

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Машинобудівний навчально-науковий інститут

Кафедра двигунів
внутрішнього згоряння,
установок та технічної
експлуатації

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
Олексій ГОГОРЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВОГО ДВИГУНА ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ЕМУЛЬСІЙНОГО ПАЛИВА

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування
Освітня програма – Двигуни внутрішнього згоряння

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи

Здобувач освіти



Аркадій ПРОСКУРІН

Ігор ДИМЧУК

Миколаїв 2025

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

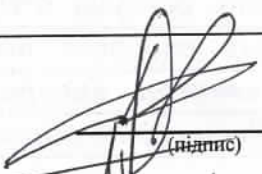
8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Оформлення 1 розділу		
2	Оформлення 2 розділу		
3	Оформлення 3 розділу		
4	Оформлення 4 розділу		
5	Оформлення 5 розділу		
6	Оформлення креслень		

Здобувач освіти

Керівник роботи



(підпис)
 

(підпис)
Ігор ДИМЧУК

(прізвище та ініціали)

Аркадій ПРОСКУРІН

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній розроблений комплекс заходів щодо ефективності суднового двигуна шляхом використання емульсійного палива. Розглянуто економічне обґрунтування. Наведені заходи щодо забезпечення охорони праці.

Кваліфікаційна робота виконана українською мовою на 65 сторінках розрахунково-пояснювальної записки. Використано 9 джерел. Графічна частина представлена на 5 кресленнях формату А1.

Ключові слова: вантажне судно, судновий двигун, емульсія, ефективність.

The qualification work presents a set of measures to improve the efficiency of ship engines through the use of emulsion fuel. The economic justification was considered. Measures to ensure occupational safety are also provided.

The qualification work is executed in Ukrainian language on 65 pages of explanatory note. 9 sources are used. The graphic part is presented on 5 drawings of format A1.

Key words: cargo ship, ship engine, emulsion, efficiency.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						2
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Особливості застосування двигуна 6ЧН 43/61 на вантажному судні MORGENSTOND I.....	5
Розділ 2. Огляд сучасних способів покращення показників роботи суднових двигунів.....	17
Розділ 3. Аналіз ефективності використання емульсійного палива.....	34
Розділ 4. Економічне обґрунтування.....	52
Розділ 5. Забезпечення вимог охорони праці.....	56
Висновки.....	63
Список використаної літератури.....	65
Додаток А. Загальний вид вантажного судна MORGENSTOND I.....	66
Додаток Б. Поперечний переріз двигуна 6ЧН 43/61.....	67
Додаток В. Габаритне креслення двигуна 6ЧН 43/61.....	68
Додаток Г. Схема паливної системи двигуна.....	69
Додаток Д. Схема емульгуючого пристрою	70

ВСТУП

Актуальність досліджень, пов'язаних із використанням емульсійних палив у суднових дизельних двигунах, зумовлена поєднанням жорсткіших міжнародних екологічних вимог, зростанням вартості традиційних палив та необхідністю підвищення енергоефективності світового флоту. Сучасне судноплавство перебуває під сильним тиском з боку міжнародних організацій, насамперед ІМО, які послідовно посилюють норми щодо викидів оксидів сірки (SOx), оксидів азоту (NOx), твердих частинок (PM) та парникових газів. Перехід на малосірчисті палива, використання скрубберів, перехід на LNG та інші альтернативи потребують значних капітальних інвестицій, реконструкції суднових енергетичних установок і часто є економічно обтяжливими для старшого флоту. На цьому тлі емульсійні палива розглядаються як відносно простий з точки зору реалізації шлях зниження токсичності відпрацьованих газів без радикальної зміни конструкції двигуна.

Мета даної роботи – покращення ефективності роботи суднового двигуна.

Задачі що вирішуються у роботі:

1. Аналіз сучасних способів покращення показників роботи суднових двигунів.
2. Модернізація паливної системи.
3. Оцінка запропонованих рішень, технічні рекомендації та заходи з техніки безпеки.

Об'єкт дослідження – система паливоподачі двигуна.

Предмет дослідження – параметри роботи системи паливоподачі.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						4
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА 6ЧН 43/61 НА
ВАНТАЖНОМУ СУДНІ MORGENSTOND I

Опис вантажного судна MORGENSTOND I

Відома серія комбі-фрейтерів Damen Shipyards упродовж багатьох років здобула дуже високу репутацію серед операторів суден короткомагістральних перевезень та фідерних вантажних суден. Із збільшенням розмірів таких типів суден розширювався і модельний ряд CF, у якому навіть представлено проєкт CF 19500 (19 500 тонн дедвейту), що входить до актуального портфеля компанії .

MORGENSTOND I (рис. 1.1 – 1.2, табл. 1.1) – це більш скромний представник серії, CF 12000 (12 000 тонн дедвейту), у виробництві якого Damen сьогодні широко використовує субпідрядне виготовлення корпусних конструкцій як на нідерландських, так і на закордонних верфях. У випадку цього першого судна нового класу у проєктуванні допомагала нідерландська верф Merwede, а корпус був побудований та оснащений на власній українській верфі Damen – Океан [1].

CF 12000 – це однопалубне судно з ютом та баком, посилене для плавання у льодових умовах за класом 1А. Два вантажні трюми розташовані в межах подвійного борту та мають такі розміри:

Трюм №1: 40,89 м × 15,80 м / 10,48 м

Трюм №2: 55,86 м × 15,80 м

Закриття трюмів здійснюється за допомогою кінцевого укладання гідравлічних складаних люкових кришок. Установлено знімну другопалубу (твіндек), що складається з 15 панелей; у неробочому стані вони зберігаються в кормовій частині трюму №2. За потреби ці панелі можуть також використовуватися як перегородки при транспортуванні зерна.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						5
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд судна MORGENSTOND I

					<i>KPM.142.6221м.25.08.00.ПЗ</i>	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		6

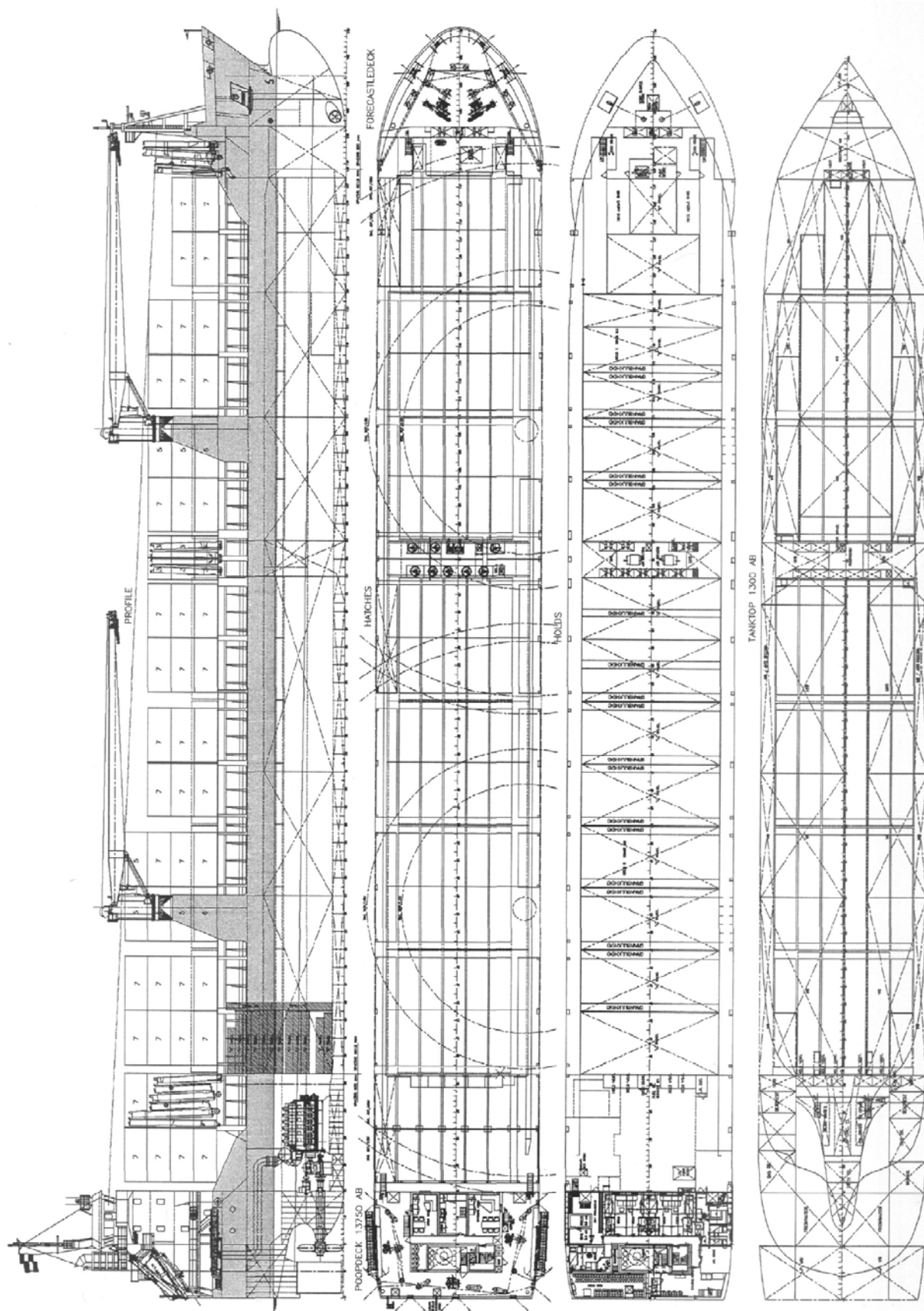


Рисунок 1.2 – Судно MORGENSTOND I

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

KPM.142.6221м.25.08.00.ПЗ

Аркуш

7

Таблиця 1.1 – Головні характеристики судна

Параметр	Значення
Довжина максимальна, м	142,95
Довжина між перпендикулярами, м	134,96
Висота до палуби, м	10,95
Ширина найбільша, м	18,90
Проектна осадка, м	7,93
Максимальна осадка, м	8,08
Дедвейт, т	12000
Швидкість судна, вуз	16
Об'єм баластних цистерн, м ³	4790
Об'єм цистерн важкого палива, м ³	765
Об'єм цистерн дизельного палива, м ³	105
Classification society and notations: Lloyd's Register, + 100 A1, + LMC, UMS, SCM, Ice Class 1A (Finnish/Swedish 1A), Container Cargoes in Holds and on Hatches, Equipped for Dangerous Cargoes according to SOLAS Reg 19-II excluding Class VII	

Після очищення трюми висушуються за допомогою повітросушильної установки, розміщеної між трюмами 1 і 2; механічна вентиляція забезпечує до 30-кратного обміну повітря за годину. Контейнери довжиною до 45 футів можуть завантажуватися під палубу, а висота твіндеку дозволяє розміщувати чотири контейнери high-cube. При встановленому твіндеку можливе розміщення двох контейнерів висотою 8 футів 6 дюймів або трьох пакетів целюлози як над твіндеком, так і під ним. Однією з особливостей конструкції є обмеження валової місткості до менше ніж 9000 GT, щоб відповідати вимогам Нідерландів щодо чисельності екіпажу.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Вантажні операції здійснюються за допомогою двох електrogідравлічних кранів Liebherr, кожен із вантажопідйомністю в діапазоні 30–80 тонн. Кранові постаменти інтегровані в правий борт, завдяки чому палубний простір і люкові кришки залишаються вільними для проектного вантажу або для розміщення 372 із загальних 684 TEU, які можна завантажити; 80 з них можуть бути рефрижераторними.

Простір між трюмами 1 і 2, окрім розміщення сушильного обладнання, містить також систему перекачування протилежного крену (anti-heeling pump), що використовується під час вантажних операцій.

Судно призначене для перевезення небезпечних вантажів: для цього встановлено CO₂ систему пожежогасіння, а на люкових кришках змонтовано спринклерну систему, що застосовується як запобіжний засіб при транспортуванні вибухових матеріалів.

В якості головного двигуна встановлено двигун типу MaK 6M43 – 6ЧН 43/61, який розвиває потужність 5400 кВт і приводить в рух гвинт СР через редуктор Flender, забезпечуючи робочу швидкість 16 вузлів (100% MCR). Валогенератор виробляє 1000 кВт, а три дизельні агрегати мають номінальну потужність 503 кВА кожен. На носі встановлено рушій Schottel потужністю 730 кВт. Встановлено повне оснащення навігаційним та комунікаційним обладнанням, включно з радаром на носовій частині для поліпшення навігації, особливо під час перевезення контейнерів.

Опис двигуна 6ЧН 43/61 (MaK 6M43)

Серія M43C (рис. 1.3, 1.4) – один з найбільш успішних лінійних середньообертових дизелів для суден: за різними оцінками, продано понад 650 двигунів із загальною сумарною потужністю понад 6 500 МВт. Баланс між потужністю, ефективністю, надійністю та можливістю роботи на дешевому паливі робить двигун оптимальним для вантажних, фідерних, промислових або допоміжних установок на судах [2].

