

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
ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ БЛОЧНОГО
БАГАТОСЕКЦІЙНОГО ПАЛИВНОГО НАСОСУ ВИСОКОГО ТИСКУ
СУДНОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДВИГУНА

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Освітня програма – Двигуни внутрішнього згоряння

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи



Аркадій ПРОСКУРІН

Здобувач освіти



Михайло ЛЕВИЦЬКИЙ

Миколаїв 2025

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Машинобудівний навчально-науковий
Кафедра Двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації
Ступінь Магістр
Спеціальність 142 Енергетичне машинобудування
(шифр і назва)
Освітня програма Двигуни внутрішнього згорання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Олексій ГОГОРЕНКО

« » 20 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

Левицький Михайло Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення конструкції блочного багатосекційного паливного насосу високого тиску суднового середньообертового двигуна

2. Керівник роботи к.т.н., доц. Проскурін А.Ю.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “___” _____ 20__ року № _____

4. Вихідні дані до роботи Двигун – 6ЧН 33/38; паливо – дизельне; потужність
двигуна – 2650 кВт, частота обертання колінчастого валу – 720 хв⁻¹

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Особливості застосування двигуна 6ЧН 33/38 на контейнеровозі MOL CREATION; Сучасні способи покращення роботи паливної системи судових двигунів; Вдосконалення конструкції ПНВТ двигуна 6ЧН 33/38; Забезпечення вимог охорони праці; Економічне обґрунтування

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Загальний вид контейнеровозу MOL CREATION; Поперечний переріз двигуна 6ЧН
33/38; Конструкція ПНВТ; Схема роботи плунжерів; Елементи ПНВТ

7. Консультанти розділів роботи

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

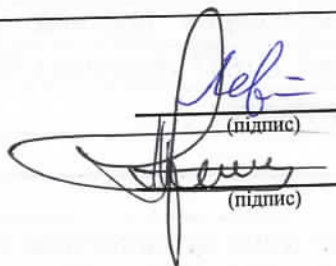
8. Дата видачі завдання _____

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)

Михайло ЛЕВИЦЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

Аркадій ПРОСКУРІН
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі розроблений комплекс заходів щодо покращення роботи паливної системи двигуна шляхом вдосконалення конструкції ПНВТ. Розглянуто економічне обґрунтування. Наведені заходи щодо забезпечення охорони праці.

Кваліфікаційна робота виконана українською мовою на 63 сторінках розрахунково-пояснювальної записки. Використано 9 джерел. Графічна частина представлена на 5 кресленнях формату А1.

Ключові слова: контейнеровоз, дизель-генератор, паливний насос, плунжер.

The qualification work presents a set of measures to improve the performance of the engine fuel system by improving the design of the high-pressure fuel pump. The economic justification was considered. Measures to ensure occupational safety are also provided.

The qualification work is executed in Ukrainian language on 63 pages of explanatory note. 9 sources are used. The graphic part is presented on 5 drawings of format A1.

Key words: container ship, diesel generator, fuel pump, plunger.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						2
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Особливості застосування двигуна 6ЧН 33/38 на контейнеровозі MOL CREATION.....	5
Розділ 2. Сучасні способи покращення роботи паливної системи суднових двигунів.....	16
Розділ 3. Вдосконалення конструкції ПНВТ двигуна 6ЧН 33/38.....	38
Розділ 4. Економічне обґрунтування.....	52
Розділ 5. Забезпечення вимог охорони праці.....	56
Висновки.....	61
Список використаної літератури.....	63
Додаток А. Загальний вид контейнеровозу MOL CREATION.....	64
Додаток Б. Поперечний переріз двигуна 6ЧН 33/38.....	65
Додаток В. Конструкція ПНВТ.....	66
Додаток Г. Схема роботи плунжерів.....	67
Додаток Д. Елементи ПНВТ.....	68

ВСТУП

Актуальність досліджень у напрямку вдосконалення блочного багатосекційного паливного насоса високого тиску суднового середньообертового двигуна визначається зростанням вимог до економічності, екологічності та надійності сучасних суднових енергетичних установок. Саме цей вузол забезпечує точність дозування та стабільність упорскування палива, що безпосередньо впливає на паливну ефективність, рівень викидів NO_x і димності, рівномірність роботи циліндрів та ресурс двигуна. Посилення міжнародних екологічних норм, робота на низькосірчистих і альтернативних видах палива, зростання навантажень та тривалості міжсервісних інтервалів потребують удосконалення конструкції насоса, покращення його гідравлічних характеристик, зносостійкості та керованості. Тому дослідження оптимізації конструктивних рішень, матеріалів і параметрів роботи блочного насоса є необхідною умовою підвищення ефективності та надійності суднових двигунів нового покоління.

Мета даної роботи – покращення ефективності роботи паливної системи.

Задачі що вирішуються у роботі:

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

Об'єкт дослідження – ПНВТ.

Предмет дослідження – параметри роботи ПНВТ.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						4
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА 6ЧН 33/38 НА КОНТЕЙНЕРОВОЗИ MOL CREATION

Опис контейнеровоза MOL CREATION

MOL CREATION (рис. 1.1 – 1.2, табл. 1.1) є головним судном нової серії з шести, розроблених Mitsubishi Heavy Industries, і описується як таке, що має характеристики «високої економічної ефективності», «екологічно дружніх технологій» та «безпечного судна». Як частина постійної уваги власника до цих особливостей його діяльності, усі ці судна будуть оснащені найновішими технологіями, що впливають на ці області експлуатаційних характеристик [1].

Зокрема, розуміється, що це перші контейнеровози, виготовлені з використанням абсолютно нового високоміцного сталевих прокату класу E (YP460MPa – 47 кгс/мм²). Цей матеріал був спеціально розроблений Mitsubishi Heavy Industries у співпраці з Nippon Steel Corp для використання в поздовжніх силових елементах корпусу великих контейнеровозів, щоб забезпечити цілісність корпусу, особливо в тих місцях, де зазвичай застосовуються товсті сталеві плити.

Товсті плити мають тенденцію втрачати опір крихкому руйнуванню, і специфікація цієї нової сталі класу E спрямована на покращення цього опору та забезпечення підвищеної міцності.

Було також здійснено комплексні заходи для мінімізації ризику розливів нафти, включаючи ті, що спричинені зіткненнями або аваріями, і MOL Creation продовжує використовувати схему, розроблену для попередніх суден, спроектованих MHI/MOL. Тут перебірки між трюмами виконані подвійностінними, причому простір між обшивками використовується як паливні танки для нафти.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						5
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд судна MOL CREATION

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		6

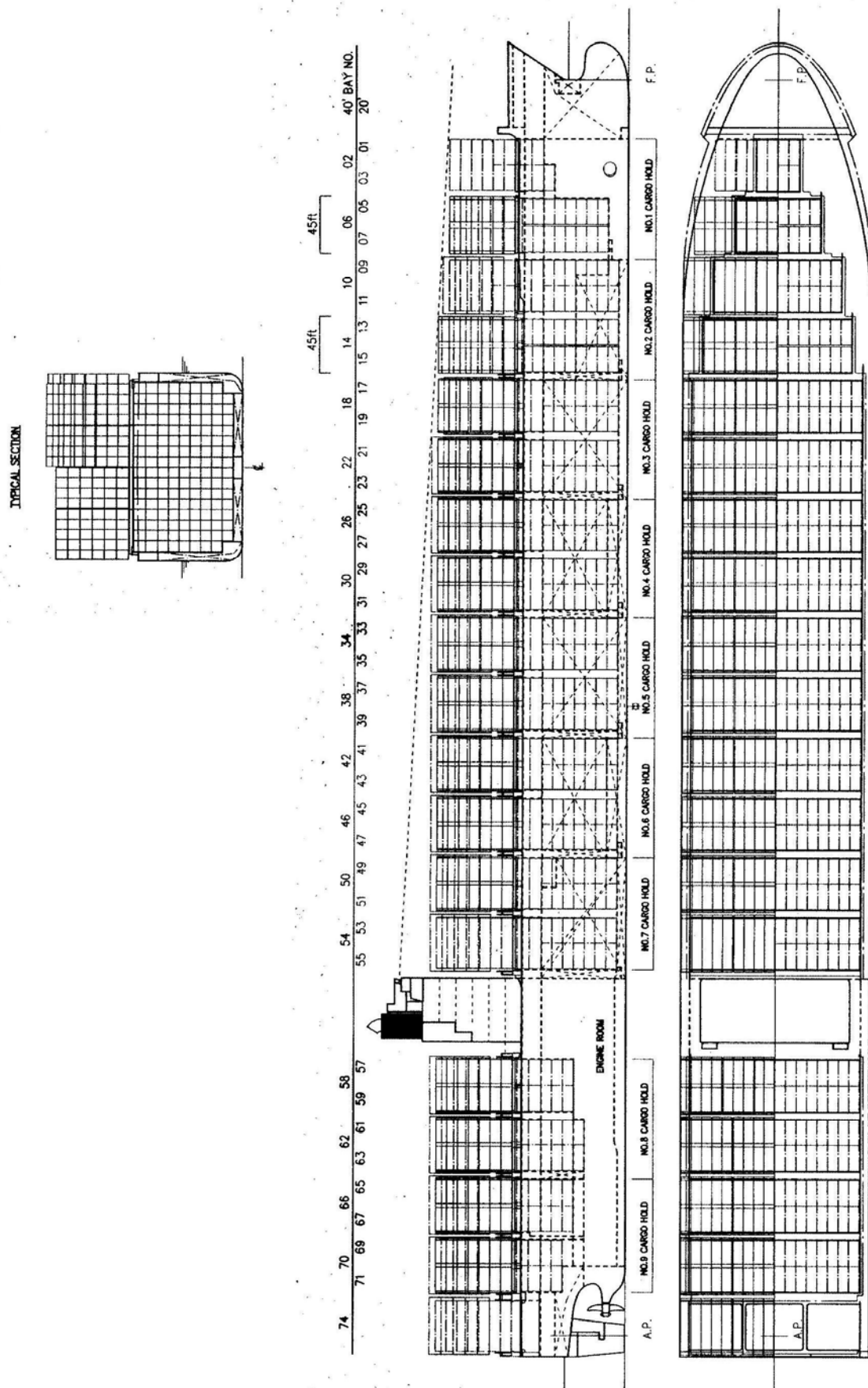


Рисунок 1.2 – Судно MOL CREATION

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

KPM.142.6221м.25.12.00.ПЗ

Аркуш

7

Таблиця 1.1 – Головні характеристики судна

Параметр	Значення
Довжина максимальна, м	316,00
Довжина між перпендикулярами, м	302,00
Висота до палуби, м	25,00
Ширина найбільша, м	45,60
Проектна осадка, м	13,00
Максимальна осадка, м	14,50
Дедвейт, т	90700
Швидкість судна, вуз	25.25
Об'єм баластних цистерн, м ³	27600
Об'єм цистерн важкого палива, м ³	8500
Об'єм цистерн дизельного палива, м ³	490

Цей новий проєкт контейнеровоза має дев'ять вантажних трюмів, сім у носовій частині та два у кормовій від надбудови, що зведена над машинним відділенням. Місткість контейнерів у трюмах становить 3494 TEU, укладених у дев'ять ярусів по 16 рядів, а 4616 TEU розміщуються на палубі максимум у сім ярусів / 18 рядів. Кількість гнізд для рефрижераторних контейнерів становить 630. Сел-гайди для контейнерів FEU встановлені в усіх трюмах, окрім кормових секцій трюмів №1 і №2, де вони розраховані лише на TEU. Лешингові містки на палубі простягаються від трюму №3 до трюму №9, а також над кормовою швартовною палубою.

Суднобудівний завод MHI Kobe виготовив головний двигун Sulzer RT-flex96C з 11 циліндрами. Він призначений для того, щоб електронно підтримувати оптимальне упорскування палива на всіх режимах роботи двигуна, а також для зниження витрати палива та контролю викидів NO_x і сажі (PM) більш ефективно, при цьому працюючи на відносно високій сервісній швидкості 25,25 вузла. Максимальний безперервний режим роботи головного

					KPM.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

двигуна становить 62920 кВт при 102 об/хв, і зазначена вище швидкість досягається при роботі на 85% повної потужності.

Встановлено гребний гвинт фіксованого кроку (FP), робота якого покращена завдяки використанню насадки Propeller Boss Cap Fin (PBCF), розробленої MOL. Специфікація двигуна включає систему Mitsubishi ECL (електронно керованого змашувального масла), яка забезпечує краще використання і суттєве зниження витрати циліндрового масла.

Встановлений турбогенератор потужністю 1500 кВт, а також чотири дизельні генераторні установки Yanmar по 2500 кВт. Kawasaki поставила носовий підрулюючий пристрій потужністю 2700 кВт.

Опис двигуна 6ЧН 33/38 (YANMAR 6N330LW)

YANMAR 6N330LW (рис. 1.3, 1.4) [2] – двигуни цієї серії, що вирізняються високою надійністю, економічністю та здатністю працювати в тяжких умовах, використовуються як основні або резервні силові установки для генераторів великої потужності та можуть експлуатуватися як на морських судах у ролі допоміжних двигунів, так і в стаціонарних дизель-генераторних комплексах. [2].

