітний клапан; 11,12,20,21 клапан; 13віскозиметр; 14блок керування; 15датчик прозорості; 17поворотна заслонка з електричним приводом; 18АБХМ; 19охолоджувач палива; 22фільтр тонкого очищення; 23відсіковий трубопровід; 24-триходовий клапан

:При переході дизеля на роботу на НМДП, паливо з цистерни для НМДП 4, через фільтр грубого очищення 5 надходить у вхід бустерного насоса 6, трубопроводами воно йде через ЦН 8 крім парового підігрівача палива 9 і надходить в охолоджувач палива 19. Охолодна вода від високотемпературного контуру головного дизеля по трубопроводу надходить в генератор АБХМ 18, і охолоджувач з генератора надходить в теплообмінний апарат 19, охолоджує паливо. Датчик прозорості палива 15 через блок управління 14 контролює витрату охолоджувальної води високотемпературного контуру дизеля через АБХМ 18. Як тільки температура палива стане нижче температури помутніння, сигнал від датчика 15 надходить в блок управління 14, який подає електроенергію на поворотну заслінку 17, поворотна заслінка 17 за рахунок зміни кута повороту зменшує прохідний переріз охолоджувальної води в АБХМ 18, тим самим зменшується його холодовиробник. Це дозволяє підтримувати максимально допустиме значення в'язкості так, щоб паливо завжди було прозоре і його температура не досягала температури помутніння при роботі на НМДП. Тим самим забезпечується мінімально можливе зношування прецизійних пар паливної апаратури.

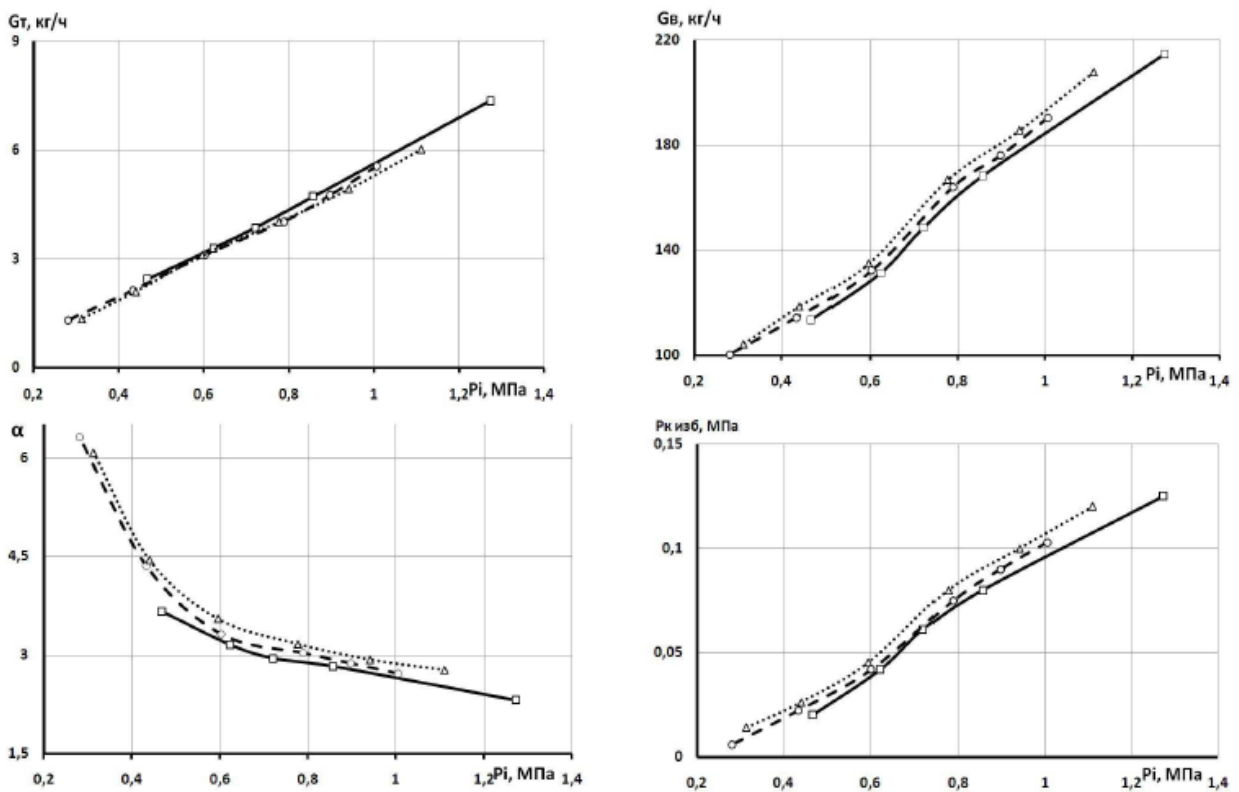
Таким чином, з урахуванням розробленої схеми добавки ПО у ДП, запропоновано перспективну систему паливопідготовки при роботі на НМДТ (рисунок 7.8). Використання її забезпечує комплексне поліпшення параметрів НМДТ і підвищує експлуатаційну надійність роботи паливної апаратури суднових дизелів. З одного боку, вона сприяє строгої дозованої подачі ПО в НМДП, а з іншого запобігає можливе помутніння НМДП і досягнення ним граничної температури фільтрації, що може призвести до виникнення аварійної ситуації. Додатковий ефект полягає у суттєвій економії палива на охолодження НМДП за рахунок утилізації АБХМ низькопотенційної теплоти охолодження ГД.

8 ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТІ НА РМ ІЗ РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ ПАЛИВОПОДАЧІ

8.1 Індикаторні показники двигуна

Наведені результати досліджень параметрів робочого процесу, індикаторного ККД., витрати палива, шкідливих викидів і т.д. дизеля, що працює на рапсовому олії (РО) з паливної апаратурою (ПА) підвищеного тиску типу *Common Rail* (CR) при використанні моно- і дробового упорскування в порівнянні з паливною апаратурою безпосередньої дії (ПАБД). Дробове упорскування має на увазі попереднє упорскування 5% від основної порції палива.