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

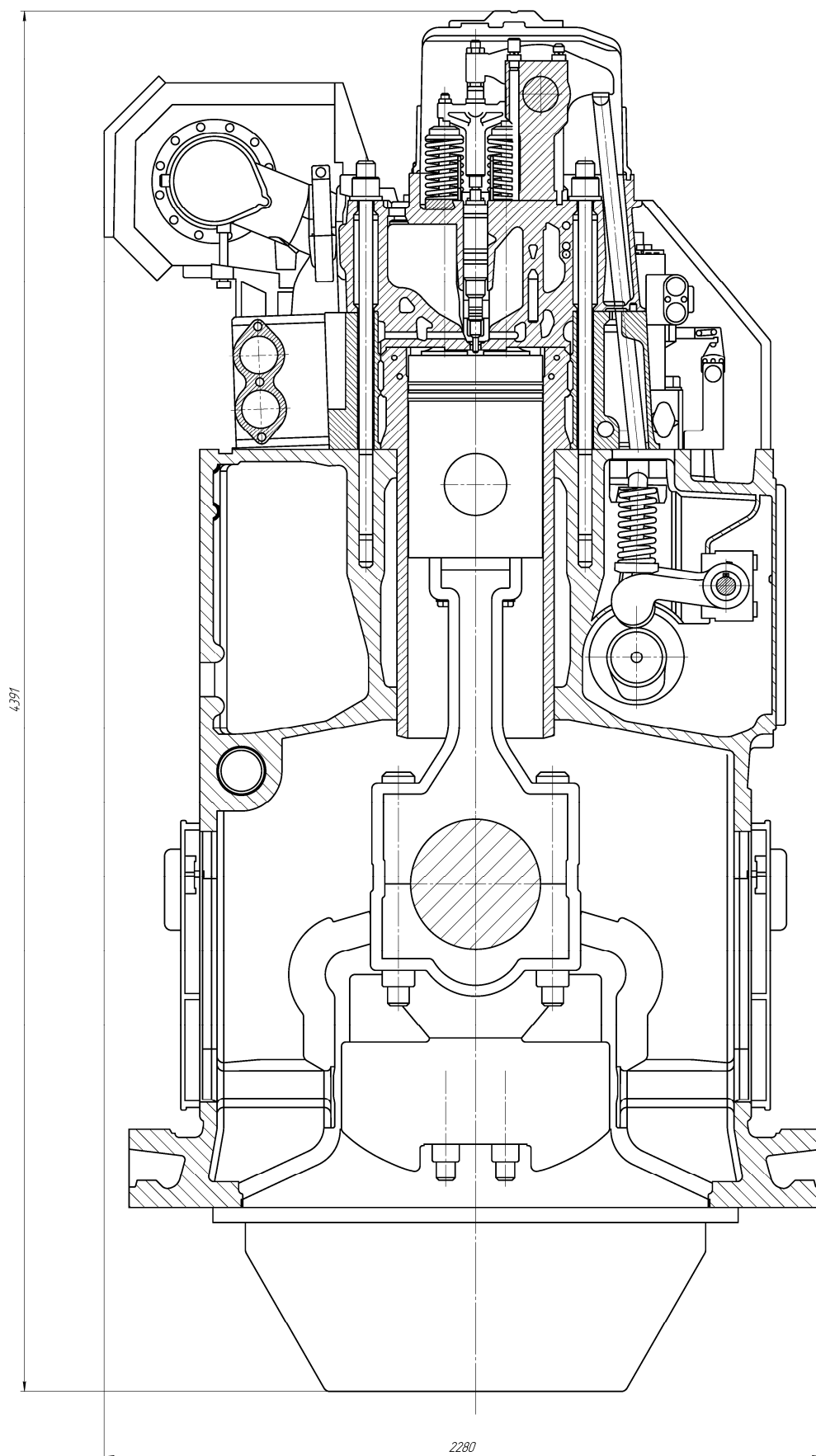


Рисунок 1.3 – Поперечний перетин двигуна 6ЧН 43/61

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ

Аркуш

10

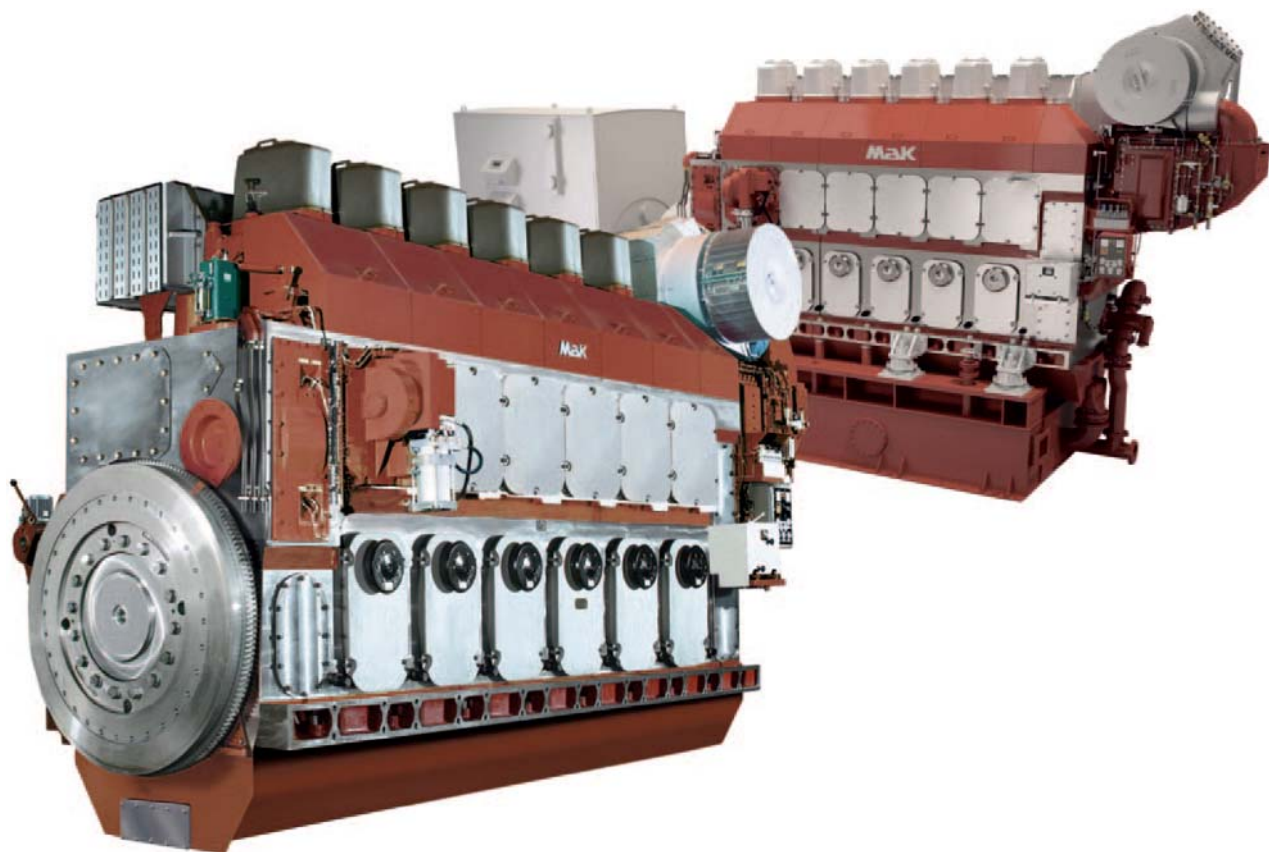


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд двигуна 6ЧН 43/61

Основні характеристики двигуна 6ЧН 43/61

Ефективна потужність, кВт (номінальна)	5400
Частота обертання колінчатого вала, хв ⁻¹	500
Діаметр циліндра/хід поршня, мм	430/610
Середня швидкість поршня, м/с	10,2
Число циліндрів, од	6
Максимальний тиск згоряння, МПа (не більше)	19,0
Тиск стиску, МПа (не більше)	17,0
Питома витрата масла, г/(кВт×год.)	0,6
Температура охолоджуючої води на виході, °С	80...90
Висота двигуна, мм	6566
Ширина двигуна, мм	2904

Конструктивна будова двигуна та його ключові технічні особливості свідчать про орієнтацію виробника на високу міцність і технологічну надійність. Основою є блок-картер (рис. 1.5), що виконаний як надзвичайно жорстка монолітна деталь із високоякісного чавуну з кулястим графітом. З'єднання блок-картера з кришками корінних підшипників здійснюється за допомогою поперечної різьбової стяжки, яка додатково посилює конструкцію. У цій моделі блок-картер не охоплює каналів водяного охолодження, а отже повністю усувається можливість внутрішньої корозії.

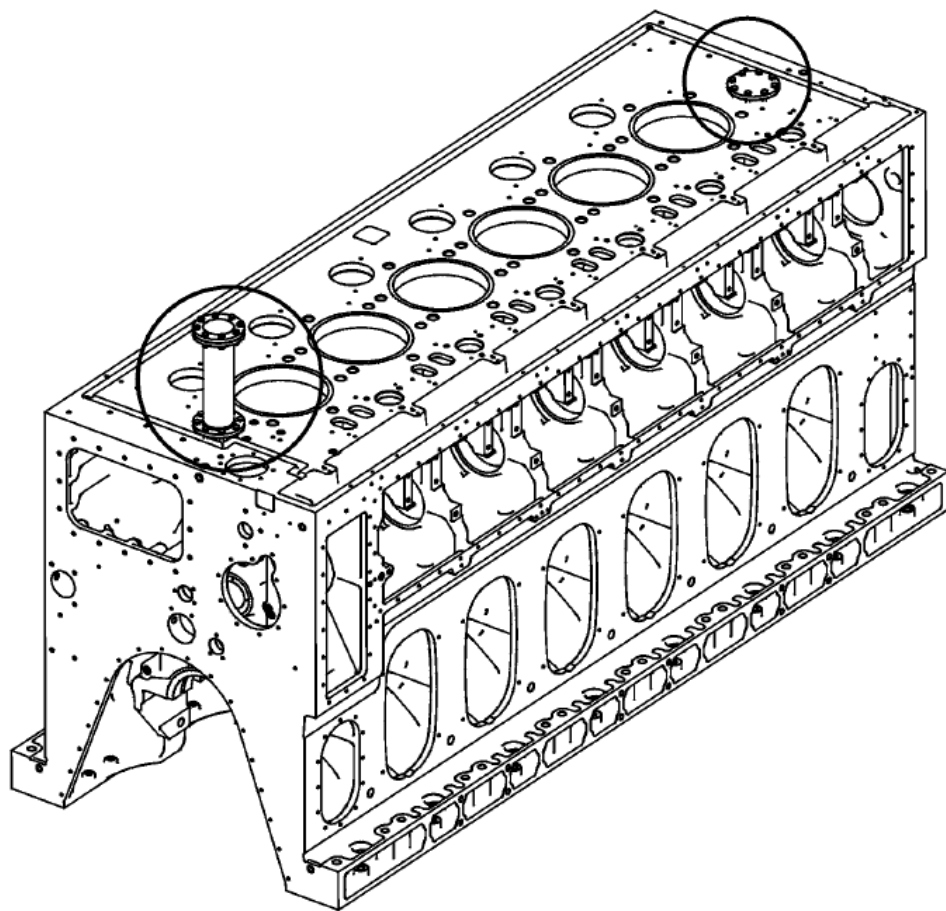


Рисунок 1.5 – Блок-картер

Циліндрова втулка (рис. 1.6) має локальне охолодження – тепло відводиться лише з верхньої частини, прилеглої до камери згоряння, де теплове навантаження є найбільшим. Траса підведення наддувочного повітря інтегрована в тіло блок-картера. Стиснене повітря проходить через канали блока та водяну сорочку кришки циліндра безпосередньо до впускних

клапанів. Така компоновка дозволяє обслуговувати кришку циліндра без необхідності демонтажу повітропроводів наддуву, що практично виключає появу підтікання та пошкоджень трубопроводів.

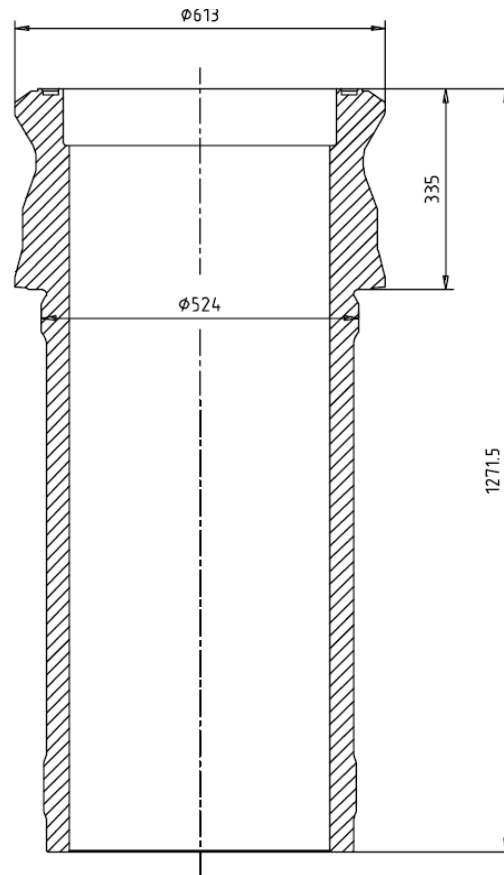


Рисунок 1.6 – Втулка циліндра

Розподільний вал (рис. 1.7) також розташований усередині блок-картера. Момент від нього до клапанних штовхачів та паливних насосів високого тиску передається через проміжні важелі, що зменшує знос і тертя. Час відкриття клапанів та момент упорскування можуть коригуватися регулюванням положення важелів на ексцентриковому валу або застосуванням електронних коректорів.

Маховик і шестерня приводу розподільного вала монтуються на колінчастий вал шляхом гарячої запресовки на конічну посадку. Привід кулачкового валу здійснюється через проміжну шестерню. Точність центрування осей забезпечує можливість збирання без регулювання бокового

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

зазору між зубцями. Усі елементи шестерного приводу проходять термічне зміцнення.