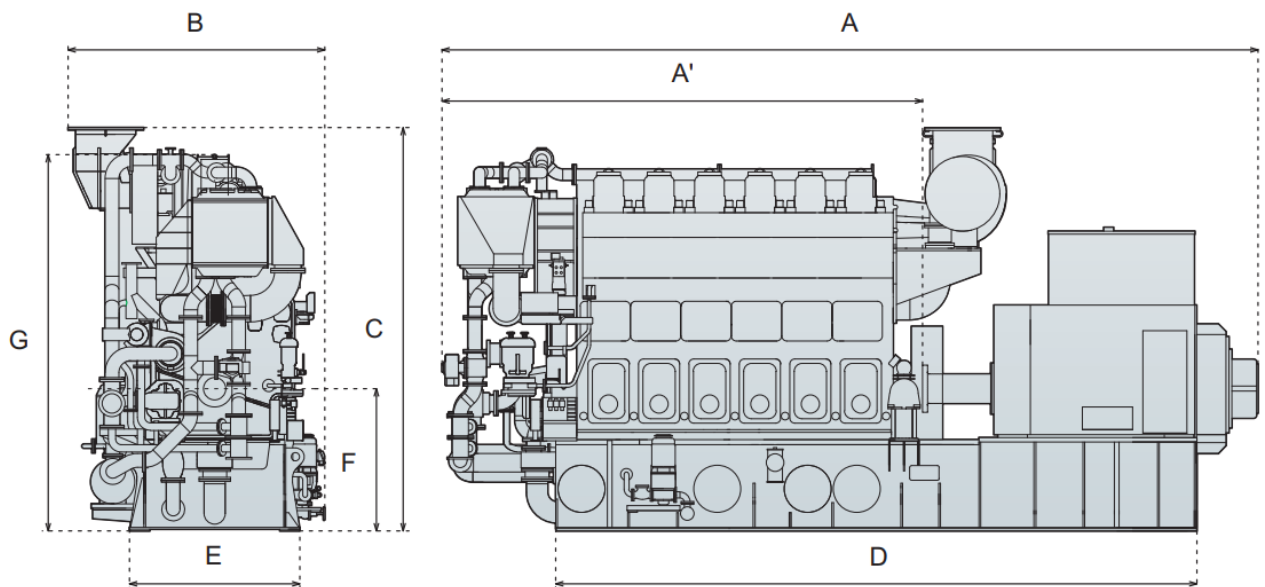


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд дизель-генератора YANMAR 6N330LW

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		9

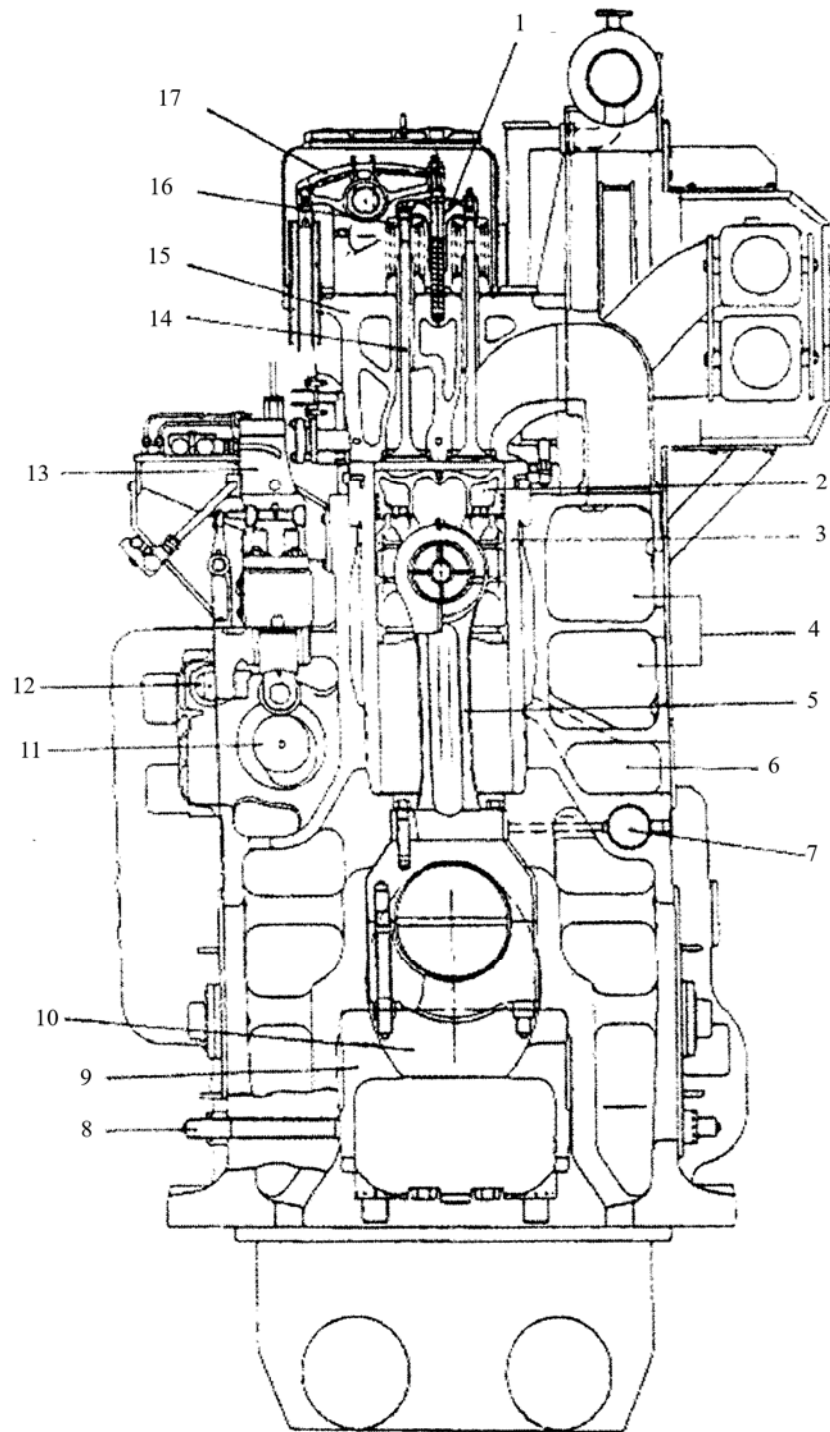


Рисунок 1.4 – Поперечний перетин двигуна 6ЧН 33/38:

1 – перемичка клапана; 2 – поршень; 3 – втулка робочого циліндра; 4 – камера наддувного повітря; 5 – шатун; 6 – основний контур охолоджувальної води; 7 – основний масляний канал; 8 – боковий болт; 9 – кришка корінного підшипника; 10 – колінчастий вал; 11 – розподільний вал; 12 – маятниковий важіль; 13 – паливний насос; 14 – клапан; 15 – кришка циліндра; 16 – обертач клапана; 17 – коромисло клапана

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ

Аркуш

10

Основні характеристики двигуна 6ЧН 33/38:

Ефективна потужність, кВт (номінальна)	2650
Частота обертання колінчатого вала, хв ⁻¹	720
Діаметр циліндра/хід поршня, мм	330/380
Середня швидкість поршня, м/с	9,1
Число циліндрів, од	6
Середній ефективний тиск, МПа	1,93
Висота двигуна, мм	4111
Ширина двигуна, мм	2622
Довжина двигуна, мм	7651

Блок циліндрів. Оскільки конструкція має вигляд масляного картера та підвісної металевої структури, виготовленої з чавуну, блок циліндрів виконано у вигляді коробчатого типу.

Блок циліндрів утворює камеру наддувного повітря, основний канал охолоджувальної води та канал мастильного масла, а також містить у собі корпус розподільного вала, що дозволяє мінімізувати кількість зовнішніх трубопроводів.

Колінчастий вал, корінні підшипники та вкладиші шатунних шийок. Колінчастий вал виготовлений куванням із вуглецевої сталі, причому діаметри шатунної та корінної шийок збільшені; вал піддано гартуванню та поліруванню.

Його конструкція дозволяє здійснювати знімання потужності також із переднього кінця.

Корпус корінного підшипника закріплено на блоці циліндрів двома установочними болтами та двома боковими стяжними болтами.

Як корінні підшипники, так і підшипники шатунних шийок використовують тришарові вкладиші типу Kelmet.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Поршень (рис. 1.5) виконаний за моноблочною схемою та виготовлений із високоміцного (ковкого) чавуну.

Поршневі кільця складаються з трьох (хромованих) компресійних кілець, включно з газонепроникним кільцем, та одного маслознімного кільця (типу спірального розширювача).

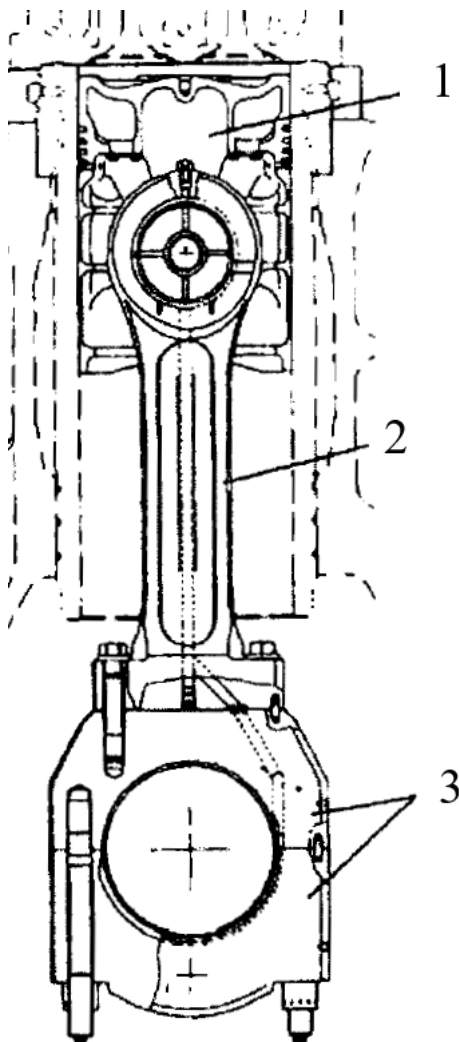


Рисунок 1.5 – Поршень з шатуном у зборі:

1 – поршень; 2 – шатун; 3 – нижня частина шатуна

Шатун виготовлений куванням із вуглецевої сталі та має конструкцію горизонтального трисекційного поділу.

Велика головка шатуна має плоску шліцьову (зазубрену) сполучну поверхню. Мала головка оснащена втулкою з олов'яної бронзи з опорною металевою основою.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		12

Втулка циліндра (рис. 1.6) виготовлена зі спеціального чавуну, а її внутрішня поверхня оброблена методом прецизійного хонінгування.

Верхня посадкова частина гільзи виконана з комірком (комірцевою конструкцією) для кращого охолодження.

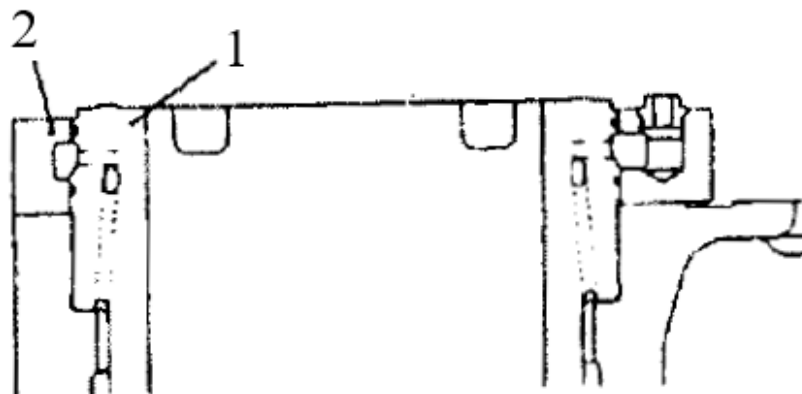


Рисунок 1.6 – Втулка робочого циліндра:

1 – втулка; 2 - сорочка

Кришка циліндра. Болтів кріплення кришки циліндра (рис. 1.7) – чотири.

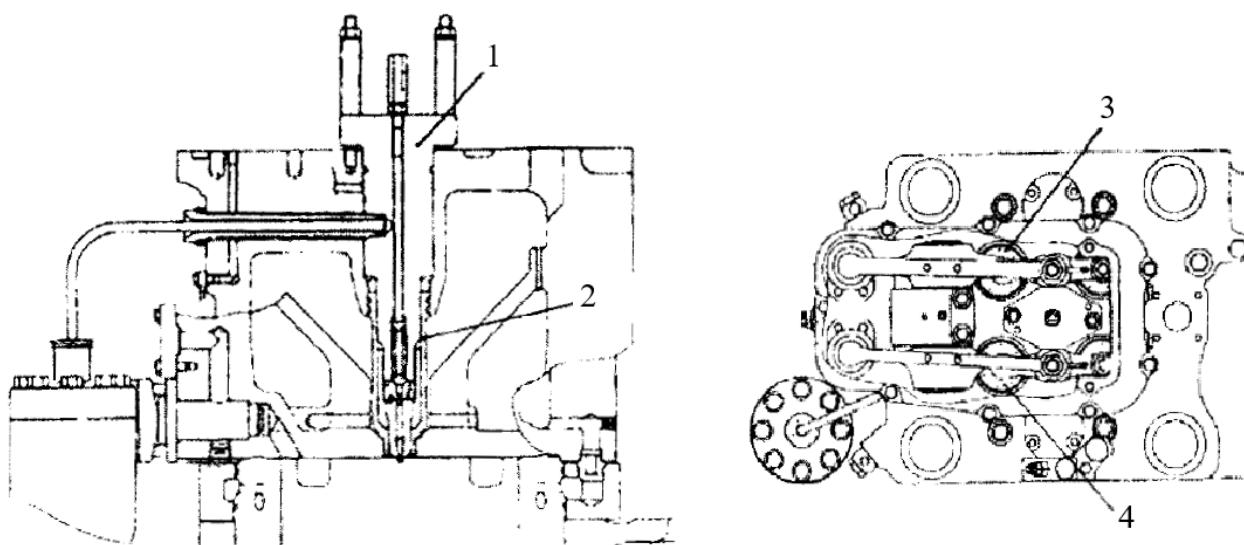


Рисунок 1.7 – Кришка циліндра:

1 – форсунка; 2 – проставка; 3 – випускний клапан; 4 – впускний клапан

Клапани для впуску та випуску розташовані тандемно, і обидва – впускний та випускний канали – розміщені з необслуговуваного боку. Поверхня камери згоряння має конструкцію зі спеціальними отворами, просвердленими між впускними та випускними клапанами, щоб забезпечити надходження охолоджувальної води до центральної частини й підвищити ефективність охолодження. Отвір під установку паливної форсунки виконано за гільзовим типом.