На рисунку 8.1 зображені графіки зміни витрати палива (G_t), повітря (G_v), надлишкового тиску (P_k) і коефіцієнта надлишку повітря (α) в залежності від навантаження для досліджуваних ПА.



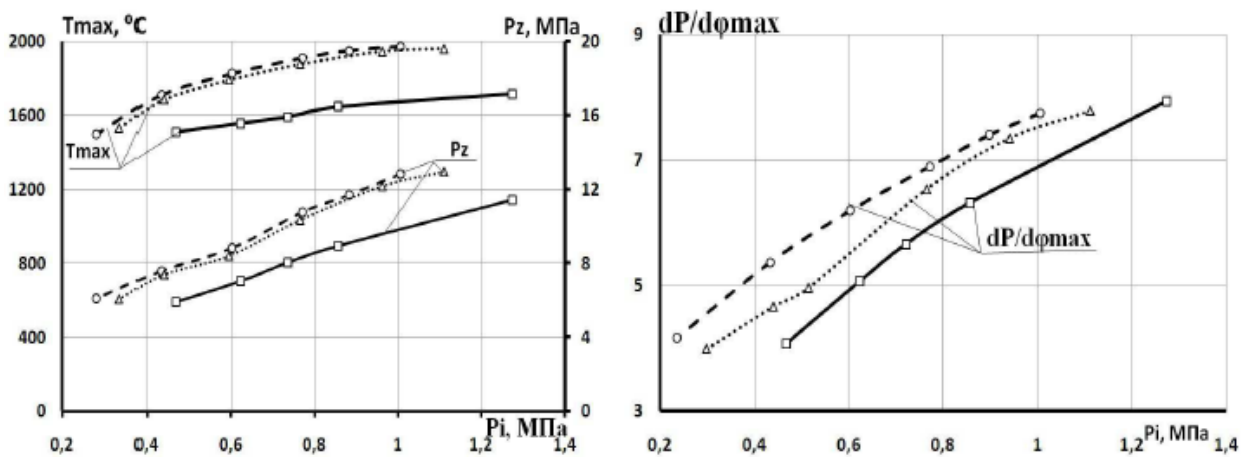
—TAND; — — CR моноупорскування; ...CR дробове упорскування

Рисунок. 8.1 Зміна G_t , G_v , α , P_k по навантажувальній характеристиці

Криві мають однаковий характер зміни й лежать дуже близько друг до друга. Відмінність пояснюється різницею в ККД і можливо погрішністю вимі-

ру. При переході від ПАНБ до ПА CR (моноупорскування) спостерігається незначне збільшення кількості G_v , P_k і α , застосування дробового упорскування в ПА CR також дає приріст цих показників на всіх режимах навантаження. При цьому витрата палива, що проходить через двигун, при переході від ПАНД до ПА CR (моноупорскування) і далі із застосуванням у ПА CR дробового упорскування незначно зменшується.

На рисунку 8.2 наведені графіки зміни максимальної температури (T_{max}), тиску (P_z) і твердості згоряння ($dP/d\phi_{max}$).



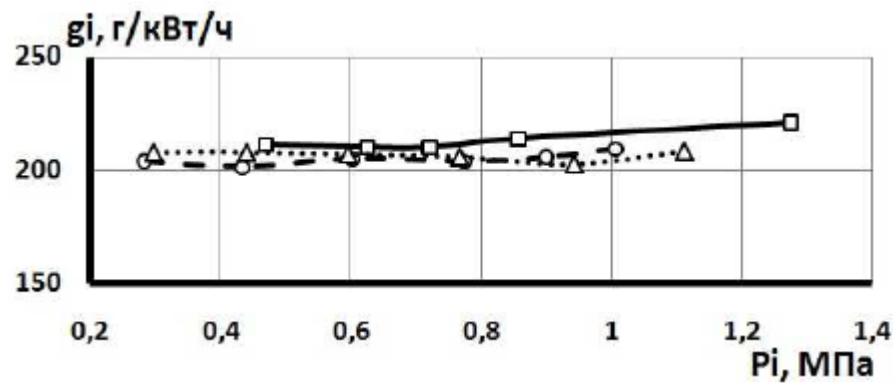
—ПАНД; — — CR моноупорскування; ...CR дробове упорскування

Рисунок. 8.2 Зміна максимального тиску, й тжорсткості по навантажувальній характеристиці

Збільшення максимальної температури в середньому на 300°C , ріст максимального тиску в середньому на 2 мПа, а також збільшення твердості роботи приблизно на 1 мПа/гради при використанні ПА CR у порівнянні з ПАНТ, що становить відповідно 22,5 % і 21,6%. Застосування дробового упорскування в ПА CR дає незначне зниження цих показників.

На рисунку 5.3 зображена індикаторна витрата палива (g_i) залежно від навантаження для досліджуваних ПА. На основі зіставлення графіків (рис.8.3) видно, що з переходом від ПАНТ на ПА CR (моноупорскування) маємо зниження витрати g_i у середньому на 7 г/кВт/ч. Причина цього в тому, що в ПА CR (моноупорскування) спостерігається більша величина тиску упорскування палива й, як наслідок, зменшення часу подачі й передбачуване більш дрібне розпилювання палива, збільшення частки об'ємного сумішоутворення й, отже, інтенсивне тепловиділення.

Із застосуванням у ПА *CR* дробового упорскування на режимах малого й середнього навантаження видний ріст витрати g_i у порівнянні з ПА *CR* (моноупорскування), тому що на часткових режимах переваг наявності дробового упорскування практично не спостерігається. На режимі максимального навантаження витрата g_i у ПА *CR* із дробовим упорскуванням зменшується в порівнянні з ПА *CR* (моноупорскування), тому що застосування дробового упорскування дає скорочення подачі основної порції палива. Упорскування основної порції у вогнище полум'я першої порції палива знижує тривалість горіння основної порції.