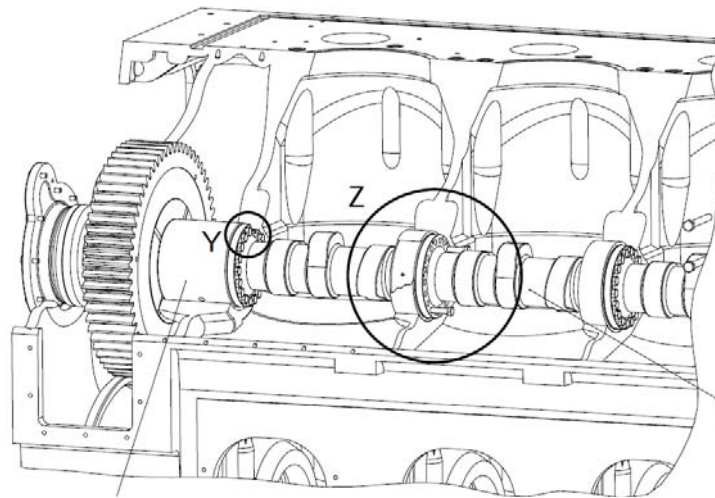


Рисунок 1.7 – Розподільний вал

Поршень (рис. 1.8) має складену конструкцію: головка виготовлена зі сталі, а спідниця – з чавуну з кульовидним графітом. Така комбінація матеріалів гарантує надійну передачу газових навантажень, що сягають 19 МПа і вище. Канавки під два компресійні та одне маслознімне кільце індукційно зміцнюються, а верхнє кільце має спеціальне покриття та сферичну робочу поверхню. Це забезпечує підвищений ресурс поршневих кілець і мінімальні втрати мастила.

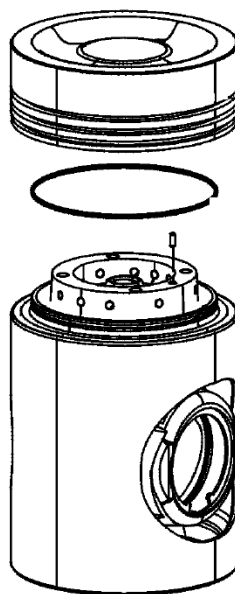


Рисунок 1.8 – Поршень

Одним із найскладніших і найважливіших вузлів двигуна є кришка (голівка) циліндра (рис. 1.9). Вона виготовляється з чавуну з кульовидним графітом та має двошарову структуру, яка забезпечує підвищену жорсткість. Камера згоряння та випускні клапани інтенсивно охолоджуються для запобігання високотемпературній корозії. По два впускні та два випускні клапани керуються загальним коромислом, що спрощує регулювання теплових зазорів.

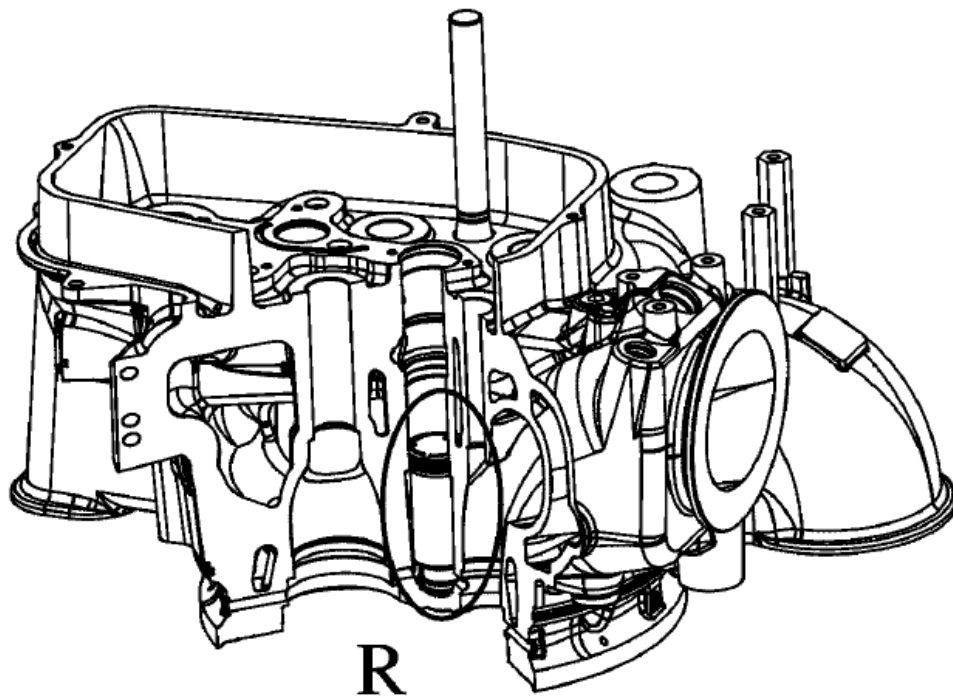


Рисунок 1.9 – Кришка циліндра

Для мінімізації часу й витрат при встановленні трубопроводів передбачено об'єднані підводи для мастила, охолоджувальної води та відведення палива, що просочилося. Використання простих штекерних з'єднань суттєво зменшує складність монтажу. Наявність достатньої кількості радіальних входів та виходів для води, а також каналів підведення наддувочного повітря дає змогу демонтувати кришку циліндра менш ніж за пів години. Під час складання її встановлюють на сорочку водяного охолодження, яка одночасно виконує функцію центрування. Затягнення

кришки проводиться чотирма болтами за допомогою гідравлічного обладнання.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД СУЧАСНИХ СПОСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Сучасний розвиток морської енергетики визначається поєднанням дедалі жорсткіших екологічних вимог, економічних чинників та потреб флоту у підвищенні надійності й довговічності силових установок. Суднові дизельні двигуни, що залишаються основним типом рушійних агрегатів світового флоту, перебувають під постійним технічним удосконаленням з метою зниження питомих витрат палива, скорочення викидів шкідливих речовин, підвищення енергоефективності та забезпечення стабільної роботи у складних експлуатаційних умовах. Комплексний аналіз сучасних підходів до вдосконалення суднових двигунів свідчить про багатовекторність реалізованих рішень – від покращення процесів згоряння до цифровізації та застосування альтернативних палив. Розглянемо найважливіші тенденції цієї галузі [3].

Оптимізація паливоподачі та вдосконалення процесу впорскування палива

Одним із найважливіших шляхів підвищення ефективності суднових дизельних двигунів є удосконалення паливної апаратури та оптимізація процесу формування паливно-повітряної суміші. Процес подачі палива напряду визначає швидкість згоряння, рівномірність теплонапруженості деталей та кількість шкідливих компонентів, що потрапляють у вихлопні гази. Тому виробники морських двигунів приділяють значну увагу розробці високоточних систем упорскування, здатних працювати в умовах підвищених температур, тисків та тривалих експлуатаційних навантажень.

Найпоширенішим рішенням сучасності є впровадження акумуляторних систем високого тиску (Common Rail). Їх головною перевагою є незалежність тиску впорскування від частоти обертання двигуна, що забезпечує стабільний,

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

чітко керований процес згоряння. За рахунок електронно керованих форсунок можливе багатоетапне впорскування – попереднє, основне й додаткове. Попередній уприскування зменшує затримку займання, забезпечує плавніший ріст тиску, знижує шум та вібрацію. Основне впорскування формує необхідну теплоту згоряння, а додаткове використовується для догорання залишків палива або зменшення димності.

У сучасних двигунах використовуються форсунки з багатосопловою конструкцією та оптимізованою геометрією розпилу. Форма факела розраховується методом CFD-моделювання, що дозволяє забезпечити максимально повне заповнення камери згоряння й ефективне змішування палива з повітрям. Крім того, застосовуються надтвердосплавні матеріали, покриття DLC та інші рішення, що значно підвищують ресурс форсунок при роботі на важких суднових видах палива, таких як HFO.

Істотний внесок у покращення процесу згоряння дають системи адаптивного керування уприскуванням, що в режимі реального часу змінюють тривалість та фазу подачі палива відповідно до навантаження, тиску наддуву та температури. Внаслідок цього покращується економічність, стабільність роботи двигуна на малих і середніх навантаженнях, а також зменшується розхід палива до 5...8%.

Підвищення ефективності наддуву та покращення наповнення циліндрів

Наддув є ключовим засобом підвищення питомої потужності суднових двигунів та їх ефективності. Суть його полягає у подачі до циліндрів повітря під підвищеним тиском, що дозволяє спалювати більше палива при збереженні однакових об'ємів робочих органів двигуна. Розвиток турбокомпресорних технологій у морській галузі відбувається паралельно із зростанням екологічних вимог та прагненням виробників зменшити питому витрату палива.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Серед ключових технологічних рішень останніх років варто виділити турбокомпресори із змінною геометрією турбіни (VGT). Їх перевага полягає у можливості підтримувати оптимальний тиск наддуву для будь-якого режиму роботи двигуна – від мінімальних обертів до повного навантаження. Це забезпечує кращу прийомистість двигуна, плавність регулювання та зниження специфічної витрати палива під час маневрування судна.

Ще одним напрямком розвитку є двоступеневі системи наддуву, у яких два компресори працюють послідовно або паралельно. Перше ступінь забезпечує попереднє стискання повітря, а друге – доводить тиск до оптимального рівня. Такі системи дозволяють збільшувати тиск наддуву на 40...60%, що суттєво підвищує потужність та загальний ККД двигуна без збільшення його габаритів.

Не менш важливим фактором є якісне охолодження наддувочного повітря. Застосування двоконтурних інтеркулерів, низькотемпературних систем охолодження та теплообмінників нового покоління сприяє підвищенню густини повітря, що надходить у циліндри. Таким чином забезпечується більш повне згоряння палива, знижується утворення NO_x та інших шкідливих компонентів.

Важливою тенденцією є також автоматичне керування наддувом за допомогою електронних регуляторів, які оптимізують роботу турбокомпресора залежно від режиму і стану двигуна.

Модернізація систем автоматичного керування та цифрова діагностика

Сучасні суднові енергетичні установки прагнуть до максимальної автоматизації та цифровізації, що дозволяє не лише оптимізувати роботу двигуна, а й зменшити навантаження на екіпаж. Електронні системи управління отримують інформацію з численних датчиків і в режимі реального часу коригують параметри роботи двигуна.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Алгоритми регулювання забезпечують точне керування тривалістю впорскування, кута випередження упорскування, тиску наддуву, подачі палива та багатьма іншими параметрами. Це підвищує ефективність двигуна, зменшує знос деталей і забезпечує стабільну роботу в мінливих умовах навантаження.

Особливої уваги заслуговують системи предиктивної діагностики, що аналізують відхилення параметрів від нормальних значень та прогнозують можливі відмови. Завдяки алгоритмам машинного навчання та великим масивам даних рівень точності таких систем постійно зростає.

Цифровий моніторинг дозволяє виявляти проблеми ще до того, як вони проявляться у вигляді несправності, що істотно скорочує витрати на ремонт та збільшує ресурс двигуна.

Удосконалення конструктивних елементів та застосування нових матеріалів

Конструктивні елементи двигуна зазнають значних механічних та термічних навантажень, тому застосування нових матеріалів є надзвичайно важливим напрямом. Сучасні двигуни використовують високолеговані сталі, жаростійкі сплави, композитні матеріали, а також керамічні покриття, що підвищують ресурс деталей.

Поршні виконують зі складених конструкцій: сталева головка витримує високий тиск і температуру, а чавунна спідниця забезпечує стабільність та рівномірний розподіл тепла.

Циліндрові втулки отримують зміцнення індукційним гартуванням та наносяться спеціальні покриття для зменшення твірного зносу.

Аналітичні методи, такі як FEM-розрахунки, дозволяють змоделювати поведінку деталей під високими навантаженнями, оптимізувати їх геометрію та запобігти можливим руйнуванням.

Такі технології роблять двигуни більш надійними, довговічними та придатними до роботи у важких умовах на судні.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Системи очищення вихлопних газів (SCR, EGR, скрубери)

Для відповідності суворим нормам щодо викидів сучасні судна оснащують спеціальними системами очищення вихлопних газів.

Система SCR (селективне каталітичне відновлення) дозволяє перетворювати оксиди азоту у воду та азот за допомогою уреї. Така технологія забезпечує зниження NO_x на 85–95%, що робить її ключовою для відповідності стандартам IMO Tier III.

Система EGR (рециркуляція відпрацьованих газів) зменшує температуру згоряння за рахунок повернення частини вихлопу у впускний тракт, що уповільнює реакції утворення оксидів азоту.

Комбінація SCR і EGR дозволяє отримати максимальний ефект та оптимально адаптувати двигун до різних режимів роботи.

Скрубери застосовують для зменшення викидів SO_x при роботі на важкому сірчистому паливі. Вони використовують воду або лужні розчини для поглинання сірки, що дозволяє суднам відповідати вимогам MARPOL Annex VI без повного переходу на дорожче малосірчисте паливо.

Утилізація відпрацьованого тепла та підвищення енергоефективності двигуна

Суднові дизелі втрачають у вигляді тепла до 50% енергії, що міститься у паливі. Використання систем рекуперації дозволяє перетворити частину цієї енергії на корисну роботу. Найчастіше застосовуються котли-утилізатори, що виробляють пару для допоміжних потреб судна або для приводу турбогенератора [4].

Системи органічного циклу Ренкіна (ORC) використовують робочу рідину з низькою температурою кипіння, що дозволяє отримувати електроенергію навіть при відносно низьких температурах. Це дає можливість додатково підвищити загальний ККД суднової енергетичної установки на 5–12%.

					<i>KPM.142.6221м.25.08.00.ПЗ</i>	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розвиток технологій глибокої утилізації включає також застосування теплових насосів, комбінованих систем із повторним підігрівом стисненого повітря, а також рекуперацію тепла мастила та охолоджувальної води для побутових і технологічних потреб судна.

Використання альтернативних та екологічно чистих видів палива

Зростання вартості традиційних палив та посилення міжнародних норм щодо викидів SO_x , NO_x і CO_2 зумовили активний розвиток альтернативних палив у морському транспорті. Перехід на нові види палив дає змогу суттєво зменшити екологічний вплив суден і забезпечити відповідність нормативам ІМО.

Одним із найпоширеніших рішень є LNG (зріджений природний газ), який практично не містить сірки, значно зменшує кількість твердих частинок і на 20...30% скорочує викиди CO_2 . Двигуни Dual-Fuel дозволяють працювати як на газі, так і на дизельному паливі, що забезпечує безперебійну роботу судна навіть у разі відсутності належної інфраструктури.