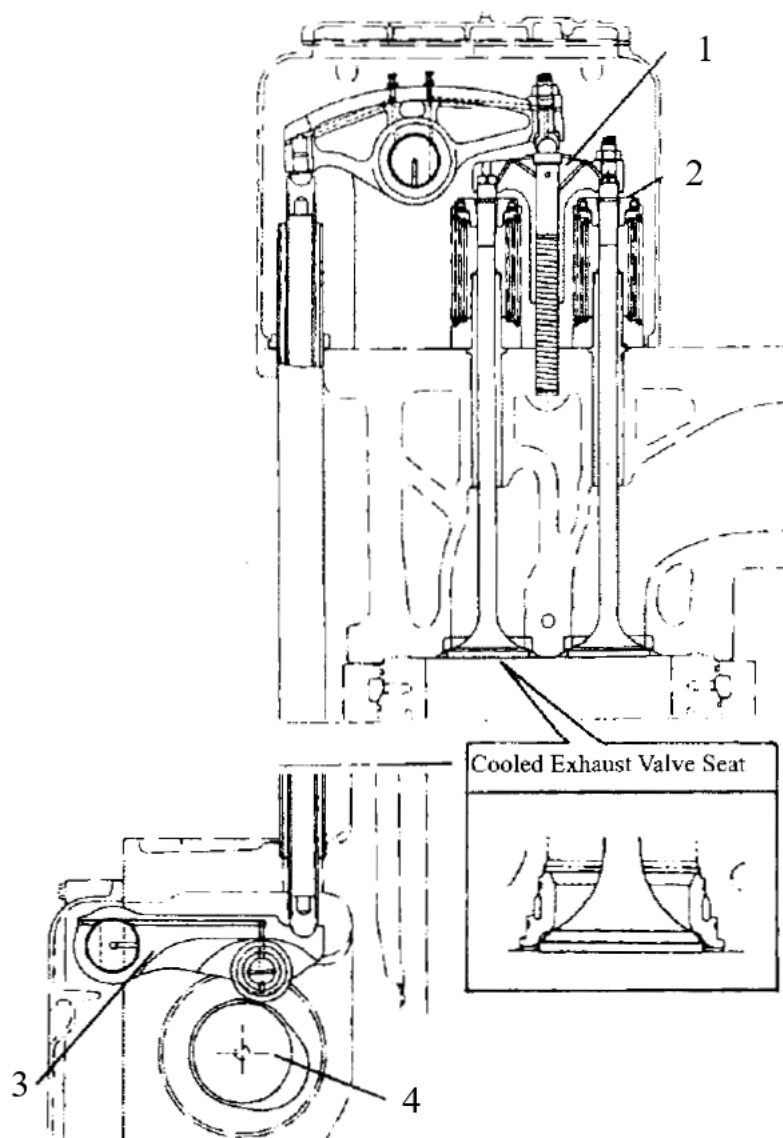


Рисунок 1.8 – Газорозподільний механізм:

- 1 – перемичка клапана; 2 – обертач клапана; 3 – маятниковий важіль;
4 – розподільчий вал

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ

Аркуш

14

Система охолодження. Прийнято дволінійну систему охолодження: одна лінія — для охолодження циліндрів і кришок циліндрів, інша — для теплообмінників (масляного охолодника, повітряного охолодника та охолодника прісної води).

Лінія охолодження двигуна оснащена автоматичним терморегулювальним клапаном для стабільного охолодження при високих температурах.

Система мащення. Усередині масляного картера двигуна передбачений піддон, який сумісно працює з установленим у корпусі судна допоміжним резервуаром (мокрый картер) згідно зі стандартною комплектацією.

За окремим замовленням може бути встановлений піддон, змонтований на корпусі судна (сухий картер).

Зона коромисел клапанів і турбокомпресор (серії МЕТ) сконструйовані таким чином, щоб змащуватися маслом із системи мащення двигуна.

					<i>КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Паливна система суднового двигуна внутрішнього згоряння є однією з найважливіших функціональних систем енергетичної установки, оскільки саме вона забезпечує подачу палива в циліндри в необхідній кількості, у визначений момент часу та з відповідними параметрами тиску і розпилення. Від якості роботи паливної системи безпосередньо залежать ефективність робочого процесу, паливна економічність, рівень токсичності відпрацьованих газів, теплове та механічне навантаження деталей, а також надійність і ресурс суднового двигуна в цілому. У сучасних умовах експлуатації суден, які характеризуються зростанням вартості палива, жорстким регулюванням викидів відповідно до вимог MARPOL Annex VI та необхідністю підвищення конкурентоспроможності морського транспорту, вдосконалення паливних систем суднових двигунів є одним із пріоритетних напрямів розвитку суднової енергетики.

Традиційні паливні системи суднових дизельних двигунів, побудовані на основі механічних паливних насосів високого тиску з кулачковим приводом, упродовж тривалого часу забезпечували достатній рівень надійності та простоти експлуатації. Проте такі системи мають обмежені можливості щодо гнучкого регулювання параметрів упорскування палива, оскільки тиск упорскування, момент початку подачі та тривалість упорскування жорстко пов'язані з частотою обертання колінчастого вала та профілем кулачків паливного насоса. У результаті оптимізація процесу згоряння можлива лише в обмеженому діапазоні режимів, тоді як на перехідних та часткових навантаженнях погіршуються економічні й екологічні показники двигуна.

					<i>KPM.142.6221m.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Одним із найефективніших і найбільш прогресивних сучасних способів покращення роботи паливної системи суднових двигунів внутрішнього згоряння є впровадження *системи упорскування палива типу Common Rail*. Дана система принципово відрізняється від традиційних механічних паливних систем тим, що процес створення високого тиску палива та процес його безпосереднього впорскування в циліндр розділені в часі та функціонально. Це дозволяє значно розширити можливості керування параметрами упорскування та оптимізувати робочий процес двигуна в широкому діапазоні навантажень і частот обертання.

У традиційних паливних системах суднових дизельних двигунів тиск упорскування безпосередньо залежить від швидкості обертання колінчастого вала та конструкції паливного насоса високого тиску. Такий зв'язок обмежує можливості регулювання процесу згоряння, особливо на часткових навантаженнях і перехідних режимах роботи. У системі Common Rail високий тиск палива створюється насосом високого тиску та акумулюється в спеціальній паливній магістралі — паливній рампі, яка виконує функцію гідравлічного акумулятора. Тиск у рампі підтримується на заданому рівні незалежно від моменту впорскування та режиму роботи двигуна, що забезпечує стабільні умови подачі палива до форсунок.

Ключовою перевагою системи Common Rail є можливість незалежного керування тиском упорскування, моментом початку подачі палива, тривалістю та кількістю окремих фаз упорскування. Керування здійснюється електронним блоком управління, який обробляє сигнали від численних датчиків, зокрема датчиків частоти обертання, навантаження, тиску наддуву, температури робочих середовищ та параметрів палива. На основі цих даних блок керування формує оптимальні сигнали керування форсунками, забезпечуючи адаптацію процесу впорскування до поточних умов роботи двигуна.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Застосування системи Common Rail дозволяє реалізувати багатофазне упорскування палива, що є одним із найважливіших чинників покращення процесу згоряння. Попереднє упорскування невеликої кількості палива перед основною фазою сприяє підвищенню температури та тиску в камері згоряння, що зменшує затримку займання та забезпечує більш плавний перебіг згоряння основної порції палива. У результаті знижується швидкість наростання тиску в циліндрі, зменшується жорсткість роботи двигуна, рівень шуму та динамічні навантаження на кривошипно-шатунний механізм.

Основна фаза упорскування в системі Common Rail забезпечує реалізацію необхідної потужності двигуна з високою точністю дозування палива. Додаткові фази упорскування можуть використовуватися для корекції процесу згоряння, зниження токсичності відпрацьованих газів або для підтримання температурного режиму камери згоряння. Такий підхід дозволяє ефективно керувати процесом згоряння в широкому діапазоні режимів роботи суднового двигуна, включаючи часткові навантаження, які є характерними для експлуатації суден у реальних умовах.

Важливою перевагою системи Common Rail є можливість забезпечення високого тиску упорскування навіть на малих частотах обертання колінчастого вала. Це особливо актуально для суднових середньо- та малообертових двигунів, які значну частину часу працюють у режимах часткового навантаження. Високий тиск упорскування сприяє інтенсивному розпиленню палива, формуванню дрібнодисперсного паливного факела та рівномірному сумішоутворенню, що позитивно впливає на повноту згоряння та знижує питомі витрати палива.

Застосування системи Common Rail також суттєво впливає на екологічні показники суднових двигунів. Оптимізація процесу згоряння дозволяє зменшити максимальні температури циклу, що сприяє зниженню утворення оксидів азоту. Одночасно покращення розпилення та сумішоутворення зменшує кількість продуктів неповного згоряння, зокрема сажі та незгорілих

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вуглеводнів. Це є особливо важливим у контексті виконання міжнародних екологічних норм та стандартів, що регламентують викиди суднових двигунів.

Ще однією суттєвою перевагою системи Common Rail є підвищення надійності та ресурсу паливної апаратури. Стабільність тиску в паливній рампі та зменшення пульсацій у паливних магістралях знижують гідравлічні навантаження на елементи системи. Електронне керування дозволяє точно контролювати режими роботи насосів і форсунок, а також реалізовувати захисні алгоритми у разі виникнення аварійних ситуацій або відхилень параметрів від допустимих значень.

Система Common Rail також забезпечує високу гнучкість щодо використання різних видів палив. Сучасні судові двигуни з електронно-керованими паливними системами можуть бути адаптовані до роботи на низькосірчистих паливах, біопаливних домішках, синтетичних паливах і водопаливних емульсіях. Можливість програмного коригування параметрів упорскування дозволяє компенсувати відмінності у фізико-хімічних властивостях палива без істотних конструктивних змін паливної системи.

Паливний насос високого тиску є одним із ключових елементів паливної системи судового дизельного двигуна, оскільки саме він забезпечує створення необхідного тиску палива та його дозовану подачу до форсунок відповідно до режиму роботи двигуна. Від точності, стабільності та надійності роботи паливного насоса високого тиску значною мірою залежать параметри процесу упорскування, ефективність сумішоутворення, повнота згоряння палива, а також економічні й екологічні показники судового двигуна. У сучасних умовах експлуатації суден, що характеризуються зростанням вимог до паливної економічності, зниження викидів шкідливих речовин і підвищення ресурсу двигунів, вдосконалення конструкції паливних насосів високого тиску є одним із найважливіших напрямів розвитку паливних систем.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Традиційні паливні насоси високого тиску суднових дизельних двигунів, як правило, мають механічний привід від розподільного вала та працюють у тісному кінематичному зв'язку з колінчастим валом двигуна. У таких насосах параметри подачі палива визначаються профілем кулачків, геометрією плунжерної пари та положенням регулюючих елементів. Незважаючи на високу надійність і простоту конструкції, механічні паливні насоси мають обмежені можливості щодо гнучкого регулювання процесу упорскування, особливо на часткових навантаженнях і перехідних режимах роботи. Це обмежує можливості оптимізації процесу згоряння та негативно впливає на економічність і екологічні показники двигуна.

Одним із основних напрямів сучасного вдосконалення паливних насосів високого тиску є підвищення точності дозування палива та стабільності створюваного тиску. Це досягається за рахунок застосування високоточних плунжерних пар, виготовлених із використанням сучасних технологій обробки поверхонь і зносостійких матеріалів. Зменшення зазорів у плунжерних парах, покращення якості поверхонь тертя та оптимізація геометрії каналів подачі палива дозволяють знизити внутрішні витоки та забезпечити стабільність подачі палива протягом усього ресурсу експлуатації насоса.

Важливим напрямом удосконалення є оптимізація профілю кулачків приводу паливного насоса. Сучасні профілі кулачків розробляються з урахуванням необхідності забезпечення плавного наростання тиску палива, зменшення пікових навантажень на плунжерну пару та зниження гідравлічних ударів у паливних магістралях. Це сприяє підвищенню ресурсу деталей паливного насоса, зменшенню шуму та вібрацій, а також покращенню стабільності процесу упорскування. Оптимізований профіль кулачка дозволяє більш точно формувати закон подачі палива відповідно до вимог робочого процесу двигуна.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Суттєвого розвитку набули конструкції багатоплунжерних паливних насосів, які застосовуються в багатоциліндрових суднових двигунах. Вдосконалення таких насосів спрямоване на забезпечення рівномірності подачі палива між окремими секціями, що є критично важливим для балансування двигуна та зниження нерівномірності навантаження на циліндри. Застосування індивідуального регулювання секцій насоса, а також використання прецизійних регулюючих елементів дозволяє досягти високої повторюваності параметрів подачі палива для кожного циліндра.

Сучасні конструкції паливних насосів високого тиску також передбачають вдосконалення систем змащування та охолодження. В умовах роботи на важких суднових паливах насос зазнає значних теплових і механічних навантажень, що може призводити до прискореного зношування плунжерних пар і ущільнювальних елементів. Застосування ефективних систем змащування, використання моторного масла або спеціально підготовленого палива для змащування, а також покращення відведення теплоти від корпусу насоса дозволяють підвищити його надійність і довговічність.

Окремим напрямом вдосконалення є інтеграція паливних насосів високого тиску з електронними системами керування. Навіть у системах, які не є повноцінними системами типу Common Rail, застосування електронних виконавчих механізмів для керування моментом початку подачі палива або кількістю поданого палива дозволяє значно розширити можливості регулювання робочого процесу. Електронне керування дає змогу адаптувати роботу насоса до змінних умов експлуатації, компенсувати зношування елементів та забезпечувати оптимальні параметри упорскування на різних режимах роботи двигуна.

Вдосконалення конструкції паливних насосів високого тиску також тісно пов'язане з необхідністю адаптації суднових двигунів до використання альтернативних і низькосірчистих палив. Зміна фізико-хімічних властивостей

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

палива, зокрема його в'язкості та змащувальних характеристик, вимагає застосування нових матеріалів і конструктивних рішень у плунжерних парах і ущільненнях. Сучасні паливні насоси проєктуються з урахуванням можливості роботи на різних видах палива без істотного зниження ресурсу та надійності.

Таким чином, вдосконалення конструкції паливних насосів високого тиску є одним із ключових сучасних способів покращення роботи паливної системи суднових двигунів. Підвищення точності дозування палива, стабільності тиску, надійності та ресурсу насосів безпосередньо сприяє оптимізації процесу згоряння, зниженню питомої витрати палива, покращенню екологічних показників і підвищенню ефективності експлуатації суднових енергетичних установок у цілому.

Форсунка є одним із найвідповідальніших елементів паливної системи судового двигуна внутрішнього згоряння, оскільки саме вона безпосередньо здійснює впорскування палива в камеру згоряння та визначає характер його розпилення, напрямок паливного факела і умови формування паливно-повітряної суміші. Від конструкції та технічного стану форсунок значною мірою залежать параметри робочого процесу, повнота згоряння палива, рівень питомої витрати палива, теплові й механічні навантаження деталей циліндро-поршневої групи, а також екологічні показники судового двигуна. У сучасних умовах експлуатації суден удосконалення конструкції та принципів роботи форсунок розглядається як один із найбільш ефективних способів покращення роботи паливної системи в цілому [3].