—ТАНД; — — CR моноупорскування ; - - - CR дробове упорскування

Рисунок.8.3 Індикаторна витрата палива по навантажувальній характеристиці

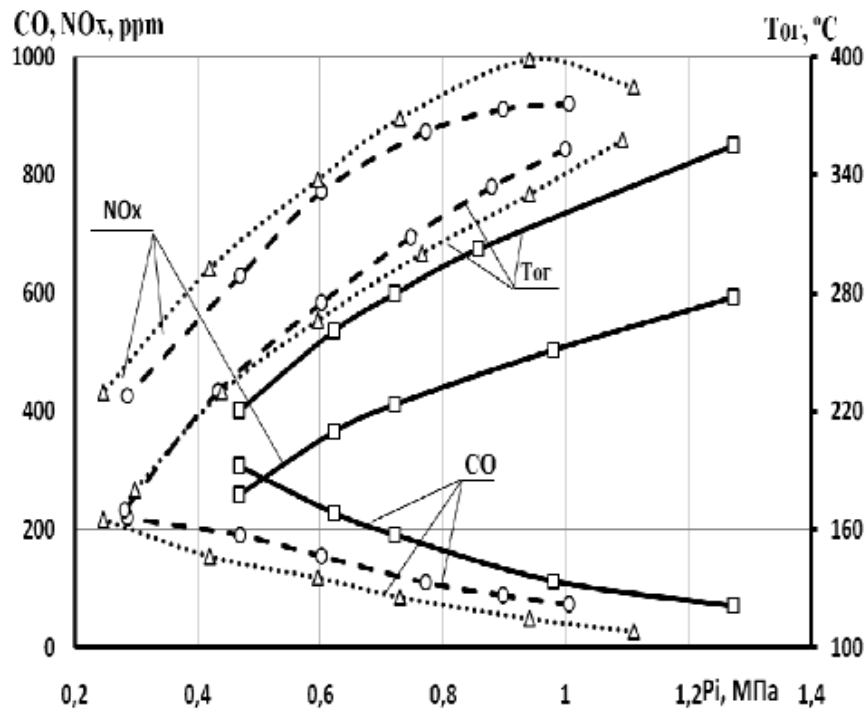
8.2 Шкідливі викиди двигуна

Як видно із графіків на рисунку 8.4, величина викидів I_3 при переході від ПАНТ до ПА *CR* (моноупорскування) зменшується в середньому на 60-90 *ppm*. Із застосуванням у ПА *CR* дробового упорскування також відбувається незначне зменшення викидів стосовно тієї ж системи *CR* (моноупорскування) приблизно на 10 *ppm* через інтенсифікацію процесу згорання.

Величина викидів No_x із застосуванням ПА *CR* (моноупорскування) різко збільшується в середньому на 350...400 *ppm*, застосування дробового упорскування на ПА *CR* дає незначний ріст приблизно на 50 *ppm* стосовно тієї ж ПА *CR* (моноупорскування).

Так само спостерігається незначний ріст температури вихлопних газів ($T_{ог}$) при переході від ПАНТ до ПА *CR* (моноупорскування) приблизно на 10°C, застосування в ПА *CR* дробового упорскування дає зниження показань у середньому на 3...5°C. Зміна показань викидів NO_x і температури вихлопних

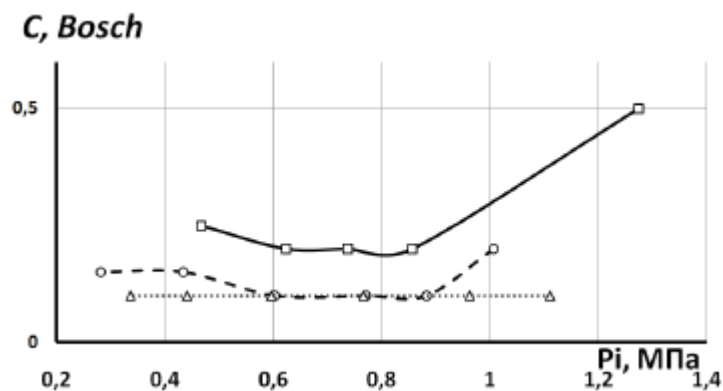
газів можна пояснити збільшенням максимальної температури циклу. Знизити величину викидів NO_x можна коректуванням УОВТ



—ТАНД; — — CR моноуприскування ; ...CR дробове уприскування

Рисунок. 8.4 Викиди CO , NO_x і $T_{ог}$ по навантажувальній характеристиці

На рисунку 8.5 видно, що при роботі двигуна з ПАНТ на режимах максимального навантаження величина димності значно зростає по відношенню до режимів мінімального й середнього навантаження й досягає 0,5 ед. *Bosch*.



—ТАНД; — — CR моноуприскування ; ...CR дробове уприскування

Рисунок. 8.5 Димність по навантажувальній характеристиці

Пояснюється це погіршенням якості сумішоутворення на цьому режимі (ріст q_c) і, як наслідок, більшої ймовірності утвору локальних зон перезбагачених паливом, що приводять до неповноти згорання палива. Це відбувається через підвищену в'язкість, велику далекобійність струменя РМ. При переході від ПАНТ до ПА CR (моноупорскування) величини викидів на тому ж режимі значно менше й становлять 0,2 ед. *Bosch*, це можна пояснити поліпшенням якості розпилювання й сумішоутворення. Застосування дробового упорскування дає рівномірність показань по всьому навантажувальному режиму роботи двигуна, тому що поліпшуються процеси сумішоутворення й згорання.

8.3 Процес тепловиділення двигуна

За результатами обробки індикаторних діаграм на тепловиділення (рисунок 8.6) кількість теплоти, що виділилася, x у підривній фазі становить для ПАНТ 10%, для ПА CR (моноупорскування) – 19%, для ПА CR із дробовим упорскуванням – 6%. Відповідно для ПА CR із дробовим упорскуванням твердість процесу повинна мати менші значення.