Все більшої уваги набувають метанол і етанол – рідкі види палива, які легше зберігати та транспортувати, ніж LNG. Їх використання зменшує рівень токсичних викидів, а технологія спалювання є сумісною з традиційними дизельними конструкціями за умови модернізації паливної апаратури.

Перспективним видом енергоносія є аміак, який не містить вуглецю, а отже не продукує CO_2 . Його впровадження вимагає значних конструктивних змін, але світові виробники вже тестують аміачні та аміачно-дизельні двигуни.

Окремим напрямом є застосування водопаливних емульсій, які складаються з дизельного палива та дрібнодисперсної води. Ефект мікровибухів всередині крапель сприяє покращенню диспергування, рівномірнішому згорянню та значному зниженню димності. Це дозволяє зменшити NO_x на 30...50% і скоротити витрату палива.

Окрім заходів щодо внутрішньої частини двигуна та використання систем очищення вихлопних газів, склад модифікованого палива також являє

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

собою привабливу принципову можливість зменшення викидів шкідливих речовин дизельних двигунів.

При використанні емульсії вода-в-дизпаливі як палива, або коли готова до застосування емульсія вода–дизпаливо впорскується в камеру згоряння замість чистого дизельного палива з використанням емульгуючих добавок або емульсії, приготовленої на борту транспортного засобу в самій існуючій системі впорскування. Приготування емульсії на транспортному засобі має ту перевагу, що частка води у змішаному паливі може бути вибрана відносно вільно з точки зору технічних меж згоряння щодо максимального зниження забруднюючих речовин [5].

У принципі, окрім використання емульсій вода-в-дизпаливі, можна також використовувати вигідні характеристики води, щоб знизити температуру згоряння шляхом упорскування води у засмоктуване повітря та безпосереднім упорскуванням води в камеру згоряння. Через високу ентальпію випаровування води, коли її додають через впускну трубу і особливо коли її вводять безпосередньо, досягається суттєве охолодження всмоктуваного повітря або повітря в камері згоряння чи повітря, що згорає, у циліндрі, відповідно, і зниження викидів оксидів азоту до 50 відсотків. Через відносно невелике змішування дизельного палива з водою в камері згоряння і, як наслідок, меншу гомогенізацію дизельного палива в камері згоряння у порівнянні з емульсійним паливом, тим не менш, зниження викидів сажі закінчується. Тому емульсійне паливо, запропоноване на додаток до простішого використання на серійних двигунах, має більш високий потенціал щодо зниження критичних шкідливих компонентів у вихлопних газах дизельних двигунів.

Емульсії вода–дизель можна розглядати як дисперсні багатофазні системи, як суміш щонайменше двох нерозчинних рідин, у якій вода розглядається як внутрішня, дисперсна фаза. Відповідно, дизельне паливо являє собою зовнішню фазу, диспергатор. Емульсії вода–дизель

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

термодинамічно нестабільні й розділяються після відносно короткого часу витримки. Завдяки використанню емульгуючих добавок, так званих емульгаторів, можна, у принципі, перетворити емульсію вода–дизель у термодинамічно стабільну форму. Одним із критеріїв, який важливий для придатності емульсії як палива для дизельних двигунів, є те, що краплі води розподіляються якомога дрібніше в дизельному паливі.

Емульсії, отримані з використанням емульгатора або, якщо емульгатор не використовується, із застосуванням відповідного перемішувального пристрою, придатні для мобільного застосування. Емульсії, вироблені поза двигуном, такі, наприклад, як ті, що доступні на заправних станціях, мають постійний склад, не пристосований до вимог роботи двигуна і, відповідно, не дозволяють забезпечити повний потенціал з точки зору скорочення викидів і споживання.

Вплив емульсій вода–дизель полягає, з одного боку, у зниженні температури, що відбувається під час випаровування води, а з іншого боку – у зниженні температур згоряння в результаті збільшеної фракції інертного газу у вигляді водяної пари. Обидва фактори призводять до подовження фізичної затримки займання, що спричиняє більш рівномірний (однорідний) розподіл палива в камері згоряння і, таким чином, згорання більшої частини «попередньо підготовленої» суміші.

Отримана інтенсифікована однорідна суміш у поєднанні з тонким розподілом крапель води в емульсії призводить до зменшення областей високого збагачення паливом у суміші, які, по суті, відповідальні за виникнення сажі в процесі згоряння. Зменшення викидів оксидів азоту можна віднести до значного зниження температури спалаху, як результат високої ентальпії випаровування води, так і пов'язаного з водою меншого локального питомого виділення тепла в зоні горіння; порівн. Pittermann, R., Hinz, M., Kauert, L: Einfluss von Abgasrückführung und Kraftstoff-Wasser-Emulsion auf Verbrennungsablauf und Schadstoffbildung im Dieselmotor [Вплив рециркуляції

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

відпрацьованих газів та паливно-водної емульсії на процес згоряння та утворення шкідливих речовин у дизельному двигуні]. MTZ 60(1999)12, стор. 812–818.

Рециркуляція вихлопних газів (EGR) часто використовується для зниження викидів NOx, що також призводить до нижчих температур спалаху відповідно до збільшення фракції інертного газу. Проте збільшення викидів сажі відбувається при високих швидкостях EGR, чого можна уникнути у поєднанні з емульсійним паливом вода–дизель. Використання емульсійного палива вода–дизель тим самим збільшує толерантність EGR і, відповідно, можливість зниження вмісту NOx і сажі.

Ще однією вимогою до оптимального використання емульсійного палива є необхідність адаптації водної фракції емульсії до різних умов роботи двигуна, а також можливість вимкнення і запуску двигуна навіть після тривалого неробочого періоду.

На етапі запуску дизельного двигуна надійний і легкий пуск та швидкий прогрів двигуна можуть бути досягнуті тільки при роботі на чистому дизельному паливі, оскільки стабільне згоряння досягається вже після кількох тактових циклів. При використанні емульсії вода–дизель на початковій фазі також збільшується кількість тактових циклів без згоряння внаслідок погіршення власної займистості емульсії, з відповідним збільшенням викидів незгорілого палива. Після прогріву двигуна водну фракцію в емульсії можна збільшувати в ході прогріву.

У випадку переважно стаціонарної роботи двигуна та високої продуктивності більш значна частина води може міститися в емульсії завдяки вищим температурам у камері згоряння для досягнення процесу горіння, який є найбільш ефективним при одночасному значному зниженні викидів NOx і частинок. При малій навантаженості та відповідно низьких температурах у камері згоряння зниження фракції води в емульсії необхідне для того, щоб запобігти надмірному охолодженню зон займання та відповідним викидам

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

незгорілого палива. Переважно стаціонарна робота двигуна з відносно повільними змінами навантаження та обертів двигуна не потребує використання динамічних систем емульгування.

У принципі, повне використання потенціалу емульсії вода–дизель для зменшення викидів NO_x і сажі можливе лише тоді, коли фракція води якомога ближче відповідає технічній межі згоряння, що залежить від режиму експлуатації.

Огляд сучасних способів отримання емульсії вода–дизельне паливо для суднових двигунів

Використання емульсійних палив у суднових енергетичних установках є перспективним напрямом зменшення викидів NO_x і твердих частинок, покращення повноти згоряння та зниження температури пікових процесів у камері згоряння. Основою таких палив є стабільна мікро- або наноемульсія з вмістом води 5–25%, що не розшаровується в умовах тривалої експлуатації суден, вібрацій та температурних коливань. Якість і стабільність емульсії визначаються технологією її отримання [6].

Нижче наведено основні промислові та перспективні способи утворення емульсій W/D, які найчастіше застосовують у суднових енергетичних установках або в системах передпускової підготовки палива.

1. Механічне перемішування у статичних або динамічних змішувачах

Цей метод базується на створенні інтенсивного турбулентного потоку, який розбиває об'єм води на мікрокраплини, рівномірно розподілені у дизельному паливі.

Особливості технології

- Використовуються лопатеві мішалки, високошвидкісні гомогенізатори, турбулентні змішувачі або ротор-статорні системи.
- Дозування води здійснюється паливними насосами малої продуктивності.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Введення емульгатора дозволяє отримати стійку мікроемульсію з краплями розміром 1–10 мкм.

Переваги

- Простота конструкції.
- Можливість інтеграції в існуючі суднові системи підготовки палива.

Недоліки

- Значні енергетичні витрати на перемішування.
- Обмежена стабільність без використання спеціальних емульгаторів.
- Чутливість якості емульсії до вібрацій та перепадів температури на судні.

2. Ультразвукове емульгування

Метод заснований на явищі кавітації, яке сприяє руйнуванню водяних структур на нано- та мікрорівні.

Технологічні принципи

- Використовуються ультразвукові випромінювачі (20–40 кГц).
- Кавітаційні мікробульбашки створюють інтенсивні зсувні напруження, що дроблять воду до 0,1–1 мкм.
- Може працювати без емульгаторів або з їх мінімальною кількістю.

Переваги

- Висока стабільність емульсії (до 6–12 місяців).
- Однорідна структура, що покращує процес згоряння.
- Зменшення вимог до хімічних добавок.

Недоліки

- Складніше обслуговування ультразвукового обладнання у морських умовах.
- Підвищена вартість установки.
- Необхідність захисту перетворювачів від забруднень палива.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

3. Гідродинамічна кавітація

Один із найбільш перспективних методів для суднових двигунів.

Суть методу

- Паливо з водою проходить через кавітатор – трубчастий елемент зі спеціальною геометрією (оріфіси, сопла, вентурі).
- Різке падіння тиску спричиняє утворення та руйнування кавітаційних бульбашок.
- Краплини води подрібнюються до нанорозміру (0,1–0,5 мкм).

Переваги

- Висока стабільність емульсії.
- Низькі витрати електроенергії.
- Надійність і простота конструкції – відсутність рухомих частин.
- Добре працює з важкими судновими паливами (HFO, LSHFO).

Недоліки

- Потребує точного налаштування тиску та конфігурації кавітатора.
- Чутливий до забруднень (вимагає фільтрації палива).

4. Хімічні методи утворення емульсії (використання емульгаторів)

Це один із базових промислових способів для стабільної довготривалої емульсії [7].

Технічні особливості

- Використовуються ПАР (поверхнево-активні речовини) – неіонні, аніонні або катіонні емульгатори.
- Емульгатори знижують міжфазну напругу та стабілізують дрібні краплини води.
- Можливе утворення мікроемульсій (прозорих або напівпрозорих систем).

Переваги

- Висока стабільність зберігання (до років).
-

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Можливість тривалого транспортування емульсії.

Недоліки

- Дорожчі компоненти.
- Необхідність враховувати сумісність емульгаторів з судновим двигуном та екологічні норми (MARPOL Annex VI).
- Можлива зміна лужності та кислотного числа палива.

5. Спосіб високотискового змішування у форсунці або паливній рампі (in-situ emulsification)

Цей сучасний метод застосовується безпосередньо перед упорскуванням, наприклад у дизельних двигунах із подвійними системами подачі.

Опис технології

- Вода й дизельне паливо подаються окремими трубопроводами високого тиску.
- У зовнішній змішувальній камері безпосередньо перед інжектором вони змішуються при тиску 500–1800 бар.
- В дизельне паливо попередньо вводиться емульгатор.
- Емульсія формується за кілька мілісекунд до впорскування.

Переваги

- Мінімальні вимоги до стабільності емульсії – вона існує лише миттєво.
- Можливість швидкої зміни водовмісту залежно від режиму двигуна.
- Висока адаптивність до навантажень.

Недоліки

- Необхідність двох систем високого тиску (для води та дизеля).
- Складність реалізації на існуючих суднових двигунах без глибокої модернізації.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Підвищені вимоги до якості води (деіонізована або демінералізована).

6. Роторно-кавітуючі апарати (кавітаційно-механічне емульгування)

Це комбінована технологія, що поєднує механічні зсувні напруження та кавітацію.

Особливості

- Ротор зі спеціальним профілем обертається зі швидкістю 3000–12000 об/хв.
- Високі градієнти швидкості подрібнюють воду до нанорозміру.
- Використовується для отримання стабільних емульсій на важких паливах (HFO, IFO, VLSFO).

Переваги

- Дуже дрібна дисперсність (0,1–2 мкм).
- Підходить для великих обсягів палива на судах.
- Може працювати без великих концентрацій ПАР.

Недоліки

- Складний роторний механізм потребує обслуговування.
- Чутливість до забруднень і твердих частинок.

7. Електромагнітне та електростатичне подрібнення краплин (перспективні технології)

Метод використовує електричні поля високої напруги для диспергування води [8].

Переваги

- Емульсія з розміром частинок менше 0,1 мкм.
- Можливе зниження викидів NO_x більш ніж на 25–30%.

Недоліки

- Експериментальний статус.
- Потребує складних перетворювачів та електроніки.
-

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Поки не рекомендовано для комерційного використання на судах.

8. Мембранне емульгування (nanomembrane emulsification)

Новий метод, заснований на проштовхуванні води через нанорозмірні пори мембрани у потік дизпалива.

Переваги

- Вкрай висока однорідність емульсії.
- Низьке енергоспоживання.

Недоліки

- Мембрани швидко забруднюються важким паливом.
- Потребують фільтрації та регенерації.
- Поки використовується лише у лабораторіях.

Спосіб одержання мікроемульсії, описаний у патенті DE 102009048223 A1, у якому дизельне паливо і воду розділяють за допомогою двох систем упорскування із загальною паливною магістраллю і подають під високим тиском у змішувальну камеру, розташовану між магістралями високого тиску для дизельного палива і води та форсункою упорскування. Саме в цій змішувальній камері, з емульгатором, який уже міститься в дизельному паливі, утворюється мікроемульсія. Таке розташування відносно невеликої змішувальної камери на малому відстані перед інжектором і завдяки доступним малим об'ємам змішувальної камери та інжекційних ліній дає можливість швидкої адаптації водної фракції емульсії, яка подається у форсунки, до робочого режиму дизельного двигуна лише за кілька тактових циклів. Цей метод вимагає використання спеціальних емульгаторів, які дозволяють дуже швидко утворення емульсії вода–дизель.