Традиційні форсунки судових дизельних двигунів являють собою механічні розпилювальні пристрої, у яких відкривання і закривання голки відбувається під дією тиску палива та сили пружини. Хоча такі форсунки відзначаються простотою конструкції та високою надійністю, їхні можливості щодо точного керування параметрами упорскування є обмеженими. Зокрема, момент початку впорскування, тривалість подачі та форма паливного факела

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

значною мірою залежать від тиску, створюваного паливним насосом високого тиску, а також від ступеня зношування елементів форсунки. Це обмежує можливості оптимізації процесу згоряння, особливо на часткових навантаженнях і перехідних режимах роботи двигуна.

Сучасні напрями вдосконалення форсунок суднових двигунів спрямовані насамперед на покращення процесу розпилення палива. Застосування багатодірчастих розпилювачів з оптимізованим діаметром і просторовим розташуванням отворів дозволяє формувати рівномірний паливний факел і забезпечувати ефективне змішування палива з повітрям у камері згоряння. Дрібнодисперсне розпилення сприяє збільшенню площі контакту палива з повітрям, що прискорює процеси випаровування та хімічних реакцій згоряння. У результаті підвищується повнота згоряння палива, зменшується кількість продуктів неповного згоряння та знижується димність відпрацьованих газів.

Важливим аспектом сучасного вдосконалення форсунок є підвищення точності дозування палива та стабільності параметрів упорскування. Це досягається за рахунок використання прецизійних елементів із високою точністю виготовлення, застосування зносостійких матеріалів і спеціальних покриттів, що зменшують тертя та зношування. Зменшення витоків палива через зазори між голкою та корпусом форсунки дозволяє зберігати стабільні параметри упорскування протягом тривалого ресурсу експлуатації та знижує чутливість форсунки до змін властивостей палива.

Суттєвим кроком у розвитку форсунок суднових двигунів стало впровадження електронно-керованих форсунок, які використовуються в системах типу Common Rail та інших електронно-керованих паливних системах. У таких форсунках відкривання і закривання голки здійснюється за допомогою електромагнітних або п'єзоелектричних виконавчих механізмів, що дозволяє з високою точністю керувати моментом початку упорскування, його тривалістю та кількістю палива. Електронне керування забезпечує високу

					<i>КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

повторюваність параметрів упорскування незалежно від режиму роботи двигуна та стану паливної апаратури.

Застосування електронно-керованих форсунок відкриває можливість реалізації багатofазного упорскування палива. Попереднє упорскування сприяє підготовці умов для основної фази згоряння, зменшуючи затримку займання та жорсткість процесу згоряння. Основна фаза упорскування забезпечує реалізацію необхідної потужності двигуна, тоді як додаткові фази можуть використовуватися для корекції процесу згоряння або зниження токсичності відпрацьованих газів. Такий підхід дозволяє значно покращити економічні та екологічні показники судових двигунів.

Важливим напрямом вдосконалення форсунок є адаптація їхньої конструкції до роботи на важких судових паливах і альтернативних паливних композиціях. Висока в'язкість, наявність механічних домішок і агресивних компонентів у паливі створюють підвищені вимоги до матеріалів і конструкції розпилювачів та ущільнювальних елементів. Сучасні форсунки проєктуються з урахуванням можливості роботи на низькосірчистих паливах, біопаливних домішках і водопаливних емульсіях, що дозволяє забезпечити стабільну роботу паливної системи в умовах змінної якості палива.

Удосконалення форсунок судових двигунів також сприяє зниженню теплових і механічних навантажень на деталі циліндро-поршневої групи. Оптимізація форми та напрямку паливного факела дозволяє уникнути локального перегріву стінок камери згоряння та днища поршня, зменшуючи ризик утворення термічних тріщин і відкладень. Це позитивно впливає на ресурс двигуна та знижує витрати на технічне обслуговування і ремонт.

Таким чином, форсунки судових двигунів є одним із ключових елементів, удосконалення яких дозволяє суттєво покращити роботу паливної системи в цілому. Сучасні конструктивні рішення, використання електронного керування, оптимізація процесу розпилення та адаптація до різних видів палива забезпечують підвищення паливної економічності,

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

покращення екологічних показників, зниження навантажень на деталі та підвищення надійності суднових двигунів. У контексті сучасних вимог до ефективності та екологічності суднових енергетичних установок вдосконалення форсунок є одним із найперспективніших напрямів розвитку паливних систем.

Якість підготовки палива перед його подачею до паливної апаратури є одним із визначальних чинників ефективної та надійної роботи паливної системи суднового двигуна внутрішнього згоряння. Навіть найбільш досконалі конструкції паливних насосів високого тиску та форсунок не здатні забезпечити стабільну й ефективну роботу двигуна у разі подачі палива з нестабільними фізико-хімічними властивостями або з підвищеним вмістом механічних домішок і води. У сучасних умовах експлуатації суден, коли широко застосовуються важкі залишкові палива, низькосірчисті палива та паливні суміші різного походження, підвищення якості підготовки палива набуває особливої актуальності як один із найефективніших способів покращення роботи паливної системи в цілому [4].

Суднові дизельні двигуни, зокрема головні двигуни великої потужності, часто працюють на важких паливах, які характеризуються високою в'язкістю, значним вмістом асфальтенів, механічних домішок, води та корозійно-активних сполук. Такі властивості палива створюють підвищені вимоги до системи його підготовки, оскільки подача неочищеного або недостатньо підготовленого палива призводить до інтенсивного зношування плунжерних пар паливних насосів високого тиску, розпилювачів форсунок і ущільнювальних елементів, а також до порушення процесу упорскування і згоряння.

Одним із основних елементів сучасної системи підготовки палива є багатоступенева фільтрація. Використання послідовно встановлених грубих і тонких фільтрів дозволяє ефективно видаляти з палива тверді частинки різного розміру, запобігаючи їх потраплянню до прецизійних елементів

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

паливної апаратури. Сучасні фільтрувальні матеріали забезпечують високу ступінь очищення палива при мінімальних гідравлічних втратах, що є особливо важливим для стабільної роботи паливної системи на різних режимах навантаження.

Важливу роль у підготовці суднового палива відіграють центрифуги-сепаратори, які забезпечують видалення води та дрібнодисперсних механічних домішок за рахунок використання відцентрових сил. Сучасні сепаратори мають високу продуктивність і оснащуються автоматизованими системами керування, що дозволяє підтримувати оптимальний режим очищення палива незалежно від його початкових властивостей. Ефективне видалення води з палива знижує ризик корозійного пошкодження елементів паливної системи та запобігає порушенню процесу згоряння, пов'язаному з нестабільністю паливного факела.

Одним із ключових сучасних способів підвищення якості підготовки палива є точне регулювання його температури та в'язкості перед подачею до паливних насосів високого тиску. Для важких суднових палив характерна висока в'язкість, яка істотно впливає на процеси розпилення та дозування палива. Сучасні системи підігріву палива забезпечують його доведення до оптимальної температури, за якої в'язкість відповідає вимогам паливної апаратури. Автоматизовані системи контролю в'язкості дозволяють підтримувати стабільні реологічні властивості палива навіть за умов зміни навантаження двигуна та температури навколишнього середовища.

Перспективним напрямом удосконалення підготовки палива є застосування гомогенізаторів, які забезпечують руйнування агломератів асфальтенів і рівномірний розподіл компонентів палива. Гомогенізація сприяє стабілізації паливної суміші, зменшенню утворення відкладень у паливних магістралях, насосах і форсунках, а також покращенню процесу розпилення. Використання гомогенізованого палива позитивно впливає на повноту згоряння та знижує утворення сажі й інших продуктів неповного згоряння.

					<i>KPM.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Суттєвим сучасним напрямом є підготовка водопаливних емульсій, які застосовуються для зниження токсичності відпрацьованих газів суднових двигунів. Для ефективної роботи на водопаливних емульсіях необхідно забезпечити стабільність емульсії, однорідний розподіл води в паливі та відповідні умови подачі до паливної апаратури. Сучасні емульгуючі пристрої дозволяють отримувати стабільні емульсії безпосередньо на борту судна, що відкриває додаткові можливості для покращення екологічних показників двигуна без істотних конструктивних змін паливної системи.

Підвищення якості підготовки палива також тісно пов'язане з впровадженням систем автоматичного контролю та діагностики. Сучасні суднові енергетичні установки оснащуються датчиками температури, тиску, в'язкості та забрудненості палива, сигнали з яких використовуються для автоматичного регулювання режимів роботи системи підготовки. Це дозволяє оперативно реагувати на зміну властивостей палива, запобігати аварійним режимам і забезпечувати стабільні умови роботи паливної апаратури.

Таким чином, підвищення якості підготовки палива перед його подачею до паливної апаратури є одним із найважливіших сучасних способів покращення роботи паливної системи суднових двигунів. Комплексне застосування ефективної фільтрації, сепарації, підігріву, гомогенізації та автоматизованого контролю властивостей палива забезпечує підвищення надійності та ресурсу паливної апаратури, покращення процесу згоряння, зниження питомої витрати палива й екологічного навантаження, що є ключовими вимогами до сучасних суднових енергетичних установок.

Одним із перспективних сучасних способів покращення роботи паливної системи суднових двигунів внутрішнього згоряння є **застосування гомогенізаторів та емульгаторів палива**. Ці пристрої призначені для фізико-механічної обробки палива з метою покращення його структури, стабілізації складу та підвищення ефективності процесів упорскування і згоряння. У сучасних умовах експлуатації суден, коли широко використовуються важкі

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

залишкові палива, низькосірчисті палива та різноманітні паливні суміші, застосування гомогенізаторів і емульгаторів розглядається як важливий елемент комплексного вдосконалення паливної системи.

Важкі суднові палива характеризуються складною багатокомпонентною структурою, наявністю асфальтенів, смолистих сполук, механічних домішок і води. У процесі зберігання та транспортування такі палива можуть зазнавати розшарування, утворення агломератів асфальтенів і локальних зон з підвищеною концентрацією домішок. Подача такого палива без додаткової обробки до паливної апаратури призводить до погіршення умов упорскування, нестабільності паливного факела, інтенсивного зношування прецизійних пар паливних насосів високого тиску та розпилювачів форсунок.

Гомогенізація палива полягає у його інтенсивній механічній обробці з метою руйнування агломератів асфальтенів, подрібнення твердих включень і забезпечення рівномірного розподілу компонентів у всьому об'ємі палива. Сучасні гомогенізатори можуть працювати на принципі гідродинамічної кавітації, турбулентного перемішування або використання високих зсувних напружень. У результаті гомогенізоване паливо має більш однорідну структуру, стабільні фізико-хімічні властивості та покращені умови для подальшої подачі до паливної апаратури.

Застосування гомогенізаторів у паливних системах суднових двигунів дозволяє зменшити утворення відкладень у паливних магістралях, насосах і форсунках, що особливо важливо при роботі на важких паливах. Рівномірний розподіл асфальтенів і домішок знижує ризик локального перевантаження елементів паливної апаратури та сприяє стабільності процесу упорскування. Це позитивно впливає на повноту згоряння палива, зменшує утворення сажі та продуктів неповного згоряння, а також підвищує загальну надійність роботи паливної системи.

Емульгатори палива застосовуються для створення стабільних водопаливних емульсій, які складаються з дрібнодисперсних крапель води,

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

рівномірно розподілених у паливі. Водопаливні емульсії є одним із найбільш ефективних сучасних способів зниження токсичності відпрацьованих газів судових двигунів, зокрема викидів оксидів азоту. Для отримання стабільної емульсії необхідно забезпечити дрібний розмір крапель води, рівномірність їх розподілу та запобігання швидкому розшаруванню суміші.

Сучасні емульгуючі пристрої можуть працювати як у стаціонарному режимі, так і в режимі безперервного приготування емульсії безпосередньо перед подачею палива до двигуна. Використання механічних, гідродинамічних або ультразвукових методів емульгування дозволяє отримувати водопаливні емульсії з високим ступенем стабільності без застосування хімічних добавок. Це є важливою перевагою з точки зору екологічної безпеки та простоти експлуатації судових енергетичних установок.

Застосування водопаливних емульсій істотно впливає на процес згоряння палива в циліндрах судового двигуна. Під час упорскування емульсії в камеру згоряння вода, що міститься у краплях палива, інтенсивно випаровується, створюючи ефект так званих мікрровибухів. Цей ефект призводить до додаткового подрібнення паливних крапель, покращення розпилення та інтенсифікації процесів сумішоутворення. У результаті підвищується повнота згоряння палива та зменшується утворення сажі.

Важливим наслідком використання водопаливних емульсій є зниження максимальної температури циклу згоряння. Це безпосередньо впливає на зменшення інтенсивності утворення оксидів азоту, які є одними з основних шкідливих компонентів відпрацьованих газів судових двигунів. Таким чином, застосування емульгаторів палива є ефективним інструментом виконання сучасних екологічних вимог без необхідності суттєвих конструктивних змін двигуна.

Застосування гомогенізаторів та емульгаторів палива також позитивно впливає на роботу паливної апаратури. Покращення структури палива та

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

зменшення кількості великих агломератів і нестабільних включень сприяє зниженню зношування плунжерних пар паливних насосів високого тиску та розпилювачів форсунок. Це дозволяє збільшити міжремонтні інтервали, зменшити витрати на технічне обслуговування та підвищити експлуатаційну надійність судових двигунів.

Важливою умовою ефективного застосування гомогенізаторів та емульгаторів є інтеграція цих пристроїв у загальну систему підготовки та подачі палива. Сучасні судові паливні системи оснащуються автоматизованими засобами контролю температури, тиску, в'язкості та складу палива, що дозволяє оптимізувати режими роботи гомогенізаторів і емульгаторів залежно від умов експлуатації та типу використовуваного палива. Такий комплексний підхід забезпечує стабільність властивостей палива на вході до паливної апаратури та підвищує ефективність роботи всієї паливної системи.

Таким чином, застосування гомогенізаторів та емульгаторів палива є сучасним і ефективним способом покращення роботи паливної системи судових двигунів. Гомогенізація та емульгування палива сприяють стабілізації його властивостей, покращенню процесів упорскування і згоряння, зниженню питомої витрати палива та токсичності відпрацьованих газів, а також підвищенню надійності й ресурсу паливної апаратури. У поєднанні з іншими сучасними рішеннями, такими як системи Common Rail, електронно-керовані форсунки та вдосконалені системи підготовки палива, ці технології відіграють важливу роль у розвитку ефективних та екологічно безпечних судових енергетичних установок [5].