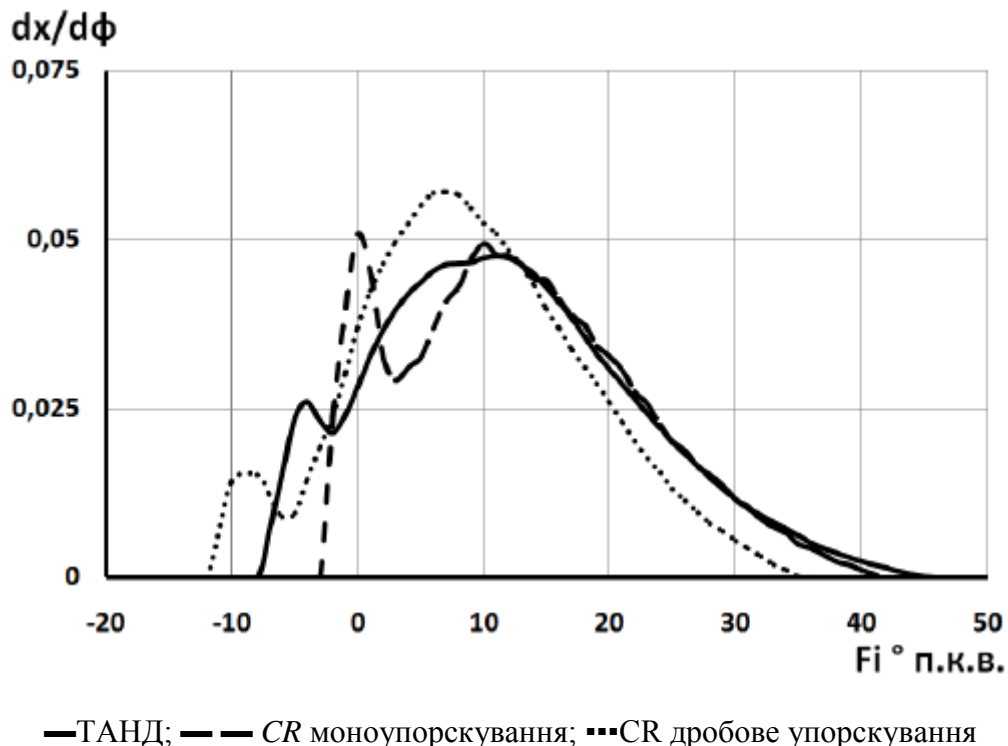


Рисунок. 8.6 Відносна швидкість тепловиділення

У ПА CR (моноупорскування) у порівнянні з ПАНТ паливо надходить при більш високому тиску й з більшою швидкістю, у результаті чого за період затримки запалення більша його кількість підготовлена до згорання, що викликає

різкий ріст кількості теплоти x , що виділився в підривній фазі. Для ПА CR із дробовим упорскуванням кількість палива, підготовленого до згоряння за період затримки, обмежене величиною першої порції палива, що й визначає менше значення теплоти x , що виділився в підривній фазі. Основна порція палива надходить у розвите вогнище полум'я, що визначає її швидке згоряння.

9 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СЕУ

9.1 Дані для розрахунків коефіцієнта енергетичної ефективності й узагальненого пропульсивного ККД

Дані, необхідні для розрахунків ККЕЕ наведені в таблиці 9.1. Там же даний приклад значень зазначених параметрів і додаткова інформація із судна й СЕУ .

Таблиця 9.1 Дані по судні

ДАНІ СУДНА	Сухогруз
Загальна довжина, м	133
Довжина між перпендикулярами, м	128
Ширина, м	19,8
Осадка. м	12
Водотоннажність, т	15030
Дедвейт , т	11000
Швидкість судна при літньому осіданні, узл.	14,5
Швидкість судна при літньому осіданні й 75 % потужності ГД на глибокій воді	13,2
ГОЛОВНИЙ ДВИГУН	
Максимальна тривала потужність (MCR),кВт і витрата палива г/кВт.г	5760 167
Потужність, кВт і витрата палива г/кВт.ч ГД при 0.75 (MCR)	4320 167
Частота обертання вала двигуна, об/хв	750
Кількість ГД	1
Використовуване паливо ISO 8217-2010	RMK380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
ДОПОМІЖНІ ДВИГУНИ	
Максимальна тривала потужність (MCR),кВт і витрата палива г/кВт.г	200 180
Потужність ДГ на ходовому режимі судна, кВт	180
Кількість ДД	3
Використовуване паливо	RMK 380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868

9.2 Конструкційний коефіцієнт енергоефективності (ККЕЕ)

З 1 січня 2013 року відповідно до положень Резолюції ІМО МЕРС.203 набули чинності нові правила Конвенції МАРПОЛ, спрямовані на підвищення енергоефективності судів. На всі нові судна, побудовані після 1 січня 2013 року поширюється вимога з розрахунку "Експлуатаційного коефіцієнта енергоефективності судна", а для судів, що перебувають в експлуатації, із цієї дати вводиться вимога по наявності на борті "Плану керування енергоефективністю судна (ПУЭС)/Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)".

Відповідно до виправлень до Правила 22 Додатка 6 до Конвенції МАРПОЛ наявність на борті судна ПУЭС є одним з підстав для одержання судном міжнародного сертифіката енергоефективності.

Вимоги до енергоефективності нових судів (у частині відповідності ними ККЕЕ) викладені у відповідній методиці ІМО (International Maritime Organization). Коефіцієнт ураховує не тільки потужність силової суднової установки, але й загальні дані судна.

Вимоги ІМО поширюються на морські судна й суду типу «ріка-море», які роблять рейси за межі територіальних вод. Однак, на засіданні комітету ІМО у нові правила було внесено застереження: будь-яка адміністрація прапора може дати своїм судам виключення з даного правила. Але при цьому в тих країнах, де система енергоефективності судів діє беззастережно, такий флот виявиться неконвенційним.