Відомий пристрій із DE 102005044046 B4, який забезпечує подачу води та палива за допомогою механічно або гідравлічно керованого ступінчастого поршня під тиском до 200 МПа для протиточності емульсійної форсунки високого тиску. Одержану емульсію вода–дизель утримують доступною в

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

кількох підпружинених проміжних резервуарах, які також виконують функцію амортизатора, і подають її через розподільну трубку в інжектори у міру необхідності. Таким чином, принципово цей пристрій являє собою комбінований емульгуючий насос високого тиску, величина якого порівнянна з дизельним насосом високого тиску традиційної системи впорскування у загальному розподільнику. Відносно великі об'єми палива магістралей насоса високого тиску та розподільної лінії до форсунок не дозволяють швидкої адаптації емульсійного складу протягом кількох тактових циклів. Зокрема, робота на чистому дизелі або робота з малими фракціями води потрібна під час запуску двигуна та на фазі прогріву, тому необхідний відповідний попередній запас палива, наприклад, пов'язаний зі зливним пристроєм із розподільної лінії високого тиску та лінії упорскування, який не передбачений у опублікованому пристрої.

Ще однією проблемою є небезпека коалесценції внаслідок відносно тривалого часу перебування емульсії в магістралях і лінії упорскування, зокрема при низькому навантаженні двигуна, і пов'язане з цим розділення фаз емульсії вода–дизель.

Спосіб і пристрій для керування подачею дизельного палива та емульсії вода–дизель у магістральних насосах відомий із патенту DE 4412965 A1, у якому, залежно від стану навантаження двигуна, різні склади емульсії приготавлиються в системі змішування, а потім подаються у паливний насос або передбачена робота виключно на дизельному паливі. Для скорочення часу реакції між виготовленням зміненої емульсії та інжекцією цієї емульсії так звана камера насоса низького тиску промивається належним чином відповідно до бажаного збільшення або зменшення фракції води в емульсії, одержуваної з емульсійної або дизпаливної магістралі. Крім того, можливий перехід від роботи на емульсії до роботи на чистому дизпаливі залежно від режиму роботи. Зокрема, двигун повинен працювати на чистому дизельному паливі на

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

холостому ходу, тоді як робота на емульсії застосовується при великих навантаженнях.

Вплив цього «мертвого часу» між утворенням емульсії та надходженням її в інжектор на роботу і поведінку викидів значною мірою залежить від об'єму системи в області виробництва емульсії та об'єму палива, що підлягає заміні у зоні високих тисків системи впорскування. У будь-якому разі адаптація до динамічних умов експлуатації відбувається відносно повільно.

Жоден із наведених вище способів і пристроїв не пропонує рішення для промивання всієї області високого тиску інжекційних пристроїв дизельним паливом після вимкнення двигуна, щоб уникнути займання і, відповідно, проблеми викидів, коли двигун запускається знову, або для запобігання корозії і/або зносу, які могли б виникнути в системі упорскування.

Метою даної роботи є визначення ефективності використання емульсії дизпаливо–вода, яка готується безпосередньо судні та динамічно змінює фракцію води залежно від навантаження і частоти обертання двигуна.

					<i>КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ</i>	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕМУЛЬСІЙНОГО ПАЛИВА

Застосування водопаливних емульсій є дієвим способом підвищення економічної ефективності та екологічної безпечності роботи дизельних двигунів.

У цій роботі буде розглянуто можливість функціонування двигуна 6ЧН 43/61 на емульсії у співвідношенні 15 % води та 95 % дизельного палива за умов номінального навантаження.

Розрахунок робочого циклу двигуна 6ЧН 43/61 на дизельному паливі

Вихідні дані

Температура навколишнього повітря T_0 . Приймаємо $T_0 = 293$ К (стандартні умови застосування).

Тиск навколишнього повітря p_0 . В усіх випадках варто приймати $p_0 = 0,1013$ МПа (стандартні атмосферні умови).

Ступінь стиску ε . При призначенні ступеня стиску варто враховувати розміри циліндра і спосіб сумішоутворення. При нерозділеній камері згоряння для СОД $\varepsilon = 11 \dots 15$. Приймаємо $\varepsilon = 15$.

Коефіцієнт надлишку повітря α . Цей коефіцієнт також залежить від розмірів циліндра і способу сумішоутворення. Цей параметр при підвищенні зменшує питому витрату пального, водночас зменшуючи середній ефективний тиск та потужність. Відповідно його слід підбирати з кількох спроб розрахунку з урахуванням одночасного досягнення заданої потужності і найкращої можливої економічності. Вибір остаточного значення α робиться з вибором оптимального значення $П_k$. З урахуванням переліченого встановлюємо $\alpha = 2,36$.

Показник адіабати повітря $k_\varepsilon = 1,4$.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Механічний ККД турбіни $\eta_{\text{лм}} = 0,98$.

Адіабатний ККД турбіни $\eta_{\text{маб}} = 0,82$.

Коефіцієнт залишкових газів γ_r . Вплив на значення цього коефіцієнту завдають тип двигуна, особливості повітропостачання і газообміну. У СОД $\gamma_r = 0,02-0,08$. Приймаємо $\gamma_r = 0,025$.

Коефіцієнт використання теплоти в точці z (ξ_z), та в точці b (ξ_b). Ця величина змінюється в широких межах і залежить від ступеня досконалості двигуна. Найкраще ці величини призначити після аналізу теплового балансу двигунів, близьких до проєктованого. Для МОД і СОД $\xi_z = 0,75-0,94$; $\xi_b = 0,86-0,98$. Приймаємо $\xi_z = 0,92$; $\xi_b = 0,95$.

Ступінь підвищення тиску при згорянні λ . Для високо форсованих двигунів $\lambda = 1,3 \dots 2,0$ [1]. Для МОД $\lambda = 1,05-1,35$. Приймаємо $\lambda = 1,2$.

Підігрів заряду від стінок циліндру ΔT_a . Ця величина складає: (5 – 45) К – для ДВЗ з наддувом та (10 – 20) К – для ДВЗ без наддуву.

Приймаємо $\Delta T_a = 15$ К.

Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми ζ . Величину цього коефіцієнту вибирають на підставі дослідних даних, звертають на тип двигуна та особливості системи газообміну. Приймаємо $\zeta = 0,99$.

Зменшення тиску у повітроохолоджувачі $\Delta P_{\text{ох}}$. Повітроохолоджувач представляє собою опір на шляху повітря, тому у ньому відбувається зменшення тиску повітря. Приймаємо $\Delta P_{\text{ох}} = 0,005$ МПа.

Температура залишкових газів T_r . Для двигунів такого типу T_r знаходиться у межах 600...900 К. Приймаємо $T_r = 800$ К.

Хімічний склад палива. Розрахунок проводиться для двигуна, який працює на дизельному паливі. Масовий склад пального:

Вуглець – С = 0,87 кг;

Водень – Н = 0,126 кг;

Сірка – S = 0 кг;

Кисень – О = 0,004 кг.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Нижча теплота згоряння палива Q_H^ϕ . Для дизельного пального приймаємо $Q_H^\phi = 42700$ кДж/кг.

Коефіцієнт тактності Z . Це кількість робочих ходів поршня за один оберт колінчатого валу. $Z = 0,5$.

Результати розрахунку

Розрахунок процесу наповнення

Температура повітря за компресором, К

$$T_k = T_0 \times \left[1 + \frac{\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{0,286} - 1}{\eta_{k,ad}} \right] = 293 \times \left[1 + \frac{\left(\frac{0,41}{0,101} \right)^{0,286} - 1}{0,81} \right] = 470,825$$

Температура повітря перед двигуном, К

$$T_s = T_k - \eta_o \times (T_k - T_0) = 470,825 - 0,8 \times (470,825 - 293) = 328,565$$

Температура заряду наприкінці процесу наповнення, К

$$T_a = \frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r \times T_r}{1 + \gamma_r} = \frac{328,565 + 15 + 0,025 \times 800}{1 + 0,025} = 354,698$$

Тиск повітря перед двигуном, МПа

$$P_s = P_k - \Delta P_{ox} = 0,41 - 0,004 = 0,406$$

Тиск заряду наприкінці процесу наповнення, МПа

$$P_a = 0,97 \times P_s = 0,97 \times 0,406 = 0,394$$

Коефіцієнт наповнення

$$\eta_v = \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \times \frac{P_a}{P_s} \times \frac{T_s}{T_a} \times \frac{1}{1 + \gamma_r} \times (1 - \varphi_n) = \frac{15}{15 - 1} \times \frac{0,394}{0,406} \times \frac{328,565}{354,698} \times \frac{1}{1 + 0,025} \times (1 - 0) = 0,939$$

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розрахунок процесу стиску

У реальному двигуні теплоємність заряду в циліндрі змінюється залежно від температури, тому що, відбувається теплообмін зі стінками циліндра. Так само на характер протікання процесу впливають витік газів через нещільності клапанів і поршневих кілець, дозарядка циліндра до закриття впускного клапана, випару палива, згоряння палива наприкінці стиску. У зв'язку із цим точний термодинамічний опис процесу стиску в реальному двигуні утруднено.

На практиці вважають, що процес стиску відбувається по політропі з показником n_I величина якого забезпечує одержання такої ж роботи в процесі стиску, як і при змінному показнику у дійсному процесі.

При виборі величини n_I , необхідно враховувати наступне: зі збільшенням частоти обертання колінчатого вала n_I збільшується; при підвищенні середньої температури процесу стиску n_I зменшується; зі зменшенням інтенсивності охолодження двигуна n_I збільшується; зі зменшенням відносини поверхні охолодження до об'єму циліндра n_I збільшується; для дизелів з нерозділеними камерами згоряння $n_I = 1,32 \dots 1,42$, приймаємо в розрахунок:

$$n_I = 1,361$$

Тиск в кінці процесу стиску, МПа

$$P_c = P_a \times e^{n_I} = 0,394 \times 15^{1,361} = 15,702$$

Температура в кінці процесу стиску, К

$$T_c = T_a \times e^{n_I - 1} = 354,698 \times 15^{1,361 - 1} = 942,816$$

Розрахунок процесу згоряння

Дійсна кількість повітря для згоряння, кмоль/кг

$$L = \frac{\alpha}{0,21} \times \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) = \frac{2,36}{0,21} \times \left(\frac{0,87}{12} + \frac{0,126}{4} + \frac{0}{32} - \frac{0,004}{32} \right) = 1,167$$

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta_0 = 1 + \frac{8 \times H + O}{32 \times L} = 1 + \frac{8 \times 0,126 + 0,004}{32 \times 1,167} = 1,027$$

Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} = \frac{1,027 + 0,025}{1 + 0,025} = 1,026$$

Доля палива, що згоріла в точці z

$$x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b} = \frac{0,92}{0,95} = 0,968$$

Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z

$$\beta_z = 1 + \left(\frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \times x_z = 1 + \left(\frac{1,027 - 1}{1 + 0,025} \right) \times 0,968 = 1,026$$

Максимальна температура згоряння, К

$$\frac{\xi_z \times Q_n}{\alpha \times L_0} + [c'_v + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times (c'_v + 8,314 \times \lambda)] \times T_c = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times c'_{pe} \times T_z$$

$$T_z = \frac{C}{A \times T_z + B}$$

$$A = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times b_z$$

$$B = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times (\alpha_{vz} + 8,314)$$

$$C = \frac{\xi_z \times Q_n}{\alpha \times L_0} + [(19,26 + 0,0025 \times T_c) + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times ((20,47 + 0,0036 \times T_c) + 8,314 \times \lambda)] \times T_c$$

Це рівняння розв'язується методом послідовних наближень, для чого у першому наближенні приймаємо $T_z = 1800$ К. Після вирішення декількох рівнянь отримуємо:

$$T_z = 1823$$

Максимальний тиск згоряння, МПа

$$P_z = \lambda \times P_c = 1,2 \times 15,702 = 18,843$$

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розрахунок процесу розширення

Ступінь попереднього розширення

$$\rho = \frac{\beta_z}{\lambda} \times \frac{T_z}{T_c} = \frac{1,026}{1,2} \times \frac{1823,359}{942,816} = 1,653$$

Ступінь подальшого розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{15}{1,653} = 9,075$$

Розрахунок параметрів процесу розширення ведеться з умовно постійним показником політропи розширення n_2 . Для дизелів $n_2 = 1,18 \dots 1,3$. Варто пам'ятати, що показник політропи залежить від режиму роботи двигуна, розмірів циліндра, способу охолодження й ряду інших факторів. У всіх випадках, коли збільшується тривалість догорання палива, знижуються відносний теплообмін і витоки газів, n_2 зменшується. Виходячи з вищесказаного приймемо:

$$n_2 = 1,284$$

Температура в кінці процесу розширення, К

$$T_b = T_z \times \frac{1}{\delta^{n_2-1}} = 1823,359 \times \frac{1}{9,075^{1,284-1}} = 974,636$$

Тиск в кінці процесу розширення, МПа

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \frac{18,843}{9,075^{1,284}} = 1,11$$

Визначення індикаторних показників

Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа

$$P_i' = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \times \left[\lambda \times (\rho - 1) + \frac{\lambda \times \rho}{n_2 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] =$$

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$= \frac{15,702}{15-1} \times \left[1,2 \times (1,653 - 1) + \frac{1,2 \times 1,653}{1,284 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{9,073^{1,284-1}} \right) - \frac{1}{1,361 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{15^{1,361-1}} \right) \right] = 2,587$$

Дійсний середній індикаторний тиск, МПа

$$P_i = P_i' \times \zeta \times (1 - \varphi_n) = 2,587 \times 0,99 \times (1 - 0) = 2,561$$

Індикаторна питома витрата пального, кг/(кВт*год)

$$g_i = 433 \times \frac{P_s \times \eta_n}{\alpha \times L_0 \times T_s \times P_i} = 433 \times \frac{0,406 \times 0,939}{2,36 \times 0,495 \times 328,565 \times 2,561} = 0,168$$

Індикаторний ККД

$$\eta_i = \frac{3600}{g_i \times Q_n} = \frac{3600}{0,168 \times 42700} = 0,502$$

Визначення ефективних показників

Середній ефективний тиск, МПа

$$P_e = P_i \times \eta_m = 2,561 \times 0,95 = 2,433$$

Ефективний ККД двигуна

$$\eta_e = \eta_i \times \eta_m = 0,502 \times 0,95 = 0,477$$

Питома ефективна витрата пального, кг/(кВт*год)

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} = \frac{0,168}{0,95} = 0,177$$

Ефективна потужність двигуна, кВт

$$N_e = 13,1 \times D_c^2 \times S_c \times z \times P_e \times n \times i = 13,1 \times 0,43^2 \times 0,61 \times 0,5 \times 2,433 \times 500 \times 6 = 5403,595$$

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Порівняння заданої та отриманої потужності двигуна

$$\Delta N = \frac{N_e - N'_e}{N_e} \times 100\% = \frac{5403,595 - 5400}{5403,595} = +0,067\%$$

Точність розрахунку задовільна, різниця між заданою і отриманою в результаті розрахунку потужності не перевищує 0,5%.