Одним із найважливіших сучасних напрямів удосконалення паливних систем судових двигунів внутрішнього згоряння **є використання альтернативних та комбінованих палив**. Такий підхід зумовлений як зростанням вимог до екологічної безпеки судноплавства, так і необхідністю підвищення паливної економічності, енергетичної ефективності та гнучкості

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

експлуатації суднових енергетичних установок. Сучасні міжнародні нормативні документи, зокрема вимоги ІМО та положення MARPOL Annex VI, стимулюють пошук і впровадження нових паливних рішень, які дозволяють зменшити викиди оксидів азоту, оксидів сірки, твердих частинок і парникових газів без суттєвого зниження експлуатаційної надійності суднових двигунів.

Альтернативні палива для суднових двигунів охоплюють широкий спектр енергетичних носіїв, які відрізняються від традиційних нафтових палив за походженням, складом і фізико-хімічними властивостями. До них належать зріджений природний газ, метанол, етанол, біопаливні компоненти, синтетичні палива, водень, аміак, а також водопаливні емульсії. Використання таких палив вимагає відповідної адаптації паливної системи, зокрема систем подачі, дозування, упорскування та контролю параметрів палива, що безпосередньо впливає на її конструктивне вдосконалення.

Одним із найбільш поширених прикладів альтернативного палива в сучасному судноплавстві є зріджений природний газ, який застосовується у двопаливних суднових двигунах. У таких двигунах реалізується комбінований принцип живлення, за якого газове паливо використовується як основне, а дизельне паливо — як пілотне для ініціювання займання. Така схема вимагає складнішої паливної системи, яка поєднує елементи газопостачання та традиційної дизельної апаратури. Водночас використання комбінованого палива дозволяє значно знизити викиди оксидів азоту та сірки, зменшити димність і покращити загальну екологічну характеристику двигуна.

Використання рідких альтернативних палив, зокрема метанолу та етанолу, також розглядається як перспективний напрям удосконалення паливних систем суднових двигунів. Ці палива характеризуються нижчою теплотою згоряння порівняно з традиційними дизельними паливами, що потребує коригування параметрів подачі та упорскування. Сучасні електронно-керовані паливні системи дозволяють адаптувати кількість

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

поданого палива, момент упорскування та тривалість подачі з урахуванням властивостей альтернативного палива, забезпечуючи стабільний робочий процес і прийнятний рівень економічності.

Комбіновані палива, до яких належать паливні суміші з додаванням біокомпонентів або синтетичних домішок, є ще одним ефективним способом покращення роботи паливної системи суднових двигунів. Додавання біопаливних компонентів до традиційних нафтових палив дозволяє частково замінити викопні енергоресурси та зменшити вуглецевий слід судна. Водночас такі паливні суміші можуть мати відмінні змашувальні властивості, в'язкість і хімічну активність, що потребує вдосконалення системи підготовки та подачі палива, а також застосування матеріалів, стійких до впливу нових компонентів.

Використання альтернативних та комбінованих палив суттєво впливає на конструкцію та функціонування паливної апаратури. Зміна фізико-хімічних властивостей палива вимагає застосування спеціальних матеріалів ущільнювальних елементів, удосконалених плунжерних пар паливних насосів високого тиску та оптимізованих конструкцій форсунок. Сучасні паливні системи проектуються з урахуванням можливості роботи на різних видах палива, що підвищує універсальність суднових двигунів і спрощує їх адаптацію до змінних умов експлуатації.

Застосування альтернативних палив також створює передумови для покращення процесу згоряння. Наприклад, використання палива з нижчою температурою згоряння або з підвищеним вмістом кисню сприяє зменшенню утворення оксидів азоту та продуктів неповного згоряння. У поєднанні з сучасними системами керування паливоподачею це дозволяє оптимізувати тепловий режим двигуна, знизити термічні навантаження на деталі циліндро-поршневої групи та підвищити їх ресурс.

Важливою перевагою використання альтернативних і комбінованих палив є підвищення гнучкості експлуатації суднових двигунів. Можливість

					<i>KPM.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

роботи на різних видах палива дозволяє судновласникам адаптувати експлуатацію суден до умов ринку палива, екологічних обмежень у певних регіонах та вимог портових адміністрацій. Сучасні паливні системи з електронним керуванням забезпечують автоматичне перемикання між різними видами палива або зміну їх співвідношення без зупинки двигуна, що є важливою перевагою з точки зору безпеки та безперервності роботи судна.

Таким чином, використання альтернативних та комбінованих палив є сучасним і перспективним способом покращення роботи паливної системи суднових двигунів. Такий підхід сприяє зниженню негативного впливу судноплавства на довкілля, підвищенню паливної економічності та розширенню експлуатаційних можливостей суднових енергетичних установок. У поєднанні з удосконаленням конструкції паливної апаратури, впровадженням електронних систем керування та сучасних методів підготовки палива використання альтернативних і комбінованих палив є важливим елементом комплексного розвитку паливних систем суднових двигунів у контексті сучасних вимог ефективності та екологічної безпеки.

Сучасний рівень розвитку суднових двигунів внутрішнього згоряння нерозривно пов'язаний із широким **впровадженням систем автоматичного керування та діагностики**, які істотно підвищують ефективність, надійність і безпеку роботи паливної системи. В умовах зростання вимог до паливної економічності, екологічних показників і експлуатаційної гнучкості суден автоматизація процесів подачі та впорскування палива стає одним із ключових напрямів удосконалення паливних систем. Системи автоматичного керування дозволяють реалізувати оптимальні режими роботи паливної апаратури в реальному часі, тоді як системи діагностики забезпечують своєчасне виявлення відхилень і попередження аварійних ситуацій.

Традиційні паливні системи суднових двигунів базувалися переважно на механічному регулюванні, що обмежувало можливості адаптації процесу упорскування до змінних умов експлуатації. У таких системах параметри

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

подачі палива задавалися конструктивно та коригувалися вручну під час технічного обслуговування. Сучасні автоматизовані паливні системи принципово відрізняються тим, що керування процесом упорскування здійснюється електронними блоками керування, які обробляють сигнали від великої кількості датчиків і формують керуючі впливи на виконавчі механізми паливної апаратури.

Системи автоматичного керування паливною системою забезпечують точне регулювання кількості поданого палива, моменту початку упорскування, тривалості та форми паливної подачі залежно від режиму роботи двигуна. Електронний блок керування аналізує параметри частоти обертання колінчастого вала, навантаження, тиску наддуву, температури повітря та палива, а також тиску в паливних магістралях. На основі цих даних реалізуються алгоритми оптимізації робочого процесу, що дозволяє забезпечити мінімальну питому витрату палива при заданій потужності та одночасно знизити токсичність відпрацьованих газів.

Важливою перевагою автоматичних систем керування є можливість адаптивного регулювання параметрів паливоподачі. Такі системи здатні автоматично компенсувати зміни властивостей палива, зношування елементів паливної апаратури та вплив зовнішніх факторів. Наприклад, у разі зменшення змащувальних властивостей палива або зміни його в'язкості електронна система керування може коригувати параметри упорскування, забезпечуючи стабільність процесу згоряння та запобігаючи перевантаженню окремих елементів паливної системи.

Суттєвим елементом сучасних паливних систем є системи автоматичної діагностики, які забезпечують безперервний контроль технічного стану паливної апаратури [6]. Діагностичні системи здійснюють моніторинг тиску палива, температури, витрати, часу спрацювання форсунок і рівномірності подачі палива по циліндрах. Аналіз відхилень цих параметрів від нормативних

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

значень дозволяє своєчасно виявляти несправності паливних насосів високого тиску, форсунок, регулюючих клапанів та інших елементів паливної системи.

Застосування систем автоматичної діагностики дає можливість перейти від планово-попереджувального технічного обслуговування до обслуговування за технічним станом. Це дозволяє зменшити кількість непотрібних регламентних операцій, знизити експлуатаційні витрати та підвищити коефіцієнт технічної готовності суднових енергетичних установок. Раннє виявлення відхилень у роботі паливної системи дає змогу усунути несправності на початковій стадії, запобігаючи серйозним пошкодженням і аварійним зупинкам двигуна.

Системи автоматичного керування та діагностики відіграють важливу роль у забезпеченні екологічної безпеки суднових двигунів. Точне регулювання параметрів упорскування дозволяє оптимізувати процес згоряння таким чином, щоб зменшити утворення оксидів азоту, сажі та незгорілих вуглеводнів. Автоматичний контроль складу паливної суміші та температурного режиму камери згоряння сприяє стабільності екологічних показників двигуна в усьому діапазоні режимів роботи, що є важливою умовою виконання сучасних міжнародних екологічних норм.

Особливо важливим є застосування систем автоматичного керування та діагностики в паливних системах, які працюють на альтернативних і комбінованих паливах. Зміна фізико-хімічних властивостей палива вимагає гнучкого регулювання параметрів подачі та упорскування, що практично неможливо реалізувати без використання електронних систем керування. Автоматизовані системи дозволяють безпечно здійснювати перемикання між різними видами палива, змінювати їх співвідношення та підтримувати стабільний робочий процес двигуна без переривання його роботи.

Застосування сучасних систем автоматичного керування та діагностики також позитивно впливає на безпеку експлуатації суден. У разі виникнення аварійних ситуацій або критичних відхилень параметрів паливної системи

					<i>KPM.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

автоматичні системи здатні оперативно обмежувати подачу палива, переводити двигун у безпечний режим або здійснювати його зупинку. Це знижує ризик розвитку аварій, пов'язаних із порушенням роботи паливної системи, та підвищує загальний рівень експлуатаційної надійності суднових енергетичних установок.

Таким чином, системи автоматичного керування та діагностики є одним із найважливіших сучасних способів покращення роботи паливної системи суднових двигунів. Їх застосування забезпечує оптимізацію процесу паливоподачі, підвищення паливної економічності, зниження токсичності відпрацьованих газів, підвищення надійності та ресурсу паливної апаратури, а також покращення безпеки та гнучкості експлуатації суднових двигунів. У комплексі з іншими сучасними технічними рішеннями автоматизація та діагностика відіграють визначальну роль у розвитку ефективних і екологічно безпечних суднових паливних систем.

Проведений аналіз сучасних способів покращення роботи паливної системи суднових двигунів показує, що розвиток електронно-керованих систем упорскування, удосконалення форсунок, підвищення якості підготовки палива, застосування гомогенізаторів і емульгаторів, використання альтернативних та комбінованих палив, а також впровадження систем автоматичного керування й діагностики суттєво розширюють можливості оптимізації робочого процесу двигуна. Усі ці заходи спрямовані на підвищення паливної економічності, зниження токсичності відпрацьованих газів, покращення надійності та адаптацію суднових двигунів до сучасних екологічних і експлуатаційних вимог.

Водночас аналіз показує, що ефективність більшості перелічених технічних рішень значною мірою залежить від стабільності та точності створення високого тиску палива, а також від рівномірності й керованості його подачі до форсунок. Саме ці функції безпосередньо забезпечуються паливним насосом високого тиску, який залишається ключовим елементом

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

паливної системи незалежно від рівня її автоматизації або типу використовуваного палива. Навіть у сучасних електронно-керованих системах упорскування надійність, точність і ресурс усієї паливної системи в цілому значною мірою визначаються конструктивною досконалістю ПНВТ.

Вдосконалення конструкції паливних насосів високого тиску дозволяє комплексно впливати на всі основні параметри паливоподачі, зокрема тиск, стабільність і закон подачі палива, що безпосередньо формує умови розпилення, сумішоутворення та згоряння. Покращення геометрії плунжерних пар, оптимізація профілів кулачків, підвищення зносостійкості матеріалів і вдосконалення систем змащування та охолодження насосів забезпечують зростання точності дозування палива, зменшення гідравлічних втрат і підвищення ресурсу паливної апаратури. Це, у свою чергу, створює сприятливі умови для ефективної роботи форсунок, систем автоматичного керування та використання різних видів палив [7].

Таким чином, незважаючи на значний прогрес у розвитку електронних систем керування та альтернативних паливних технологій, саме вдосконалення конструкції паливних насосів високого тиску залишається найбільш універсальним і ефективним способом покращення роботи паливної системи суднових двигунів. Модернізація ПНВТ дозволяє підвищити економічні, екологічні та експлуатаційні показники двигуна без радикальної зміни його загальної схеми, що робить цей напрям особливо доцільним з точки зору практичного впровадження, надійності та економічної ефективності в умовах сучасного судноплавства.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПНВТ ДВИГУНА 6ЧН 33/38

Розрахунок робочого циклу двигуна 6ЧН 33/38

Вихідні дані

Температура навколишнього повітря T_0 . Приймаємо $T_0 = 298$ К (стандартні умови застосування).

Тиск навколишнього повітря p_0 . Варто приймати $p_0 = 0,1$ МПа (стандартні умови застосування).

Ступінь стиску ε . При призначенні ступеня стиску варто враховувати розміри циліндра і спосіб сумішоутворення. Приймаємо $\varepsilon = 14$.

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 $\alpha = 2,105$.

Показник адіабати повітря $k_s = 1,4$.

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

Адiabатний ККД турбіни $\eta_{\text{т.ад}} = 0,95$.

Коефіцієнт залишкових газів $\gamma_{\text{г}}$. Вплив на значення цього коефіцієнту завдають тип двигуна, особливості повітропостачання і газообміну. Приймаємо $\gamma_{\text{г}} = 0,04$.

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 призначати після аналізу теплового балансу двигунів, близьких до проектного.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Приймаємо $\xi_z = 0,94$; $\xi_b = 0,98$.

Ступінь підвищення тиску при згорянні λ . 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 $\Delta T_a = 20$ К.

Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми ζ . Величину цього коефіцієнту вибирають на підставі дослідних даних, звертають увагу на тип двигуна та особливості системи газообміну.

Приймаємо $\zeta = 0,99$.

Механічний ККД двигуна η_m .

Приймаємо $\eta_m = 0,94$.

Зменшення тиску у повітроохолоджувачі ΔP_{ox} . Повітроохолоджувач являє собою опір на шляху повітря, тому у ньому відбувається зменшення тиску повітря. У числовому виразі $\Delta P_{ox} = 0,004$ МПа.

Температура залишкових газів T_r .

Приймаємо $T_r = 800$ К.

Хімічний склад палива. Розрахунок проводиться на важке паливо середнього складу: С = 0,87 кг – кількість вуглецю; Н = 0,126 кг – кількість водню; S = 0 кг – кількість сірки; О = 0,004 кг – кількість кисню.

Коефіцієнт тактності Z – являє собою кількість робочих ходів поршня, що припадають на один оберт колінчастого вала, тоді для 4-тактних двигунів $Z = 0,5$.