9.2.1 Методика розрахунків ККЕЕ

Розрахунки ККЕЕ проводиться за загальною методикою, наведеної ІМО у керівництві МЕРС 62/24/Add.1 (Marine Environment Protection Committee). Потім судно перевіряється морською адміністрацією держави або її вповноваженим органом Регістром судноплавства. Після успішної перевірки судну видається Міжнародний сертифікат по енергоефективності.

У загальному виді формулу розрахунків ККЕЕ можна представити в такий спосіб:

$$ККЭЭ = \frac{\text{количество выбросов } CO_2}{\text{произведенная транспортная работа}}$$

Кількість викидів CO_2 визначається по витраченому за рейс паливі певного сорту. У свою чергу, витрату палива СЕУ базується на потужності двигунів пропульсивного комплексу на певному експлуатаційному режимі й інших споживачів палива на судні.

Зроблена транспортна робота судном визначається його конструктивними особливостями, обсягом вантажних відсіків і швидкістю судна, заміряної при максимальному завантаженні по літню вантажну марку й 75 % потужності ГД.

Максимальна величина $K_{КЭ(MAX)}$ задеться статечною емпіричною формулою залежно від типу судна і його дедвейту:

$$K_{КЭ(MAX)} = a_i \cdot D^{c_i}_{W(i)(j)},$$

де a_i, c_i – емпіричні коефіцієнти і-го типу судна $i = [1 \dots 7]$;

$D_{W(i)(j)}$ – j – й дедвейт i- го типу судна.

Розрахункове значення коефіцієнта енергетичної ефективності судна $K_{КЕЕ} = K_{КЕЕ(p)}$ -визначається по наступній формулі:

$$\frac{\left(\prod_{j=fj}^n \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} + \left[\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right] \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}}$$

У загальному випадку, $K_{КЭЭ(p)}$ прямо пропорційний витраті палива всіма судновими споживачами з урахуванням утилізації тепла й інших енергозберігаючих конструкційних заходів і обернено пропорційний роботі судна по перевезенню вантажів.

Формула розрахункового значення коефіцієнта енергетичної ефективності судна містить наступні складові :

А) Витрати пов'язані з Головними Двигунами (потужність ГД, витрата палива й викиди CO_2)

$$\prod \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}$$

де: $\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}$ – сумарна потужність ГД, кВт;

$C_{FME(i)}$ питоме (масове) зміст CO_2 при повному згорянні вуглецю в паливі витраченим ГД, тонн CO_2 /тонн палива;

$SFC_{ME(i)}$ питома ефективна витрата палива на ГД, кг/ кВт-г.

В) Витрати, пов'язані з дизель-генераторами (потужності ДГ, витрата палива й викиди CO_2)

$$P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} ,$$

де: P_{AE} - потужність ДГ на ходовому режимі судна, кВт;

$C_{FME(i)}$ - питоме (масове) зміст CO_2 при повному згорянні вуглецю в паливі витраченим ДГ, тонн CO_2 /тонн палива;

SFC_{AE} - питома ефективна витрата палива на ДГ, кг/ кВт-г.

С) Енергозберігаючі технології для допоміжних установок

$$\{(\prod_{j=1}^n f_j) \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}\} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}$$

Д) Енергозберігаючі технології для головних установок

$$\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}$$

Е) Робота судна по перевезенню вантажів

$$f_i \text{ Capacity } f_w V_{ref}$$

де: f_i – коефіцієнт вантажомісткості для судів (крім льодового класу) ухвалюється рівним 1;

Capacity – дедвейт судна, т;

f_w безрозмірний коефіцієнт, що вказує на зниження швидкості судна при хвилюванні й хитавиці (визначається на ходових випробуваннях або розрахунковим шляхом, або ухвалюється рівним 1 до уточнення);

V_{ref} експлуатаційна швидкість судна, вузли.

У розрахунках не враховується витрата палива на виробництво пари ДК, тобто пара генерується тільки в утилізаційному котле.

9.2.2 Розрахунки ККЕЕ судна

Значення максимального ККЕЕ_{MAX} визначається по формулі й величинам коефіцієнтів a_i і c_i ,

$$a_i = 107,5, \quad c_i = 0,216$$

$$\text{ККЕЕ}_{MAX} = a_i \cdot D^{-c_i} = 14,4082 \text{ г CO}_2/\text{т*милю}$$

Розрахунковий ККЕЕ_p без обліку фактора погоди ($f_w = 1$).

$$\left(\sum_{i=1}^{NE} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) / (f_i \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref})$$

$$\text{ККЕЕ}_p = 16,68 \text{ г CO}_2/\text{т*милю}$$

Значення ККЕЕ з урахуванням фактора погоди, $f_w = 0.90$

$$\text{ККЕЕ}_e = 16,68 / 0,9 = 16,76 \text{ г CO}_2/\text{т*милю}$$

Для судів з льодового класу коефіцієнт $f_j = 0.4 \div 1.0$ [1].

Отримані дані дозволяють оцінити енергоефективність СЕУ. З наведеного розрахунків видно що значення ККЕЕ_p при заданих параметрах суттєво нижче ККЕЕ_{MAX}.

9.2.3 Сучасні технології по збільшенню енергоефективності морських суден

Уведення для судів морського флоту серйозних екологічних обмежень при використанні різних сортів палива, установлені морськими контролюючими суспільствами, привело до масштабного процесу розробок провідними дизелебудівними фірмами нових енергозберігаючих екологічні характеристики, що й удосконалюють, технологій. Передбачається їхнє використання як на знову споруджуваних судах, так і при модернізації СЕУ судів, що перебувають в експлуатації. До таких технологій ставиться :

- використання систем очищення випускних газів, що дозволяють знизити кількість шкідливих викидів в атмосферу;
- застосування берегового живлення, при стоянці судна в порту ;
- використання на ходовому режимі СЕУ валогенераторів або турбогенератор;

- застосування в системах керування паливоподачі й газорозподілу електронних компонентів ;
- впровадження системи економходу « Slow Steam Mode»;
- використання системи стисненого повітря (MALS), подаваного під корпус судна при його русі;
- конструкційні зміни в системі керування, зокрема установки системи «Thrust Fin».