Розрахунок робочого циклу двигуна 6ЧН 43/61 на емульсійному паливі

Для виконання термодинамічного розрахунку робочого процесу двигуна, що працює на водопаливній емульсії, приймаються ті самі базові припущення та початкові параметри, які були використані у попередніх підрозділах. Розрахунки здійснюються для двигуна, що функціонує відповідно до дизельного циклу. За даними наукових джерел, введення води до складу паливної суміші позитивно впливає на перебіг процесу згоряння. Це проявляється, зокрема, у підвищенні коефіцієнтів використання теплоти в характерних точках циклу – значення в точці z та в точці b приймаються відповідно рівними 0,94 та 0,98.

Значення нижчої теплоти згоряння та масового елементарного складу водопаливної емульсії подано у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Властивості емульсійного палива

Параметр		Одиниці виміру	Масовий елементарний склад палива, %		Суміш (ВП – 85%, H ₂ O – 15%)
			Дизельне	Вода	
Компоненти	С	%	0,87	0	0,73
	Н	%	0,126	0,111111	0,124
	О	%	0,004	0,888889	0,136
Питома нижча теплота згоряння		кДж/кг	42700	0	36295

Результати розрахунків наводяться в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати теплового розрахунку двигуна на водопаливній емульсії

Параметр	Значення
Температура повітря за компресором, T_k (К)	470,825
Температура повітря перед двигуном, T_s (К)	328,565
Температура заряду к кінцю наповнення, T_a (К)	354,698
Тиск повітря перед двигуном, P_s (МПа)	0,406
Тиск заряду к кінцю наповнення, P_a (МПа)	0,394
Коефіцієнт наповнення, η_n	0,939
Середній показник політропи стиску, n_1	1,361
Тиск в кінці процесу стиску, P_c (МПа)	15,702
Температура в кінці процесу стиску, T_c (К)	942,289
Максимальна температура згоряння, T_z (К)	1790
Максимальний тиск згоряння, P_z (МПа)	18,843
Ступінь попереднього розширення, ρ_o	1,645
Ступінь наступного розширення, δ	9,12
Середній показник політропи розширення, n_2	1,276
Температура в кінці процесу розширення, T_b (К)	973,064
Тиск в кінці процесу розширення, P_b (МПа)	1,122
Теоретичний середній індикаторний тиск, P_{ti} (МПа)	2,592
Дійсний середній індикаторний тиск, P_i (МПа)	2,566
Індикаторна питома витрата емульсії, g_i (кг/кВт×год)	0,192
Індикаторний ККД, η_i	0,516
Середній ефективний тиск, P_e (МПа)	2,438
Ефективна витрата дизельного палива, g_e (кг/кВт×год)	0,172

Ефективна витрата води, g_e (кг/кВт×год)	0,03
Ефективний ККД, η_e	0,491
Ефективна потужність, N_e (кВт)	5403

Отже, результати розрахунків свідчать, що використання емульсійного палива в двигуні 6ЧН 43/61 на номінальному навантаженні призводить до зниження питомої ефективної витрати важкого палива з 177 до 172 г/кВт·год, тобто приблизно на 3 %. Крім того, максимальна температура циклу зменшується на 33 °С (з 1823 до 1790 К), що, у свою чергу, забезпечує скорочення викидів NOx приблизно на 15 %.

Особливості використання емульсійного палива в двигуні 6ЧН 43/61

Для її отримання емульсійного палива пропонується застосовувати механічні емульгувальні пристрої, які можуть розташовуватися у зоні високого тиску паливної системи – між паливною магістраллю та форсункою або безпосередньо перед інжектором.

Принцип формування емульсії

Система передбачає введення води у паливну магістраль високого тиску за допомогою компактного механічного змішувача. Дизельне паливо та вода спочатку подаються окремо до попереднього змішувача, де виконується первинне поєднання фаз. Після цього суміш надходить у контур рециркуляції, що забезпечує досягнення необхідної однорідності й стабільності водо-дизельної емульсії.

У більшості випадків отримання емульсії здійснюється без застосування хімічних емульгаторів, лише за рахунок механічної дії у зоні високого тиску.

Розташування обладнання та швидкодія системи

Механічний емульгувальний блок зазвичай монтують якомога ближче до інжектора. Це мінімізує об'єм паливної лінії між змішувачем і форсункою, що є критично важливим у динамічних режимах роботи двигуна.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Завдяки малому об'єму цієї ділянки, зміна співвідношення «вода/паливо» оперативно впливає на фактичний склад емульсії, що подається в циліндри. При зміні навантаження двигуна корекція водної фракції відбувається протягом кількох робочих циклів, забезпечуючи її відповідність оптимальному для згоряння значенню.

Такий підхід дозволяє зменшити концентрацію NOx та сажі до максимально можливих значень для конкретного режиму.

Переходи між режимами роботи

Система передбачає можливість швидкого перемикавання між роботою на емульсії та чистому дизельному паливі. Це необхідно:

- під час запуску двигуна (особливо холодного),
- під час роботи на малих навантаженнях та холостому ходу,
- перед зупинкою двигуна для уникнення корозійних процесів у магістралях високого тиску.

При зниженні навантаження і температури у камері згоряння водну фракцію зменшують для підтримання стабільного процесу згоряння. На холостому ходу система може повністю переходити на дизельне паливо.

Під час зупинки двигуна емульсія витісняється з паливної магістралі дизельним паливом через спеціальний зливний клапан, що відкривається в останні оберти колінчастого вала.

Дозування води та керування складом емульсії

Подача води здійснюється дозувальним насосом високого тиску відповідно до поточного споживання дизельного палива. Необхідна кількість води визначається:

- даними лічильників подачі та зворотного палива,
- характеристиками двигуна (температура ОР, тиск у магістралі),
- режимом роботи (навантаження, частота обертання).

Контролер системи розраховує необхідну водну частку та формує керувальний сигнал для насоса.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Особливості впорскування емульсії

Оскільки при збільшенні частки води у паливі знижується теплота згоряння, для забезпечення тієї ж потужності потрібно збільшувати тривалість упорскування.

Це може реалізовуватися:

- шляхом корекції карт упорскування у системі керування двигуна,
- або шляхом подовження імпульсів керування інжекторами додатковим контролером.

Однак надмірне подовження упорскування обмежене зниженням теплового ККД та погіршенням процесу згоряння.

Режими роботи та екологічні показники

При номінальних та високих навантаженнях використання водо-паливної емульсії дозволяє знизити:

NO_x – до 50 %,

сажу – у кілька разів.

Водночас максимальна водна фракція обмежується умовами стабільного згоряння, щоб уникнути росту СО та незгорілого палива.

У режимах низького навантаження, при охолодженні камери згоряння, кількість води зменшують. У певних випадках двигун може тимчасово працювати тільки на дизельному паливі.

Необхідність інтеграції системи

Для реалізації описаної технології водо-паливної емульсії необхідно інтегрувати змішувальний та дозувальний вузли у загальну систему подачі палива двигуна з магістраллю високого тиску. Важливо забезпечити мінімальні об'єми магістралей, надійну роботу насоса дозування води та можливість швидкого переходу між різними режимами подачі палива.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Структурна схема двигуна з емульгувальними пристроями

На принциповій схемі (рис. 3.1) показано двигун 1, у складі якого передбачено декілька емульгувальних пристроїв 2. Вони інтегровані в систему впорскування 3 або гідравлічно пов'язані з нею.

Емульгувальні модулі 2 розміщені у зоні високого тиску – у впорскувальних лініях 4 між магістраллю високого тиску (загальною рампою, колектором 5) та форсунками 6 (інжекторами, нагнітальними клапанами). Така конфігурація дає змогу забезпечити роботу двигуна 1 на емульсії «вода–дизельне паливо» змінного складу – від певної водної фракції до повністю безводного дизельного палива.

Паливна система двигуна включає дизельний бак 7, підкачувальний (нагнітальний) паливний насос 8, паливний фільтр 9, паливний лічильник 10 (зокрема, витратомір за об'ємом) та насос високого тиску 11, який подає паливо до колектора 5. Насос високого тиску 11 і/або колектор можуть мати вузол регулювання тиску 112, а також лінію повернення палива 113 у бак 7.

У дизельну магістраль інтегрується датчик тиску 111, який передає до пристрою керування 22 інформацію про поточний тиск палива у рампі. Лінія зливу/повернення 12 від колектора 5 і/або насоса високого тиску 11 проходить через додатковий паливний лічильник 13 і повертається в бак 7. Це дає можливість враховувати як подачу палива, так і його зворотний потік для точного визначення витрати.

Кожен емульгувальний блок 2 живиться дизельним паливом і водою як другим компонентом суміші. У розглянутому варіанті система має окремий водяний бак 14, водяний підкачувальний насос 15, фільтр води 16 та дозувальний пристрій 17 (насос або вузол високого тиску), який забезпечує подачу води до емульгувальних модулів 2.

Для приводу та регулювання гідравлічних елементів двигун 1/система впорскування 3 можуть містити гідравлічний блок: насос змінної продуктивності 18 та керований вентиль 19. Через цей вузол забезпечується

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

подача робочої рідини (води або іншої гідравлічної рідини) під потрібним тиском та її регулювання.

У поданому варіанті для кожного циліндра або кожної форсунки 6 передбачено окремий емульгувальний пристрій 2, що підвищує точність керування складом емульсії для кожного циліндра. В іншій конфігурації (умовно відповідає Фіг. 2) можливе живлення кількох форсунок 6 від одного спільного емульгувального модуля.

У впорскувальних лініях 4 між емульгувальним пристроєм 2 та інжектором 6 встановлюються зливні клапани 20. Вони, разом із лініями витоку 38 форсунок 6, під'єднані до сепаратора води 21.

Коли зливні клапани 20 відкриті, емульгувальні пристрої 2 та впорскувальні лінії 4 промиваються чистим дизельним паливом. Суміш залишкового дизпалива та води надходить до сепаратора 21, де відбувається їх розділення. Відібране паливо повертається по зворотному трубопроводу 12 у бак 7, а вода – по окремій зворотній лінії у бак 14.

Функції керування всією системою виконує електронний блок 22. Під час роботи на емульсії він коригує водну фракцію в паливі залежно від режиму двигуна: навантаження M , частоти обертання D та температури охолоджувальної рідини K . На підставі цих параметрів визначається, яку частку води слід додавати до дизельного палива в емульгувальних пристроях 2, щоб забезпечити оптимальний режим згоряння й мінімальні викиди.

Подані пунктиром на принциповій схемі зв'язки і лінії керування відображають інформаційно-керуючі сигнали між блоком 22 та окремими елементами системи – насосами, клапанами, датчиками тиску й витрати, а також емульгувальними модулями.