Нижча теплота згорання палива Q_n . Приймаємо $Q_n = 42700$ (кДж/кг).

Ступінь підвищення тиску в компресорі Π_k . Для даного типу компресора приймаємо $\Pi_k = 3,5$.

Частка ходу поршня втраченого на продувку ϕ_n . Для 4-тактних двигунів $\phi_n = 0$.

Результати теплового розрахунку двигуна

Робочий процес двигуна складався з послідовного розрахунку п'ятих процесів, що відтворюються у циклі: наповнення, стиску, згоряння палива, розширення та випуску.

Точність розрахунку вважалася задовільною, якщо різниця між заданою отриманої в результаті розрахунку потужності не перевищувала 0,5%. Для двигунів, що мають вільний газотурбінний наддув, при розрахунку циклу двигуна необхідно забезпечити баланс потужності турбіни і компресора турбокомпресора.

Забезпечення необхідного балансу отримувалось шляхом підбору таких значень коефіцієнта надлишку повітря α і тиск повітря за компресором турбокомпресора P_k , при якому потужність газової турбіни була рівній потужності компресора, насадженого на загальний з турбіною вал турбокомпресора. При цьому різниця між підбираним і дійсним значенням P_k (отриманим в результаті розрахунку циклу) не перевищувала 0,5%. В якості прикладу, представимо повний розрахунок номінального режиму роботи двигуна.

Розрахунок процесу наповнення

Температура повітря за компресором, К:

$$T_k = T_0 \times \left[1 + \frac{\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{0,286} - 1}{\eta_{k,ad}} \right] = 298 \times \left[1 + \frac{\left(\frac{0,35}{0,10} \right)^{0,286} - 1}{0,7} \right] = 481,674$$

Температура повітря перед двигуном, К:

$$T_s = T_k - \eta_o \times (T_k - T_0) = 481,674 - 0,95 \times (481,674 - 298) = 307,326$$

Температура заряду наприкінці процесу наповнення, К:

$$T_a = \frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r \times T_r}{1 + \gamma_r} = \frac{307,326 + 20 + 0,04 \times 800}{1 + 0,04} = 345,506$$

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Тиск повітря перед двигуном, МПа:

$$P_s = P_k - \Delta P_{\text{ок}} = 0,35 - 0,004 = 0,346$$

Тиск заряду наприкінці процесу наповнення, МПа:

$$P_a = 0,97 \times P_s = 0,95 \times 0,346 = 0,329$$

Коефіцієнт наповнення:

$$\eta_n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \times \frac{P_a}{P_s} \times \frac{T_s}{T_a} \times \frac{1}{1 + \gamma_r} \times (1 - \phi_n) = \frac{14}{14 - 1} \times \frac{0,329}{0,346} \times \frac{307,326}{345,506} \times \frac{1}{1 + 0,04} \times (1 - 0) = 0,875$$

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 розрахунку:

$$n_I = 1,363$$

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Тиск в кінці процесу стиску, МПа:

$$P_c = P_a \times \epsilon^{n_1} = 0,329 \times 14^{1,363} = 11,982$$

Температура в кінці процесу стиску, К:

$$T_c = T_a \times \epsilon^{n_1-1} = 345,506 \times 14^{1,363-1} = 899,638$$

Розрахунок процесу згоряння

Дійсна кількість повітря для згоряння, кмоль/кг:

$$L = \frac{\alpha}{0,21} \times \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) = \frac{2,105}{0,21} \times \left(\frac{0,87}{12} + \frac{0,13}{4} + \frac{0}{32} - \frac{0,004}{32} \right) = 1,041$$

Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни:

$$\beta_0 = 1 + \frac{8 \times H + O}{32 \times L} = 1 + \frac{8 \times 0,13 + 0,004}{32 \times 1,041} = 1,0304$$

Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни:

$$\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} = \frac{1,034 + 0,04}{1 + 0,04} = 1,0292$$

Доля палива, що згоріла в точці z:

$$x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b} = \frac{0,94}{0,98} = 0,959$$

Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z:

$$\beta_z = 1 + \left(\frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \times x_z = 1 + \left(\frac{1,034 - 1}{1 + 0,04} \right) \times 0,959 = 1,028$$

Максимальна температура згоряння, К:

$$\frac{\xi_z \times Q_n}{\alpha \times L_0} + [c_v' + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times (c_v'' + 8,314 \times \lambda)] \times T_c = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times c_{pz}' \times T_z$$

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

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

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

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

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

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

$$T_z = 1882 \text{ К}$$

Максимальний тиск згоряння, МПа:

$$P_z = \lambda \times P_c = 1,2 \times 11,7 = 14,379$$

Розрахунок процесу розширення

Ступінь попереднього розширення:

$$\rho = \frac{\beta_z \times T_z}{\lambda \times T_c} = \frac{1,028}{1,2} \times \frac{1882}{899,638} = 1,792$$

Ступінь подальшого розширення:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{14}{1,792} = 7,812$$

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 прийmemo:

$$n_2 = 1,272$$

Температура в кінці процесу розширення, К:

$$T_b = T_z \times \frac{1}{\delta^{n_2-1}} = 1882 \times \frac{1}{7,812^{1,272-1}} = 1077$$

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Тиск в кінці процесу розширення, МПа:

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \frac{14,379}{7,812^{1,272}} = 1,053$$

Визначення індикаторних показників

Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа:

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

$$\frac{1,982}{4 - 1} \times \left[1,2 \times (1,792 - 1) + \frac{1,2 \times 1,792}{1,272 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{11,982^{1,272 - 1}} \right) - \frac{1}{1,363 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{14^{1,363 - 1}} \right) \right] = 2,433$$

Дійсний середній індикаторний тиск, МПа:

$$P_i = P_i' \times \zeta \times (1 - \phi_n) = 2,433 \times 0,99 \times (1 - 0) = 2,409$$

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

$$g_i = 433 \times \frac{P_s \times \eta_n}{\alpha \times L_0 \times T_s \times P_i} = 433 \times \frac{0,346 \times 0,875}{2,105 \times 0,495 \times 307,326 \times 2,409} = 0,17$$

Індикаторний ККД:

$$\eta_i = \frac{3600}{g_i \times Q_n} = \frac{3600}{0,17 \times 42700} = 0,496$$

Визначення ефективних показників

Середній ефективний тиск, МПа:

$$P_e = P_i \times \eta_m = 2,409 \times 0,94 = 2,264$$

Ефективний ККД двигуна:

$$\eta_e = \eta_i \times \eta_m = 0,496 \times 0,94 = 0,466$$

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Питома ефективна витрата пального, кг/(кВт×год):

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} = \frac{0,17}{0,94} = 0,1808$$

Ефективна потужність двигуна, кВт:

$$N_e = 13,1 \times D_c^2 \times S_c \times z \times P_c \times n \times i = 13,1 \times 0,33^2 \times 0,38 \times 0,5 \times 2,264 \times 720 \times 6 = 2651$$

Порівняння заданої та отриманої потужності двигуна:

$$\Delta N = \frac{N_e - N'_e}{N_e} \times 100\% = \frac{2651 - 2650}{2651} \times 100\% = 0,05\%$$

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

Вдосконалення конструкції ПНВТ

У роботі запропоновано конструкцію блочного багатосекційного паливного насоса високого тиску, призначеного для багаточиліндрового дизельного двигуна. Запропонована конструкція орієнтована на усунення недоліків традиційних плунжерних насосів, пов'язаних із нерівномірністю навантажень на прецизійні пари, складністю регулювання циклової подачі та обмеженою можливістю роботи на альтернативних і малов'язких видах палива.

Основною ідеєю розробки є перехід від класичної однофазної організації роботи плунжерів до багатофазної системи з кільцевою структурою взаємодії секцій. Такий підхід дозволяє розподілити функції наповнення і нагнітання між плунжерами в часі, зменшити пікові механічні навантаження та забезпечити більш стабільні параметри паливоподачі у широкому діапазоні режимів роботи двигуна.

Загальний вигляд запропонованої конструкції ПНВТ наведено на рисунку 3.1. Насос виконаний у вигляді єдиного блоку зі спільним корпусом, у якому розміщено плунжерні секції, кулачковий вал приводу та систему

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

внутрішніх паливних каналів. Блочне виконання насоса підвищує жорсткість конструкції, зменшує кількість зовнішніх з'єднань і сприяє зниженню вібраційних навантажень.

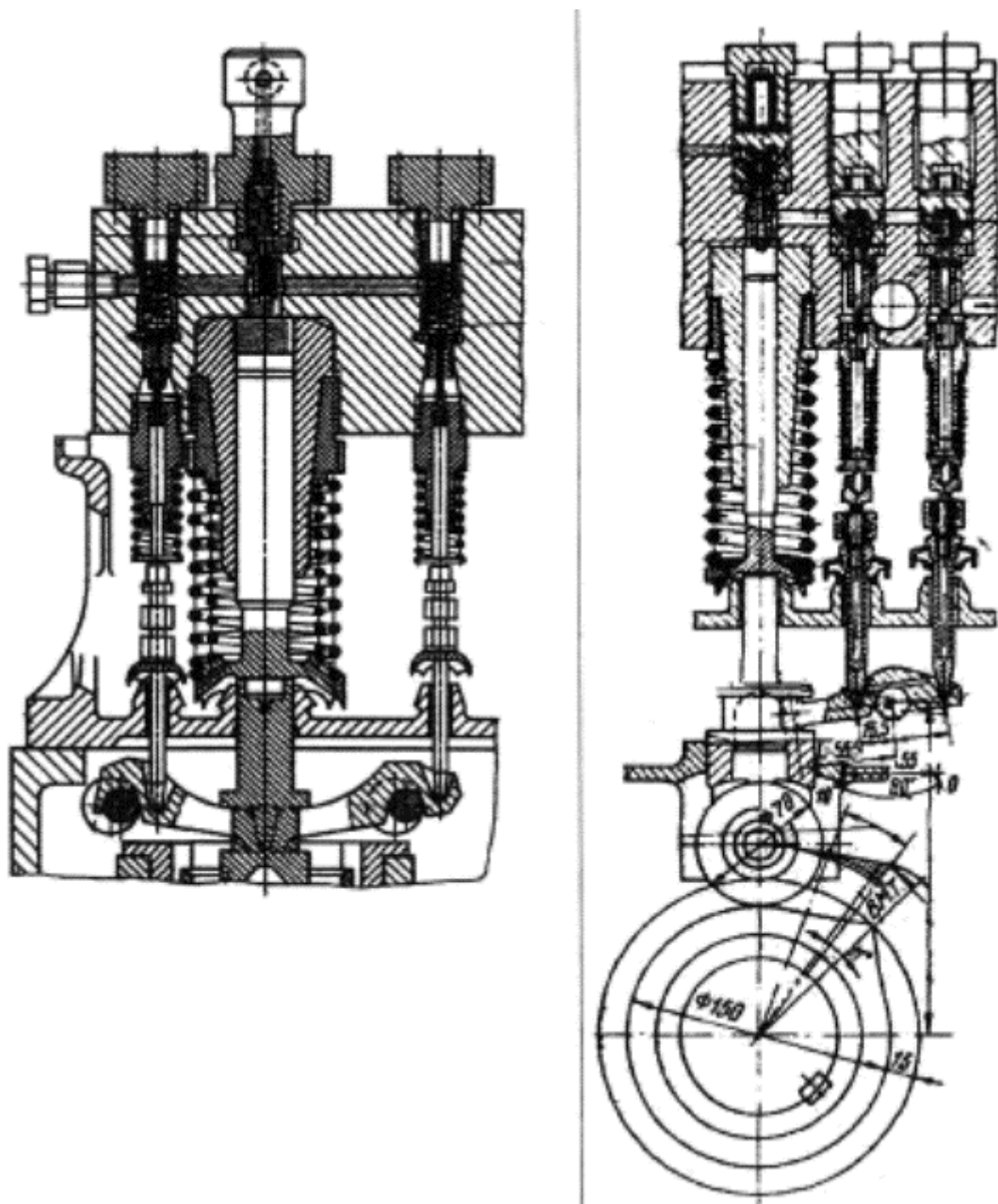


Рисунок 3.1 – Конструкція ПНВТ

Ключовою особливістю запропонованої конструкції є кільцева схема організації роботи плунжерів, показана на рисунку 3.2. На відміну від традиційних ПНВТ, де кожна секція працює автономно, у даній конструкції

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ

Аркуш

46

плунжери функціонують у попарних поєднаннях, утворюючи замкнений кільцевий ланцюг.

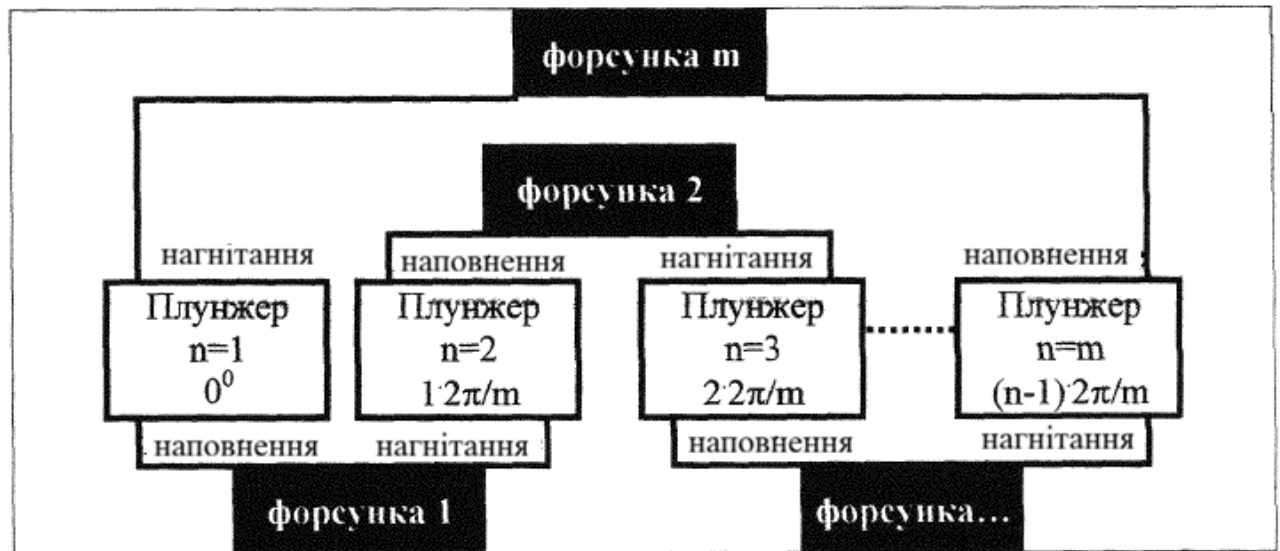


Рисунок 3.2 – Схема роботи плунжерів

У кожній парі плунжерів один плунжер виконує функцію золотника, забезпечуючи процес наповнення надплунжерного простору паливом низького тиску, тоді як другий плунжер у цей самий момент виконує функцію витіснювача, створюючи тиск і подаючи паливо до форсунки. Після зміщення фаз ролі плунжерів у парі змінюються, внаслідок чого кожен плунжер протягом одного робочого циклу по черзі бере участь як у наповненні, так і в нагнітанні.