9.3 Узагальнений пропульсивний ККД

9.3.1 Методика визначення узагальненого пропульсивного ККД

У якості характеристики енергоефективності СЕУ (і судна) може служити узагальнений пропульсивний ККД $\eta_{o.p}$, як відношення корисне використаної теплоти, що відповідає буксировочной потужності, до всієї витраченої в СЕУ (на судні) теплоті.

Його вихідне вираження (за умови Q_H^P -idem) має вигляд:

$$\eta_{o.p} = \frac{3600 N_B}{Q_H^P (B_{ГД} + B_{ВД} + B_{ВК})},$$

де: N_B - буксировочная потужність судна, кВт;

А) $B_{ГД}$ витрата палива на головний двигун (двигуни), кг/год:

$$B_{ГД} = \frac{3600 \cdot N_{eГД}}{\eta_{ГД} \cdot Q_H^P}.$$

Б) $B_{ВД}$ витрата палива на допоміжні двигуни, кг/год:

$$B_{ВД} = \frac{3600 \cdot N_{eДГ}}{\eta_{ДГ} \cdot Q_H^P}.$$

В) $B_{ВК}$ –витрата палива на допоміжний котел, кг/год:

$$B_{ВК} = \frac{D_{ВК} \cdot (i_{п} - i_{пв})}{\eta_{ВК} \cdot Q_H^P}$$

$\eta_{ГД}$, $\eta_{ДГ}$, $\eta_{ВК}$ значення ефективного ККД .

Середньостатистичне навантаження суднової електростанції на ходовому режимі $P_{ДГ}$, потужність, споживану рефрижераторними контейнерами, $P_{Р.К}$, паропроодуктивність допоміжного котла ВК, можна визначити по.

Розрахунки буксировочной потужності судна (N_B) виконується по формулі, з використанням графічних залежностей, кВт:

$$N_B = N_O * K_l * K_\delta,$$

де: N_O визначається за графіком на підставі заданої масової водотоннажності D і швидкості судна V_s .

Коефіцієнти K_l , K_δ для N_B перебувають по графіках залежно від числа Фруда та безрозмірного параметра l

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}, \quad l = \frac{L}{\sqrt[3]{v^3}}$$

Аргументом для знаходження K_δ по графіку служить величина

$$x_\delta = 0.8 \cdot l^{\frac{1}{8}} \cdot F_r.$$

9.3.2 Розрахунки узагальненого пропульсивного ККД

А) Для $D = 11000$ т и $V_s = 14,5$ узлов визначаємо

$$N_O = 1800 \text{ кВт.}$$

Б) Безрозмірний коефіцієнт K_l визначаємо в залежності от коефіцієнта l и числа Фруда

$$l = \frac{L}{\sqrt[3]{v^3}} = 5,328, \quad F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} = 0,207$$

$$K_l = 1,2.$$

В) Безрозмірний коефіцієнт K_δ в визначається по графікам в залежності от коефіцієнтів δ и χ_δ

Коефіцієнт δ визначається с використанням емпіричних залежностей цього параметра от швидкості V_s (узлы) и довжини L (м) .

$$\delta = 1 - a (V_s / L^{0,5}) = 0,706$$

$$\chi_\delta = 0,8 * l^{1/8} * F_r = 0.8 \cdot 5,328^{\frac{1}{8}} \cdot 0,207 = 0,204$$

По отриманих розрахункових величинах визначаємо K_l и K_δ .

$$K_l = 1,2, \quad K_\delta = 1,50$$

Розрахункова величина буксировочной потужності становить

$$N_B = N_O * K_l * K_\delta = 1800 \cdot 1,2 \cdot 1,50 = 3240 \text{ кВт.}$$

9.3.3 Розрахунки енергетичних показників СЕУ

Годинна витрата палива на ГД, кг/год.

$$B_{ГД} = g_{ГД} \cdot Ne_{ГД} = 0.167 \cdot 5760 = 962 \text{ кг/час}$$

Годинна витрата палива на ДГ, кг/год

$$B_{ДГ} = g_{ДГ} \cdot Ne_{ДГ}.$$

$P_{ДГ}$, $Ne_{ДГ}$, $B_{ДГ}$ – навантаження генераторів, потужність ДГ, вартівий витрата палива на ходовому режимі визначається по формулах, кВт

$$P_{ДГ} = 120 + a \cdot Ne_{ГД} + P_{РК} = 120 + 0,031 \cdot 5760 + P_{РК} = 298,6$$

$$Ne_{ДГ} = P_{ДГ} / \eta_{\varepsilon} = 298,6 / 0,9 = 331,7, \text{ кВт}$$

$$B_{ДГ} = g_{ДГ} \cdot Ne_{ДГ} = 0,180 \cdot 331,7 = 59,7 \text{ кг/час}.$$

Енергоспоживання рефконтейнерми $P_{РК}$ у розрахунках не визначається.

Витрати палива на ВК складе, кг/год

$$B_{ВК} = \frac{D_{ВК} \cdot (i_{\eta} - i_{\eta\varepsilon})}{\eta_{ВК} \cdot Q_{\eta}^p},$$

де $D_{ВК} = 1000 + 0.09 \cdot Ne_{ГД} = 1000 + 0.09 \cdot 5760 = 1518,4 \text{ кг/час}$.