Емульгувальні пристрої 2 в описаній конфігурації працюють як компактні механічні системи емульгування, що реалізують змішування та тонкодисперсне емульгування під високим тиском у складі штатної паливної системи двигуна.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

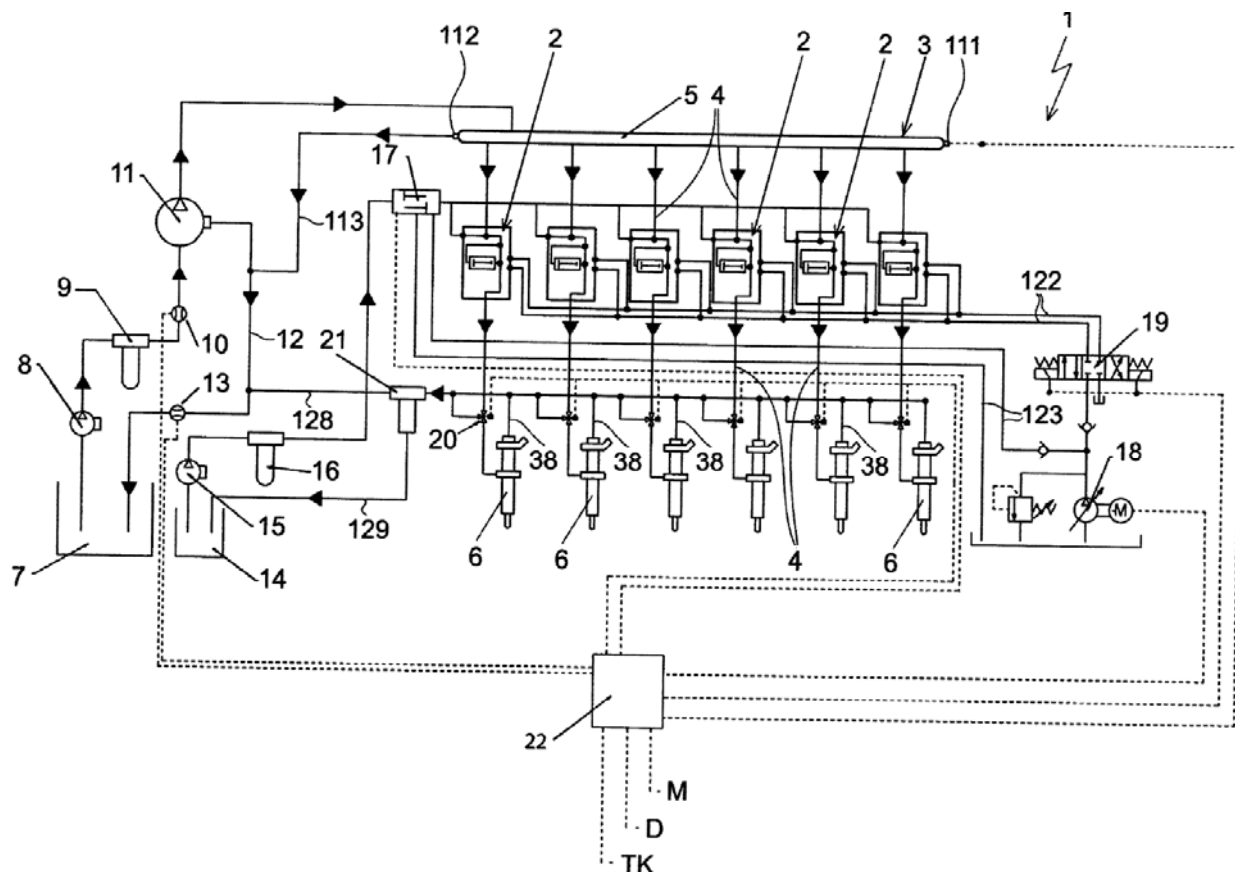


Рисунок 3.1 – Схема паливної системи двигуна

Емульгувальний пристрій (рис. 3.2) 2 являє собою компактний модуль, призначений для формування водо-дизельної емульсії безпосередньо в зоні високого тиску паливної системи. Дизельне паливо подається в пристрій через вхідний отвір 23, а вода – через окремий впускний отвір 24. Обидва потоки потрапляють у спільний основний канал 30, де відбувається їх подальша обробка і змішування. Після проходження через усі внутрішні елементи емульгувального модуля готова емульсія виходить через вихідний отвір 25 і спрямовується у впорскувальну лінію двигуна.

Перед основним процесом емульгування потоки води та дизельного палива можуть проходити через попередній емульгатор 26, який виконує функцію турбулентного змішувача. У цьому елементі створюються вихрові потоки, що забезпечують первинне диспергування води у паливі. Попередній емульгатор 26 не є обов'язковим, але його наявність сприяє рівномірнішому

змішуванню компонентів. Після цього суміш потрапляє до ділянки, де розташований механічний вузол змішування – поршень 27 та емульгувальний дросель 28.

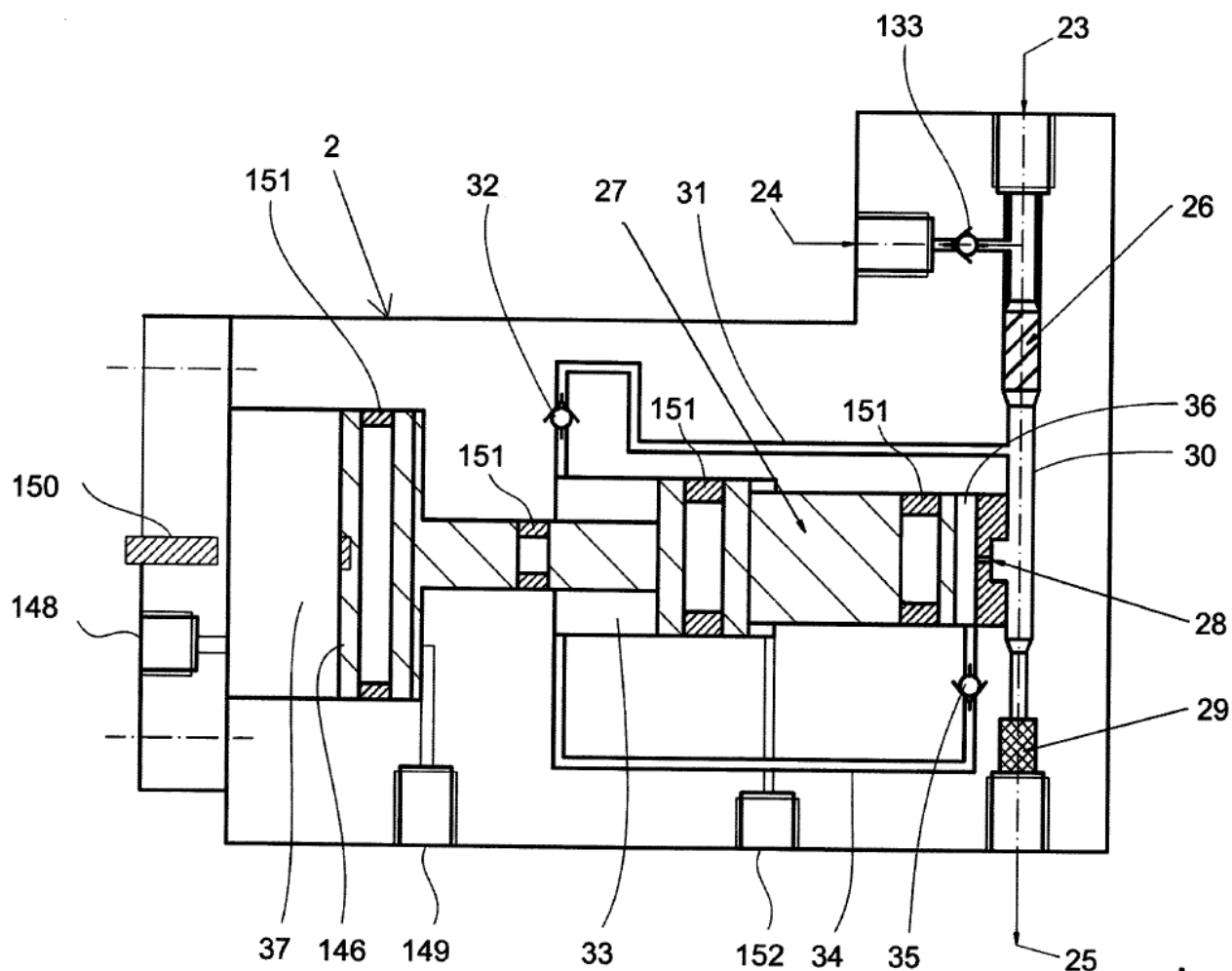


Рисунок 3.2 – Схема емульсійного пристрою

Поршень 27 виконаний рухомим та приводиться в дію гідравлічно через робочий циліндр 37. Його зворотно-поступальні переміщення забезпечують відбір води й дизельного палива з основного каналу 30 через відгалужений канал 31 та зворотний клапан 32 у першу насосну камеру 33. Звідти суміш переходить через з'єднувальний канал 34 та зворотний клапан 35 у другу насосну камеру 36. Під час чергового ходу поршня 27 обидві камери змінюють свій об'єм, і суміш спрямовується через дросель 28 назад до основного каналу 30. Дросель 28 має малий діаметр отвору (близько 0,2 мм,

можливий діапазон 0,15–0,25 мм), що забезпечує великий перепад тисків, який досягає 100 МПа і більше. За таких умов вода розбивається на мікрокраплі нанометричного діапазону, утворюючи високостабільну мікроемульсію «вода–дизельне паливо».

У конструкції можливе встановлення демпфера 29, який розміщується між дроселем 28 та вихідним отвором 25. Демпфер слугує для згладжування пульсацій тиску, що можуть передаватися від інжектора на поршень 27. Це покращує точність дозування й рівномірність емульгування.

Кількість води, яка надходить у пристрій через отвір 24, задається дозувальним насосом 17, керованим електронним блоком 22. Саме цей параметр визначає водну фракцію у готовій емульсії. Частота руху поршня 27 також регулюється пристроєм керування 22, що дозволяє змінювати продуктивність емульгувального модуля залежно від навантаження двигуна. Для контролю ходу поршня у конструкції передбачено датчик переміщення 150, який дає змогу точно стежити за обсягом емульсії, що проходить через дросель 28 у кожному циклі. Таким чином електронне керування забезпечує стабільність та повторюваність процесу емульгування.

Для зниження тертя та підвищення ресурсу контактні поверхні поршня 27 і циліндра 37 покриваються шаром CLD-покриття. Додатково поршень оснащено PTFE-ущільненнями 151, які забезпечують високу герметичність при мінімальних втратах на тертя. Невеликі витoki емульсії, що неминуче виникають при роботі ущільнень, відводяться через окремий канал 152. Цей канал сполучений із сепаратором води 21, у якому емульсія розділяється на дизельне паливо та воду. Дизельне паливо повертається до паливного бака двигуна, а вода – у водяний бак системи.

Таким чином усі елементи емульгувального пристрою – вхідні отвори 23 і 24, вихідний отвір 25, попередній емульгатор 26, поршень 27, дросель 28, демпфер 29, основний канал 30, відгалужений канал 31, клапани 32 і 35, камери 33 і 36, з'єднувальний канал 34, робочий циліндр 37, ущільнення 151

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

та канал витоку 152 – працюють узгоджено як єдина система. Завдяки цьому формується стабільна дрібнодисперсна водо-дизельна мікроемульсія, яка подається до інжектора 6 та забезпечує оптимальний процес згоряння у дизельному двигуні.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Мета дослідження полягає в аналітичному обґрунтуванні економічної доцільності використання емульгованого палива в двигуні.

У таблиці 4.1 приведені техніко-економічні показники двигуна 6ЧН 43/61 (МаК 6М43)

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні показники двигуна

Найменування	Позначення	Розмірність	Базовий двигун	Спроектований двигун
Потужність	N_e	кВт	5400	5400
Частота обертання	n	хв^{-1}	500	500
Діаметр циліндра, м	D	м	0,43	0,43
Хід поршня, м	S	м	0,61	0,61
Питома витрата палива	g_{ep}	кг/кВт·год	0,177	0,172
Механічний ккд	η_m	-	0,95	0,95
Питома витрата масла	g_m	кг/кВт·год	0,0022	0,0022
Ціна двигуна	Π	грн	9300000	11400000
Ціна палива	Π_{π}	грн/кг	60	60
Ціна масла	Π_m	грн/кг	50	50
Час роботи за рік	t	год	1000	1000
Число контрольних ремонтів	η	-	1	1
Сумарний коефіцієнт по капітальних ремонтах	ϵ_{min}	-	1,1	1,1
Коефіцієнт частини вартості роботи	b	-	0,05	0,05

Коефіцієнт використання потужності	K_{Π}	-	0,85	0,85
Коефіцієнт частини вартості капітального ремонту	$K_{к.р.}$	-	0,3	0,3
Ресурс двигуна до першого перебирання	$t_{пер}$	год	30000	30000
Ресурс двигуна до капітального ремонту	$t_{к.р.}$	год	100000	100000
Нормативний коефіцієнт порівняння економічної ефективності	E	-	0,15	0,15

Оцінювання економічної ефективності здійснюється відповідно до вимог методичних рекомендацій.

Зазначений підхід використовується для вирішення таких завдань:

1. Техніко-економічне обґрунтування вибору оптимальних варіантів виготовлення та впровадження нових технічних рішень.
2. Відображення показників економічності та ефективності у встановлених нормах і нормативних документах.
3. Розрахунок фактичного рівня ефективності застосування нової техніки в умовах експлуатації.

Розрахунок економічної ефективності

1) Річна продуктивність

$$N = K_{\Pi} \cdot N_e \cdot t, \text{ кВт*г за рік}$$

2) Термін служби

$$T = \frac{t_{кп}}{t}, \text{ рік}$$

3) Річні поточні витрати на паливо

$$Z_n = N \cdot \Pi_n \cdot g_e, \text{ грн}$$

4) Річні поточні витрати на масло

$$З_{\text{м}} = g_{\text{м}} \cdot N \cdot Ц_{\text{м}} \cdot 10^{-3}, \text{грн}$$

5) Річні витрати на поточний ремонт

$$З_{\text{н.р}} = \frac{b \cdot t \cdot Ц}{t_{\text{пер}}}, \text{грн}$$

6) Річні поточні витрати на капітальний ремонт

$$З_{\text{к.р}} = \frac{K_{\text{к.р}} \cdot t \cdot Ц}{t_{\text{к.р}} \cdot \varepsilon_{\text{min}}}, \text{грн}$$

7) Річний економічний ефект у споживача

$$U_1 = \underline{З_{\text{н}} + З_{\text{м}} + З_{\text{к.р}} + З_{\text{н.р}}}, \text{грн}$$

8) Річний економічний ефект у споживача від використання модернізованого двигуна.

$$E_{\kappa} = \left[Ц_{\delta} \cdot \frac{N_{\epsilon}}{N_{\delta}} \cdot \left(\frac{\frac{1}{T_{\delta}} + E_{\delta}}{\frac{1}{T_{\epsilon}} + E_{\epsilon}} \right) + \frac{U_1^{1\delta} - U_1^{\epsilon}}{\frac{1}{T_{\epsilon}} + E_{\epsilon}} \right] \cdot Ц_{\epsilon}, \text{грн}$$

$$\text{де } U_1^{1\delta} = \frac{N_{\epsilon}}{N_{\delta}} \cdot U_1^{\delta}$$

9) Час окупності модернізованого двигуна

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\Delta K}{\Delta S}, \text{років}$$

де ΔK – додаткові одноразові витрати на модернізацію двигуна,

ΔS – річна економія при експлуатації модернізованого двигуна

$$\Delta S = З_{\text{н}}^{\delta} - З_{\text{н}}^{\epsilon} + З_{\text{м}}^{\delta} - З_{\text{м}}^{\epsilon} + З_{\text{н.р}}^{\delta} - З_{\text{н.р}}^{\epsilon} + З_{\text{к.р}}^{\delta} - З_{\text{к.р}}^{\epsilon}, \text{грн}$$

Результати розрахунку економічної ефективності представлені в табл. 4.2.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку економічної ефективності

Найменування	Позначення	Розмірність	Базовий двигун	Спроектований двигун
Річна продуктивність	N	кВт·год/рік	4590000,0	4590000,0
Термін служби	T	рік	10,0	10,0
Річні поточні витрати на паливо	Z_p	грн	48745800,0	47368800,0
Річні поточні витрати на масло	Z_m	грн	504900,0	504900,0
Річні витрати на поточний ремонт	$Z_{п.р}$	грн	15500,0	19000,0
Річні витрати на капітальний ремонт	$Z_{к.р}$	грн	25363,6	31090,9
Річний економічний ефект у споживача	U_1	грн	49291563,6	47923790,9
	U_1^{16}	грн	49291563,6	-
Річний економічний ефект у споживача від використання спроектованого двигуна	E_k	грн	4212797,2	
Додаткові одноразові витрати на модернізацію двигуна	ΔK	грн	2100000,0	
Річна економія при експлуатації модернізованого двигуна	ΔS	грн	1367772,7	
Час окупності модернізованого двигуна	$T_{окуп}$	рік	1,54	
		місяць	18,42	

Річний економічний ефект спроектованого двигуна в порівнянні з базовим двигуном за рахунок використання емульсійного палива у розмірі 4212797,2 грн. Заміна базового двигуна окупиться приблизно за 18,5 місяців.