Така організація роботи дозволяє:

- усунути асиметричні силові навантаження, характерні для насосів із золотниковим регулюванням;
- зменшити контактні напруження в зоні плунжер–гільза;
- підвищити рівномірність подачі палива між секціями;
- зменшити чутливість роботи насоса до зміни в'язкості та фізико-хімічних властивостей палива.

Для аналітичного пояснення процесів подачі палива на першому етапі розглядається однофазна діаграма роботи плунжера, наведена на рисунку 3.3. На цій діаграмі показано закон переміщення плунжера $H = f(t)$, який має форму, близьку до синусоїдальної, що є характерним для кулачкового приводу.

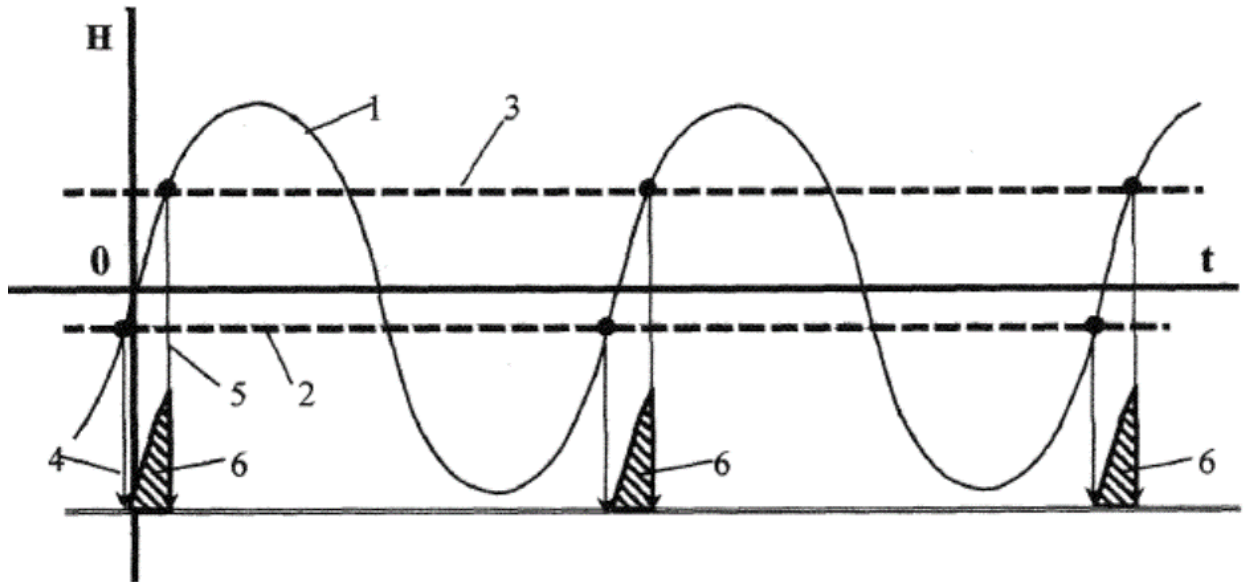


Рисунок 3.3 – Однофазна діаграма роботи плунжера

На однофазній діаграмі виділені граничні лінії імпульсу та відсічки, які відповідають моменту початку нагнітання палива та моменту припинення подачі відповідно. Взаємне положення цих ліній відносно кривої ходу плунжера визначає:

- тривалість подачі палива;
- величину циклової подачі;
- кут випередження подачі палива.

У традиційних ПНВТ регулювання зазначених параметрів здійснюється, як правило, шляхом повороту плунжера з відсічною кромкою, що ускладнює конструкцію і призводить до додаткових перекосів та зношування прецизійних поверхонь. У запропонованій конструкції однофазна діаграма використовується як теоретична основа, на базі якої реалізовано багатofазний принцип роботи.

Подальшим розвитком однофазної моделі є багатофазна діаграма, наведена на рисунку 3.4. На ній показано кілька синусоїдальних кривих, кожна з яких відповідає окремому плунжеру. Криві зсунуті між собою по фазі на кут $2\pi/m$.

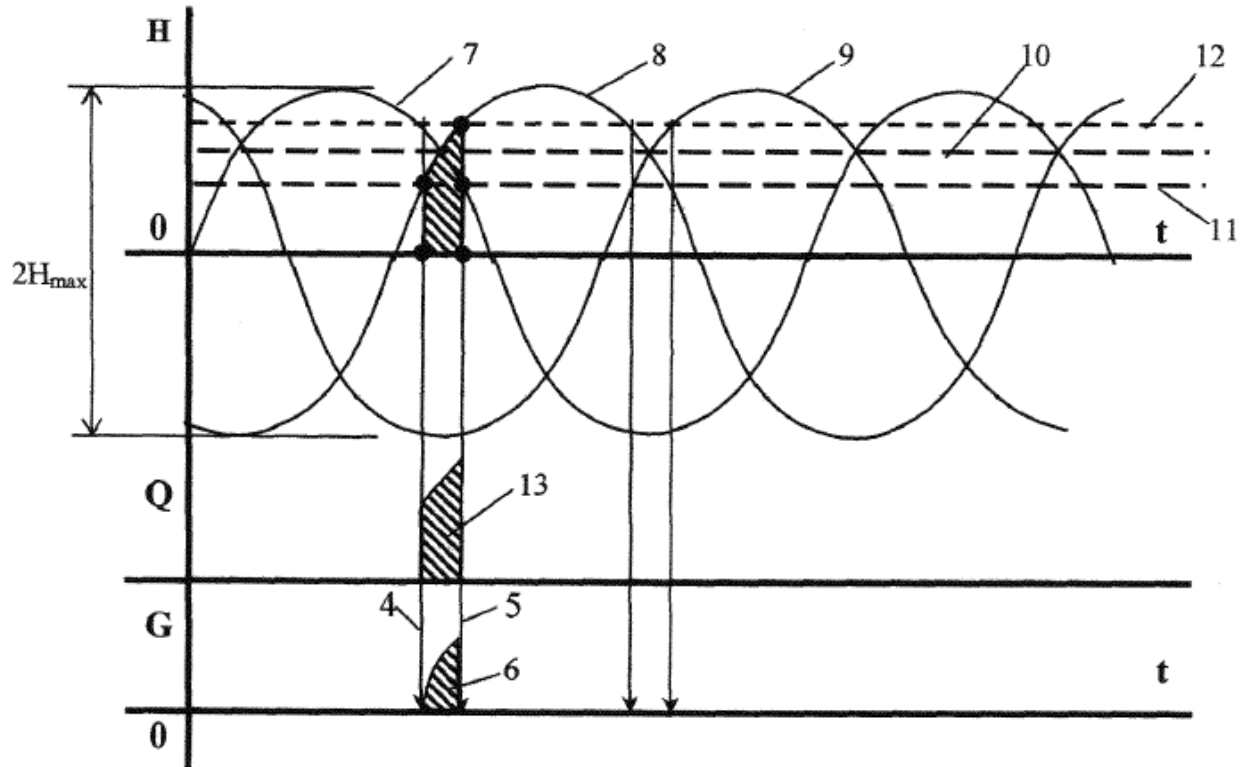


Рисунок 3.4 – Багатофазна діаграма роботи плунжера

Багатофазна діаграма дозволяє наочно простежити попарну взаємодію плунжерів у кільцевій схемі та визначити моменти, коли один плунжер виконує функцію наповнення, а інший — функцію нагнітання. Саме в такому представленні стає можливим принципово інший підхід до регулювання подачі палива.

Регулювання моменту подачі палива здійснюється зсувом багатофазної діаграми по осі часу відносно робочого циклу двигуна. Регулювання циклової подачі реалізується зсувом діаграми по осі переміщень відносно граничних ліній імпульсу та відсічки. Завдяки цьому відпадає необхідність у механічному повороті плунжерів, що істотно підвищує надійність і довговічність насоса.

Конструктивна схема запропонованого ПНВТ наведена на рисунку 3.5. У спільному корпусі розміщені гільзи з плунжерами, які приводяться в дію кулачковим валом. У корпусі також виконані канали підведення палива низького тиску до надплунжерних порожнин та канали високого тиску, що з'єднують надплунжерні простори з форсунками.

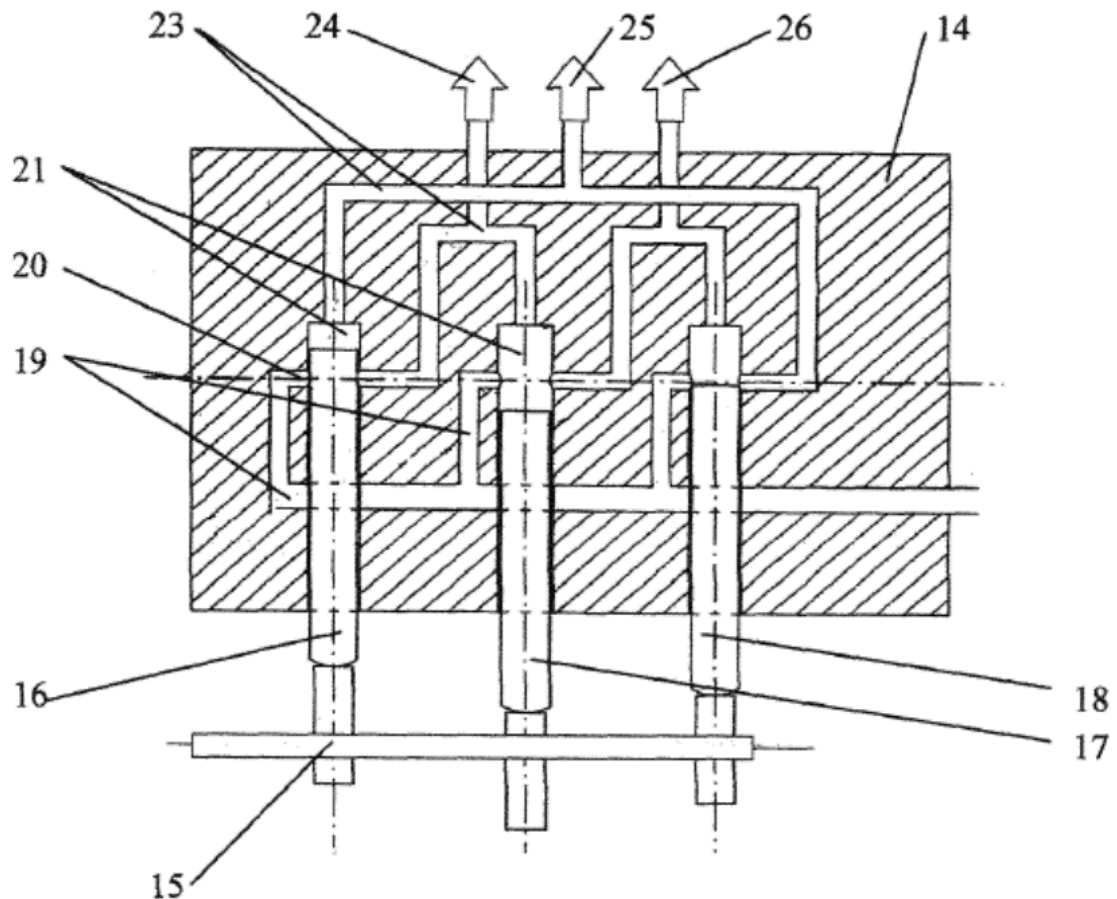


Рисунок 3.5 – Конструктивна схема ПНВТ

Характерною особливістю конструкції є те, що одна форсунка функціонально пов'язана з двома плунжерами, які працюють у парі. Це дозволяє реалізувати кільцеву схему паливоподачі без ускладнення конструкції та без застосування додаткових клапанних вузлів.

На рисунку 3.6 наведено поперечний переріз корпусу ПНВТ у зоні розташування наповнювальних і відсічних отворів. Відстань від верхньої мертвої точки плунжера до цих отворів вибирається з урахуванням умов реалізації або припинення подачі палива.

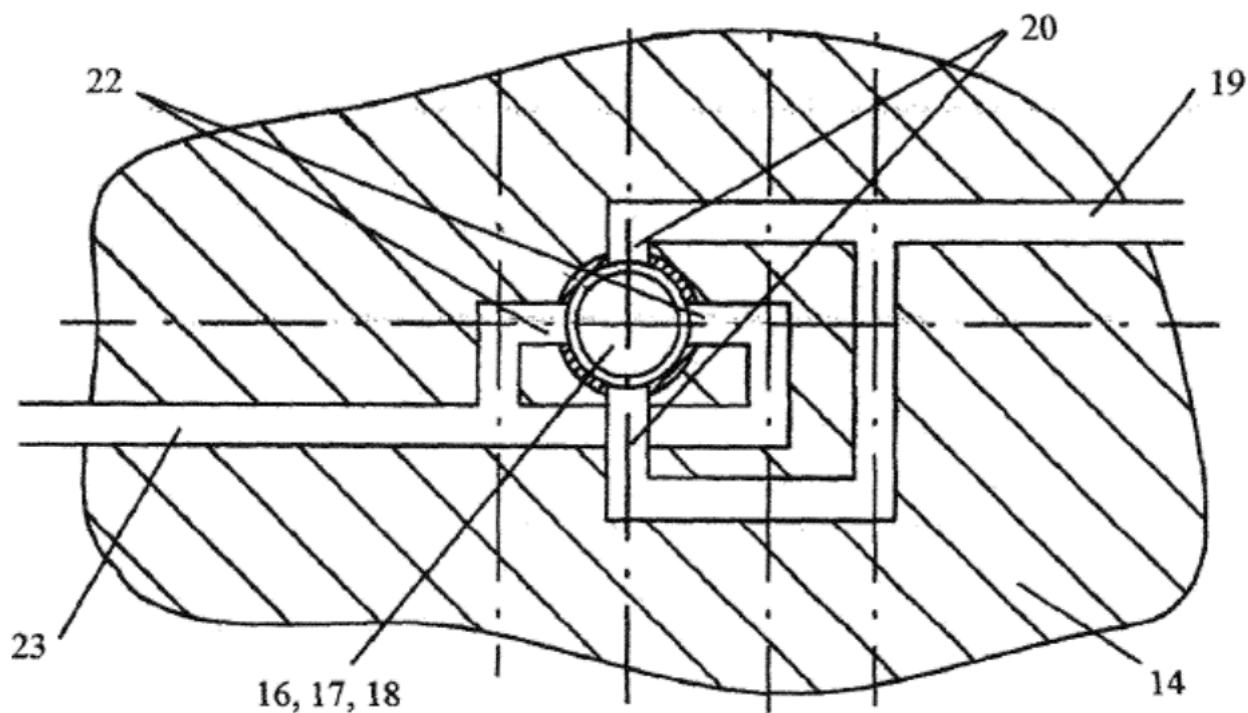


Рисунок 3.6 – Поперечний переріз корпусу ПНВТ

Таке конструктивне рішення забезпечує:

- чітке формування фаз наповнення, нагнітання та відсічки;
- стабільну роботу ПНВТ на перехідних режимах;
- зменшення чутливості насоса до зносу прецизійних пар.