Отже,

$$B_{ВК} = 1518,4 \cdot (2761 - 335) / (0,9 \cdot 41868) = 97,8 \text{ кг/час}.$$

определяем узагальнений пропульсивный ККД:

$$\eta_{о.п} = \frac{3600 \cdot N_{\varepsilon}}{Q_{\eta}^p \cdot (B_{ГД} + B_{ДГ} + B_{ВК})} = 0,25$$

Значення для пропульсивного ККД становить $\eta_{пр} = 0,45 \dots 0,75$

$$\eta_{пр} = \frac{N_{\varepsilon}}{Ne_{ГД}} = 3240 / 5760 = 0,56.$$

Виконаний розрахунки загального енергетичного ККД зроблений для СЕУ зі стандартною комплектацією встаткування, тобто: ГД – застосовується для забезпечення руху судна; ДГ – використовуються для виробітку електроенергії; ДК, УК, ВГ – використовуються на ходовому режимі.

Для підвищення рівня економічності, можливі наступні варіанти компонування СЕУ:

- 1) ГД + УК + ВГ

- 2) ГД + УК + ВГ + ДГ
- 3) ГД + УК + ТГ
- 4) ГД + ДК + ВГ
- 5) ГД + ДК + ВГ + ДГ

Шляхом аналізу розглянутих варіантів можна визначити раціональну комплектацію енергогенеруючих елементів СЕУ й оптимальний варіант їх використання на різних режимах роботи.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених випробувань плунжерів ПНВТ підтверджено, що при вмісті сірки в ДП менше 0,03 % суттєво інтенсифікується процес їх зношування. Застосування НМДТ викликає інтенсивне зношування прецизійних пар ПА через зниження змащувальної здатності палива. Для оцінки змащувальної здатності ДП розроблено різні лабораторні методи її оцінки за величиною діаметра плями зношування, які добре корелюють з фактичними даними про інтенсивність зношування прецизійних пар ПА.
2. Для підвищення довговічності ПНВТ та форсунок суднових дизелів при їх роботі на НМДП слід провести всебічні дослідження впливу різних параметрів палива на швидкість зношування прецизійних пар ПА з метою вироблення всеосяжних науково обґрунтованих рекомендацій, спрямованих на збільшення надійності їхньої роботи.
3. Додавання рослинної олії в НМДП покращує її змащувальну здатність, тому що в хімічному складі рослинної олії міститься значна кількість органічних ПАР, які сприяють створенню хемосорбційних плівок на поверхні металу в процесі тертя, внаслідок чого зменшується знос паливної апаратури.
4. У результаті виконаних аналізів фізико-хімічних властивостей ПО та сумішевих палив встановлено, що допустиму концентрацію ПО у судовому паливі лімітують такі показники, як кислотне число та коксування. Встановлено, що за концентрації ПО до 5% зазначені показники перебувають у межах вимог нормативної документації на суднове паливо ISO 8217-2017.
5. Застосування сумішевого палива з ПО і РО в судових дизелях не надає суттєвого впливу на зміну параметрів робочого процесу. При концентрації 5% температура відпрацьованих газів збільшувалася на 6°C, а питома ефективна витрата палива зросла на 1,5%. Інші параметри робочого процесу дизеля, такі як P_z , p_i , n залишилися без зміни.
6. Дослідження фізико-хімічних та трибологічних властивостей сумішевих палив дозволили встановити оптимальну концентрацію ПО у ДП. Вона становить 1...3%. Подальше збільшення вмісту ПО не доцільно, тому що дає незначний триботехнічний ефект, але при цьому погіршуються фізи-

ко-хімічні показники судинного композиційного палива з додаванням ПО.

7. Запропоновано високоефективну систему паливopідготовки при роботі на НМДП, яка комплексно дозволяє мінімізувати процес зношування прецизійних пар паливної апаратури за рахунок добавки ПО та одночасного охолодження НМДП в АБХМ.
8. Наведені результати досліджень параметрів робочого процесу, індикаторного ККД., витрати палива, шкідливих викидів і т.д. дизеля, що працює на рапсовому маслі (РМ) з паливної апаратурой підвищеного тиску типу Common Rail (CR) при використанні моно- і дробового упорскування в порівнянні з паливною апаратурой безпосередньої дії (ПАБД). Дробове упорскування має на увазі попереднє упорскування 5% від основної порції палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден 1973 року змінена Протоколом 1978, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating there to (MARPOL) з поправками.
2. Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращению загрязнения, МКУБ -93. (ISM'Code-93)
3. ISO 8217:2012 Petroleum products – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels.
4. Картамышева, Е. С. Судно как источник загрязнения окружающей среды / Е. С. Картамышева, Д. С. Иванченко, Е. А. Бекетова. —// Молодой ученый. — 2018. — № 25 (211). — С. 12-15. — URL: <https://moluch.ru/archive/211/51586/>
5. Васильев, И. П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. – Луганск, изд-во Восточноукраинского ун-та им. В. Даля, 2009. – 240 с.
6. Семенов, В.Г. Альтернативные топлива растительного происхождения. Определение фракционного и химического составов / Б.Н. Семенов, А. А. Зинченко // Химия и технология топлив и масел. - 2005. - № 1. - С. 29 - 34.
7. Савельев, Г.С. Использование рапсового масла в качестве топлива в дизельных двигателях / Г.С. Савельев, М.Н. Кочетков // Транспорт на альтернативном топливе. - 2009. - № 1. - С. 62 - 66.
8. Марченко, А. П. Сравнительная оценка эффективности применения растительных топлив в дизельном двигателе / А. П. Марченко, А. Ф. Минак и др. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 1. – С. 46–51.
9. Мацкевич, Д. В. Определение смазочной способности дизельных топлив / Д. В. Мацкевич, Ю. В. Заблоцкий // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2011. – № 28. – С. 145–153.
10. Сагин, С. В. Влияние триботехнических свойств топлив на эксплуатационные характеристики судового малооборотного дизеля / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // [Электронный ресурс] / Электронные данные. – Режим доступа: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=