РОЗДІЛ 5

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Використання водопаливних емульсій (ВПЕ) у дизельних двигунах є одним із прогресивних напрямів зниження токсичних викидів, оптимізації процесу згоряння та покращення економічних показників суднових і стаціонарних енергетичних установок. Проте впровадження таких технологій потребує врахування додаткових факторів безпеки, пов'язаних зі специфікою емульсійного палива, високими тисками впорскування, наявністю води у складі робочої суміші та можливими змінами у роботі паливної системи. Тому питання охорони праці при експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті обладнання, що працює на ВПЕ, має першочергове значення.

Загальні вимоги охорони праці при роботі з водопаливними емульсіями

Забезпечення безпечних умов праці під час використання ВПЕ ґрунтується на низці нормативних документів, зокрема: Закону України «Про охорону праці», правил безпеки в енергетичних установках, міжнародних стандартів ISM Code, MARPOL, вимог Регістру судноплавства України, а також внутрішніх інструкцій підприємств. Оскільки водопаливна емульсія складається з дизельного палива та води, до неї застосовують вимоги щодо безпеки паливних систем, але з урахуванням додаткових ризиків — можливості розшарування, утворення корозійно-активних середовищ, зміни властивостей паливних насосів та форсунок [9].

Роботи з емульсіями дозволяються лише персоналу, який пройшов спеціальну підготовку, інструктаж та ознайомлений з особливостями використання ВПЕ. Працівники повинні мати засоби індивідуального захисту: антистатичний спецодяг, рукавиці, захисні окуляри, респіратор для роботи у замкнених приміщеннях. Забороняється використовувати емульсію у

					<i>KPM.142.6221м.25.08.00.ПЗ</i>	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		56

несправних системах, а також змішувати її з іншими видами палива вручну без відповідного устаткування.

Небезпечні виробничі фактори при роботі з ВПЕ

Хімічні та фізичні властивості водопаливної емульсії

ВПЕ не є токсичнішою за дизельне паливо, але вона змінює поведінку паливної системи. Присутність води сприяє кавітаційним явищам, підвищує ризик корозії металів, що контактують з паливом. Розшарування емульсії у резервуарах може призвести до подачі у двигун некондиційного палива, що здатне викликати детонацію, пропуски займання або гідроудари в елементах високого тиску.

Небезпека високого тиску у системах упорскування

Системи формування емульсій високого тиску (до 100–150 МПа), що містять емульгувальні дроселі, поршневі насоси та рециркуляційні контури, становлять підвищену небезпеку. Прорив високотискової магістралі може спричинити:

- травмування струменем палива («ін'єкційна травма»),
- локальні пожежі,
- гідравлічний удар у системі,
- швидкий вихід з ладу двигуна.

Персонал повинен підтримувати захисну дистанцію та працювати лише зі справними екранами та теплоізоляцією.

Корозійні пошкодження обладнання

Додавання води створює умови для появи:

- корозії насосів низького тиску,
- корозійного зношення елементів Common Rail,
- прискореного руйнування форсункових голок,
- корозії зливних та рециркуляційних трубопроводів.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Для запобігання цьому застосовують антикорозійні матеріали, спеціальні покриття та якісні ущільнення.

Вимоги до організації робіт з використання ВПЕ

Усі роботи із системами приготування, зберігання та подачі ВПЕ необхідно проводити згідно з технологічним регламентом.

Підготовка обладнання до роботи

Перед введенням системи в експлуатацію необхідно перевірити:

- цілісність магістралей високого тиску;
- відсутність підтікання у з'єднаннях;
- наявність заземлення та антистатичних заходів;
- справність сепараторів води та зворотних клапанів;
- надійність роботи дозувальних насосів води.

При першому запуску та після ремонту виконують контрольне промивання системи дизельним паливом.

Підготовка води та змішування

Вода, що використовується для формування емульсії, повинна відповідати технічним вимогам:

- відсутність солей та мінеральних домішок;
- мінімальна електропровідність;
- відсутність механічних частинок.

Використання некондиційної води створює небезпеку утворення накипу, корозії, електрохімічних реакцій та зниження ефективності згоряння.

Контроль якості емульсії

До обов'язків персоналу входить:

- регулярний відбір проб з магістралей;
- перевірка стабільності емульсії;
- вимірювання співвідношення вода/паливо;
- моніторинг температури та тиску в системі.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Якщо емульсія розшарувалася, її не можна використовувати до повторної обробки в емульгувальному пристрої.

Вимоги охорони праці під час експлуатації обладнання

Робота двигуна на емульсії

Під час роботи двигуна забороняється:

- відкривати елементи системи високого тиску;
- відбирати проби без спеціальних пристроїв;
- перебувати в зоні можливого прориву паливного струменя;
- проводити ремонтні операції при працюючому двигуні.

Необхідно забезпечити безперервний контроль:

- тиску у магістралях,
- температури охолоджувальної рідини,
- частоти обертання,
- роботи сепараторів та зливних клапанів.

Зміни параметрів емульсії повинні відбуватися плавно, без різких переходів, щоб уникнути перепадів тиску та нестабільності факелу впорскування.

Пожежна безпека

Незважаючи на наявність води, емульсія зберігає здатність до займання.

Потрібно передбачити:

- стаціонарні системи пожежогасіння CO₂ або порошкові установки;
- переносні вогнегасники типу «В»;
- наявність пожежних кранів і гідрантів;
- справність сигналізації та пожежних датчиків.

Електрообладнання в зоні роботи з емульсією має відповідати класу захисту від вибухонебезпечних середовищ.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Захист персоналу від факторів високого тиску

Струмінь палива під тиском понад 100 МПа здатний проникнути через шкіру. Тому:

- забороняється перевіряти герметичність дотиком,
- персонал повинен працювати у захисних щитках та рукавицях,
- усі магістралі повинні мати броньовані екрани,
- у місцях можливого витоку встановлюються захисні кожухи.

Вимоги охорони праці під час технічного обслуговування

Відключення та розрядження системи

Перед будь-яким обслуговуванням необхідно:

- повністю знизити тиск у системах високого тиску;
- перекрити подачу води та палива;
- здійснити промивання чистим дизельним паливом;
- заблокувати двигун від випадкового запуску.

Тільки після повної відсутності тиску дозволено від'єднувати трубопроводи.

Огляд емульгуювальних пристроїв

Персонал повинен проводити:

- перевірку дроселів та клапанів;
- контроль зношення поршневих поверхонь;
- огляд ущільнень та зворотних клапанів;
- перевірку датчиків переміщення та тиску.

При виявленні ознак корозії деталі замінюють негайно.

Технічне обслуговування баків та трубопроводів

Потрібно регулярно виконувати:

- очищення баків від осаду;
- контроль цілісності антикорозійного покриття;
- перевірку стану сепараторів води;
- заміну фільтрів води та палива.

					<i>КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ</i>	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Заборонено використання металевих щіток, що можуть іскрити.

Вимоги охорони праці під час ремонту

Під час ремонту діють такі заходи:

- приміщення має бути добре провітрюванням;
- ремонт виконується лише при повністю зупиненому двигуні;
- використовується виключно інструмент з іскробезпечними накладками;
- водопаливна система повинна бути звільнена від залишків емульсії.

Малярські, зварювальні та нагрівальні роботи дозволяються лише після повного видалення палива.

Екологічна безпека та утилізація відходів

Водопаливна емульсія під час зберігання може розшаровуватися, утворюючи водний шар, який містить залишки дизпалива. Заборонено зливати такі суміші у каналізацію або акваторію.

Відходи повинні проходити:

- сепарацію у відстійниках,
- очищення через нафтоводяні сепаратори,
- передачу ліцензованим організаціям для утилізації.

При розливі емульсії застосовують сорбенти та спеціальні набори для ліквідації паливних забруднень.

Організаційні заходи охорони праці

До них належать:

- навчання персоналу роботі з ВПЕ;
- регулярні інструктажі та перевірки знань;
- ведення журналу обліку перевірок системи;
- наявність схем трубопроводів та посібників на робочому місці;
- контроль за технічним станом обладнання;

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- систематичний аудит безпеки.

Усі роботи повинні проводитися відповідно до інструкцій, затверджених керівництвом підприємства.

Висновки

Забезпечення вимог охорони праці при використанні водопаливних емульсій має комплексний характер і включає технічні, організаційні, експлуатаційні та екологічні заходи. Виконання цих вимог дозволяє забезпечити:

- безпечну роботу персоналу,
- довговічність двигуна та паливної апаратури,
- мінімізацію ризиків аварій та пожеж,
- відповідність екологічним стандартам MARPOL та міжнародним нормам,
- ефективність та стабільність роботи установок, що використовують ВПЕ.

Комплексний підхід до охорони праці є ключовою умовою успішного впровадження технологій водопаливних емульсій у суднових та промислових двигунах.

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання даної роботи було проведено дослідження можливостей підвищення ефективності та екологічності суднового дизельного двигуна 6ЧН 43/61, що встановлений на вантажному судні MORGENSTOND I, шляхом застосування емульсійного палива типу дизель-вода. Виконані розрахунки робочого процесу, аналіз конструкції двигуна, вивчення сучасних тенденцій у галузі суднового енергетичного машинобудування та техніко-економічна оцінка дали змогу комплексно оцінити доцільність упровадження цієї технології.

Отримані результати підтвердили, що конструкція досліджуваного двигуна, зокрема особливості будови блок-картера, поршневої групи, головки циліндра та системи паливоподачі, забезпечує необхідний запас міцності й термостійкості для впровадження водопаливної емульсії без внесення суттєвих змін у базові вузли. Проведений огляд сучасних способів покращення показників роботи суднових двигунів показав, що серед широкого спектра технологічних рішень — від вдосконалення наддуву до переходу на альтернативні види палива — саме використання емульсійних палив є одним із найпростіших та водночас найбільш ефективних шляхів зниження токсичних викидів без значних витрат і перебудови енергетичної установки.

Розрахунки робочого процесу продемонстрували, що введення води до складу палива забезпечує зниження температур згоряння, що природним чином зменшує утворення оксидів азоту та сприяє покращенню теплового стану деталей циліндро-поршневої групи. Використання емульсії з часткою води 15% дало змогу знизити максимальну температуру циклу, скоротити кількість NO_x , зменшити димність та забезпечити економію дизельного палива. При цьому ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна залишився на

					КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

рівні базових значень, що свідчить про стабільність і надійність процесу горіння.

Застосування механічних систем приготування емульсії безпосередньо перед форсункою підтвердило свою ефективність з точки зору керованості, можливості динамічної зміни водної фракції та мінімізації ризиків, пов'язаних із розшаруванням палива. Такий технічний підхід дозволяє інтегрувати систему в існуючу паливну апаратуру з мінімальними змінами, що робить технологію особливо привабливою для суднової галузі. Окрім технічних переваг, отримано також економічний ефект у вигляді зменшення витрат палива та потенційного скорочення витрат на очищення вихлопних газів, що є актуальним у зв'язку з посиленням міжнародних екологічних вимог.

Враховано й питання охорони праці, оскільки робота з системами високого тиску, водопаливними сумішами та обладнанням для емульгування потребує дотримання спеціальних заходів безпеки. У роботі визначено основні ризики та сформульовано рекомендації щодо безпечної експлуатації обладнання, що забезпечує зниження професійних небезпек під час обслуговування двигуна.

					<i>КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ</i>	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Significant ships of 2006. The Royal Institution of Naval Architects, 2006. pp. 93 - 94.
2. MaK M43. Project guide. Propulsion, 2008. 112 p.
3. Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, 2004. 914 p.
4. Наливайко В. С., Тимошевський Б. Г., Ткаченко С. Г. Суднові двигуни внутрішнього згоряння : підруч. Миколаїв : Вид-во Торубара В.В., 2015. 332 с.
5. Kees Kuiken. Diesel Engines for ship propulsion and power plants. Target Global Energy Training. Onnen, The Netherlands. July 2008.
6. Судновий механік: Довідник у 3 томах / за редакцією А. А. Фока. Одеса.: Фенікс, 2008. Т. 1. 1036 с.
7. Latarche M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Tenth edition. Elsevier Ltd, 2021. 930 p.
8. Woodyard D. Marine diesel engines and gas turbines. 9th ed. Oxford, 2009. 896 p.
9. ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.

					<i>КРМ.142.6221м.25.08.00.ПЗ</i>	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		