- 2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Ptekh_2013_1_10.pdf.
11. Endresen Ø. et al. Improved modelling of ship SO₂ emissions – a fuel-based approach // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39. – № 20. – P. 3621–3628. Удосконалене моделювання викидів SO₂ з суден – підхід на основі палива
 12. Endresen Ø. et al. A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012). – 2007. – Vol. 112. – № D12. історична реконструкція споживання палива та викидів суден
 13. Zhou, J., S. Zhou, and Y. Zhu. “Experiment and prediction studies of marine exhaust gas SO₂ and particle removal based on NaOH solution with a U-type scrubber.” *Industrial and engineering chemistry research* 56.43 (2017): 12376–12384. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b02397. Експериментальні та прогнознi дослідження видалення SO₂ та частинок з морських вихлопних газів на основі розчину NaOH
 14. Kuimov, D. N., M. S. Minkin, and A. D. Lukyanov. “Low-sulfur fuel and oil production.” *The collection of the papers of material science forum* 870 (2016): 671–676. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.870.671. Виробництво низькосірчаного палива та нафти.
 15. MathPro, 2015. *Технология и экономика процесса нефтепереработки для производства бензина и дизельного топлива с очень низким содержанием серы*. Вашингтон, округ Колумбия, Международный совет по экологически чистому транспорту
 16. Buchanan K.D. Low sulfur marine fuel: U.S. Patent Application No.14/548,160. 2014
 17. Robinson C.E. Low Sulfur Marine Bunker Fuels and Methods of Making Same: U.S. Patent Application No. 9920270. 2018 Низькосірчане морське бункерне паливо та методи його виробництва: США
 18. Kuimov, D. N., M. S. Minkin, and A. D. Lukyanov. “Low-sulfur fuel and oil production.” *The coll* Виробництво низькосірчаного палива та нафти
 19. *Operation on low-sulfur fuel two-stroke engines / MAN B&W Diesel A/S*. Copenhagen, Den-mark, 2005. – 14 p. Експлуатація двотактних двигунів на низькосірчаному паливі

20. Low sulphur guidelines/ Wärtsilä Switzerland Ltd, 2006. – 23 p.Рекомендації щодо низького вмісту сірки
21. Lacey, P. I. Wear with low-lubricity fuels I &II. Correlation between wear maps and pump components / P. I. Lacey // Wear, 160. – 1993. – P. 325–343.Зношування з паливом з низькою змащувальною здатністю
22. Kevin D. Rafferty. Absorption refrigeration [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.oit.edu/docs/default-source/geoheat-center-documents/publications/cooling/tp51.pdf?sfvrsn=2>. (Абсорбционное охлаждение)
23. John E. Kokarakis. Challenges Associated with the Use of Low Sulphur Fuels / John E. Kokarakis, Emmanuel J. Kokarakis, Agamemnon Apostolidis // [Электронный ресурс] / Электронные данные. – Режим доступа:<http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=45f844b2-b532-4d5a-bd62-226e950491f2>.Проблеми, пов'язані з використанням палива з низьким вмістом сірки
24. Ian Crutchley. Lubricity characteristics of Marine Distillate fuels / Ian Crutchley, Michael Green // MTZ Industrial Special Edition MTZ – August, 2012. – P. 58–62. Характеристики смазочивих свойств судовых дистиллятных топлив
25. Ian Crutchley. Low sulphur diesel can lead to extensive wear// Ship & Offshore. – 2010. – № 4 – P. 14–17. Низкосернистое дизельное топливо может привести к сильному износу.
26. Hazrat, M. A. Lubricity Improvement of the Ultra-low Sulfur Diesel Fuel with the Biodiesel / M. A. Hazrat, M. G. Rasul, M. M. K. Khan // The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE. – 2015. – P. 111–117. Улучшение смазочивих свойств дизельного топлива со сверхнизким содержанием серы при использовании биодизеля.
27. Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulphur Distillate Diesel, MAN Diesel & Turbo. – 2013. – 23 p.Руководство по эксплуатации судовых двигателей на дизельном топливе с низким содержанием серы.
28. DNV Low Sulfur Recommendations [Электронный ресурс] / Электронные данные. – Режим доступа: <https://vi.scribd.com/document/48931247/DNV-Low-Sulfur-Recommendations>.Рекомендации DNV по низкому содержанию серы

29. Danping Wei. The lubricity of diesel fuels / Danping Wei, H. A. Spikes // *Wear*, 111 (1986) 217–235. Смазывающие свойства дизельного топлива
30. Cooper, D. Laboratory screening tests for low sulfur diesel fuel lubricity / D. Cooper // *Lubricity Scientific*. – 1995. – 7(2). – P. 133–148. Лабораторные скрининговые тесты на смазывающие свойства дизельного топлива с низким содержанием серы
31. Agarwal, S. Tribological behavior of diesel fuels and the effect of anti-wear additives / S. Agarwal, V. K. Chhibber, A. K. Bhatnagar // *Fuel*. – 2013, 106. – P. 21–29. Трибологическое поведение дизельного топлива и влияние противозносных присадок.
32. Шашев, А. В. Особенности топливоподачи и сгорания топлив на основе рапсового масла / А. В. Шашев // *Двигатели внутреннего сгорания // Науч.-техн. журнал*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 1. – С. 32–35.
33. Режим ограничения содержания серы в топливе установила ИМО. [Электронный ресурс] / Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.seafarersjournal.com/news/view/rezhim-ogranicheniya-soderzhaniya-sery-v-toplive-ustanovila-imo>.
34. Мацкевич, Д. В. Определение смазочной способности дизельных топлив / Д. В. Мацкевич, Ю. В. Заблоцкий // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – Одесса: ОНМА, 2011. – № 28. – С. 145–153.
35. Марченко, А. П. Сравнительная оценка эффективности применения растительных топлив в дизельном двигателе / А. П. Марченко, А. Ф. Минак и др. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2004. – № 1. – С. 46–51.