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що запропонована конструкція паливного насоса високого тиску є ефективним напрямом удосконалення паливних систем дизельних двигунів. Реалізація багатофазної організації роботи плунжерів і кільцевої схеми паливоподачі дозволяє суттєво підвищити надійність, стабільність і ресурс паливної апаратури, а також розширити можливості застосування альтернативних видів палива.

Згідно дослідних даних при використанні системи з вдосконаленою конструкцією ПНВТ [8] питома ефективна витрата палива зменшується на 1% (в нашому випадку на 2 г/(кВт×год) – з 181 до 179 г/(кВт×год)).

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Мета дослідження полягає в аналітичному обґрунтуванні економічної доцільності використання вдосконаленого ПНВТ в двигуні.

У таблиці 4.1 приведені техніко-економічні показники двигуна 6ЧН 33/38 (YANMAR 6N330LW)

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні показники двигуна

Найменування	Позначення	Розмірність	Базовий двигун	Спроектований двигун
Потужність	N_e	кВт	2650	2650
Частота обертання	n	хв^{-1}	720	720
Діаметр циліндра, м	D	м	0,33	0,33
Хід поршня, м	S	м	0,38	0,38
Питома витрата палива	g_{ep}	кг/кВт·год	0,181	0,179
Механічний ккд	η_m	-	0,94	0,94
Питома витрата масла	g_m	кг/кВт·год	0,0022	0,0022
Ціна двигуна	C	грн	4000000	4200000
Ціна палива	C_{π}	грн/кг	60	60
Ціна масла	C_m	грн/кг	50	50
Час роботи за рік	t	год	600	600
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.25.12.00.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	1351500,0	1351500,0
Термін служби	T	рік	10,0	10,0
Річні поточні витрати на паливо	Z_p	грн	14677290,0	14515110,0
Річні поточні витрати на масло	Z_m	грн	148665,0	148665,0
Річні витрати на поточний ремонт	$Z_{п.р}$	грн	4000,0	4200,0
Річні витрати на капітальний ремонт	$Z_{к.р}$	грн	6545,5	6872,7
Річний економічний ефект у споживача	U_1	грн	14836500,5	14674847,7
	U_1^{16}	грн	14836500,5	-
Річний економічний ефект у споживача від використання спроектованого двигуна	E_k	грн	546089,5	
Додаткові одноразові витрати на модернізацію двигуна	ΔK	грн	200000,0	
Річна економія при експлуатації модернізованого двигуна	ΔS	грн	161652,7	
Час окупності модернізованого двигуна	$T_{окуп}$	рік	1,24	
		місяць	14,85	

Річний економічний ефект спроектованого двигуна в порівнянні з базовим двигуном за рахунок використанням вдосконаленої конструкції ПНВТ у розмірі 5460989,5 грн. Заміна базового двигуна окупиться приблизно за 15 місяців.

РОЗДІЛ 5

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації, технічного обслуговування та ремонту паливного насоса високого тиску суднового дизель-генератора є однією з найважливіших складових системи охорони праці на судні. Паливний насос високого тиску є ключовим елементом паливної апаратури дизельного двигуна, від технічного стану якого безпосередньо залежать надійність роботи дизель-генератора, економічні показники його експлуатації, рівень шкідливих викидів та загальна безпека суднової енергетичної установки.

Особливістю паливного насоса високого тиску є робота в умовах надвисоких тисків, значних циклічних механічних навантажень, підвищених температур та контакту з легкозаймистими і токсичними речовинами. У процесі експлуатації та обслуговування ПНВТ персонал зазнає впливу цілого комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких домінуючими є високий тиск палива, можливість його витоків, пожежо- та вибухонебезпека, підвищений рівень шуму і вібрації, а також ризик травмування рухомими частинами приводу насоса.

Питання охорони праці при роботі з паливними насосами високого тиску на суднових дизель-генераторах набувають особливої актуальності з огляду на сучасні тенденції підвищення тисків упорскування, ускладнення конструкцій паливної апаратури та зростання вимог до екологічних показників суднових енергетичних установок. У зв'язку з цим система заходів з охорони праці повинна бути комплексною, системною та враховувати як технічні, так і організаційні та екологічні аспекти.

Під час експлуатації паливного насоса високого тиску основними вимогами охорони праці є дотримання встановлених режимів роботи дизель-генератора, контроль параметрів паливної системи та недопущення

					<i>КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

експлуатації обладнання у несправному стані. Обслуговуючий персонал повинен постійно контролювати тиск палива, рівномірність подачі по секціях, температуру корпусу насоса, стан з'єднань паливопроводів та відсутність підтікання палива. Навіть незначні витоки дизельного палива створюють небезпеку займання, особливо в умовах обмеженого простору машинного відділення та наявності нагрітих поверхонь.

Особливу загрозу для життя і здоров'я обслуговуючого персоналу становить струмінь палива під високим тиском, який при пошкодженні трубопроводу або з'єднання може проникати під шкіру людини, спричиняючи тяжкі травми та отруєння. У зв'язку з цим суворо забороняється виконувати будь-які роботи з огляду або перевірки паливної апаратури при працюючому дизель-генераторі. Усі операції з контролю технічного стану ПНВТ повинні виконуватися тільки після повної зупинки двигуна, скидання тиску в системі та перекриття подачі палива [9].

Важливим елементом забезпечення охорони праці при експлуатації паливного насоса високого тиску є організація робочого місця та дотримання вимог до персоналу. Особи, допущені до роботи з паливною апаратурою, повинні мати відповідну професійну підготовку, пройти первинний, повторний та позаплановий інструктажі з охорони праці, а також бути ознайомлені з конструкцією конкретного типу ПНВТ. Недостатня кваліфікація або формальний підхід до інструктажів значно підвищують ризик аварійних ситуацій та виробничого травматизму.

Технічне обслуговування паливного насоса високого тиску передбачає виконання регламентованих робіт з очищення, перевірки, регулювання та контролю зносу його елементів. З погляду охорони праці особливу увагу слід приділяти підготовці обладнання до обслуговування. Перед початком робіт дизель-генератор повинен бути повністю зупинений, відключений від електричної мережі, а на пускових пристроях вивішені заборонні плакати.

					<i>КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Паливна система має бути розгерметизована та звільнена від залишкового тиску, що є обов'язковою умовою безпечного виконання робіт.

У процесі обслуговування ПНВТ персонал повинен використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема спецодяг, захисні рукавиці, окуляри та засоби захисту органів дихання у разі можливого випаровування палива. Особливе значення має підтримання чистоти, оскільки навіть незначне забруднення може призвести до пошкодження прецизійних пар насоса, його заклинювання або нерівномірної подачі палива. Застосування брудного або несправного інструменту не допускається, оскільки це створює додаткову небезпеку як для обладнання, так і для персоналу.

Ремонт паливного насоса високого тиску є найбільш відповідальним та небезпечним видом робіт, що вимагає суворого дотримання вимог охорони праці. Ремонтні роботи дозволяється виконувати лише в умовах спеціально обладнаних майстерень або ремонтних постів, що мають ефективну вентиляцію, пожежну сигналізацію та необхідні засоби пожежогасіння. Перед розбиранням насоса необхідно повністю злити паливо, очистити поверхні від забруднень та забезпечити безпечне зберігання знятих деталей.

У процесі розбирання та складання ПНВТ особливу небезпеку становлять пружні елементи, кулачкові механізми та рухомі деталі, які можуть раптово переміщуватися під дією залишкових сил. Усі операції повинні виконуватися у визначеній технологічній послідовності з використанням спеціального інструменту та пристосувань. Забороняється застосування ударних методів, нагрівання деталей відкритим полум'ям або використання саморобних пристроїв.

Важливою складовою системи охорони праці при роботі з паливним насосом високого тиску є забезпечення пожежної безпеки. Дизельне паливо є пожежонебезпечною речовиною, а витіки палива в поєднанні з нагрітими поверхнями та електрообладнанням створюють високий ризик займання. У машинних приміщеннях повинні бути справні стаціонарні та переносні засоби

					<i>КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

пожежогасіння, а персонал зобов'язаний знати порядок дій у разі виникнення пожежі, пов'язаної з паливною апаратурою.

Окреме місце в системі безпеки займають питання екологічної безпеки при експлуатації, обслуговуванні та ремонті паливного насоса високого тиску. Порушення герметичності паливної системи призводить не лише до небезпеки пожежі, а й до забруднення навколишнього середовища дизельним паливом, яке є токсичною речовиною та має тривалий негативний вплив на водні та ґрунтові екосистеми. Умови суднової експлуатації вимагають особливої уваги до недопущення потрапляння нафтопродуктів у море або внутрішні водні шляхи.

Під час виконання робіт з ПНВТ усі операції зі зливу, збору та тимчасового зберігання палива повинні здійснюватися із застосуванням герметичних ємностей і піддонів. Забороняється злив дизельного палива в трюмні води або за борт судна. Забруднені паливом ганчір'я, фільтрувальні елементи та абсорбенти підлягають збору та утилізації відповідно до вимог екологічної безпеки і міжнародних конвенцій, зокрема MARPOL.

Екологічні аспекти експлуатації паливного насоса високого тиску тісно пов'язані з технічним станом насоса та якістю паливоподачі. Несправний або неправильно відрегульований ПНВТ призводить до порушення процесу згоряння, збільшення питомої витрати палива та зростання викидів оксидів азоту, сажі та незгорілих вуглеводнів. Таким чином, своєчасне обслуговування та ремонт паливного насоса є не лише заходом з охорони праці, а й важливим чинником зниження негативного впливу суднової енергетичної установки на навколишнє середовище.

У процесі ремонту та регулювання ПНВТ необхідно забезпечувати точне дотримання параметрів подачі палива, рівномірність роботи секцій та герметичність з'єднань. Це дозволяє зменшити кількість шкідливих викидів, покращити економічні показники дизель-генератора та знизити екологічні ризики. Контроль екологічних показників роботи дизель-генератора після

					<i>KPM.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ремонту паливної апаратури є важливою складовою загальної системи безпеки судна.

Таким чином, забезпечення вимог охорони праці та екологічної безпеки при експлуатації, обслуговуванні та ремонті паливного насоса високого тиску суднового дизель-генератора є комплексним завданням, що поєднує технічні, організаційні, санітарно-гігієнічні та природоохоронні заходи. Системний підхід до охорони праці, належна підготовка персоналу, дотримання регламентів технічного обслуговування та суворе виконання екологічних вимог дозволяють забезпечити безпечну експлуатацію суднових дизель-генераторів, знизити ризик аварійних ситуацій і мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

					<i>КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на підвищення ефективності роботи паливної системи суднового дизель-генератора шляхом удосконалення конструкції паливного насоса високого тиску. Актуальність обраної теми зумовлена зростанням вимог до паливної економічності, надійності та екологічної безпеки суднових енергетичних установок, а також необхідністю забезпечення стабільної роботи двигунів в умовах використання сучасних палив і жорстких міжнародних екологічних норм.

У ході виконання роботи проаналізовано особливості експлуатації суднового дизель-генератора з двигуном 6ЧН 33/38 на контейнеровозі MOL CREATION та визначено роль паливної системи у формуванні техніко-економічних і екологічних показників енергетичної установки. Встановлено, що саме паливний насос високого тиску є ключовим елементом паливної апаратури, від якого значною мірою залежать точність дозування палива, стабільність параметрів упорскування, рівномірність навантаження циліндрів і ресурс двигуна.

Проведений аналіз сучасних способів покращення роботи паливних систем суднових двигунів показав, що застосування електронно-керованих систем упорскування, удосконалення форсунок, підвищення якості підготовки палива, використання гомогенізаторів, емульгаторів, альтернативних і комбінованих палив, а також впровадження систем автоматичного керування та діагностики суттєво розширюють можливості оптимізації робочого процесу. Водночас встановлено, що ефективність зазначених заходів значною мірою залежить від стабільності створення високого тиску та точності подачі палива, що підтверджує визначальну роль паливного насоса високого тиску у паливній системі.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У роботі запропоновано конструктивні рішення з удосконалення паливного насоса високого тиску двигуна 6ЧН 33/38, спрямовані на підвищення точності дозування палива, зменшення внутрішніх витоків, підвищення зносостійкості плунжерних пар і стабільності роботи насоса на різних режимах навантаження. Запропоновані технічні рішення сприяють покращенню процесу упорскування та згоряння палива, зниженню питомої витрати палива та підвищенню експлуатаційної надійності дизель-генератора.

Виконане економічне обґрунтування показало доцільність упровадження запропонованого удосконалення конструкції ПНВТ. Отримані результати свідчать, що модернізація паливного насоса дозволяє знизити експлуатаційні витрати за рахунок покращення паливної економічності та збільшення міжремонтних інтервалів, що є важливим чинником підвищення конкурентоспроможності суднових енергетичних установок.

Окрему увагу в роботі приділено питанням забезпечення вимог охорони праці та екологічної безпеки при експлуатації, обслуговуванні та ремонті паливного насоса високого тиску. Проаналізовано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з роботою паливної апаратури, та запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на зниження ризику виробничого травматизму, пожеж і аварійних ситуацій. Показано, що належний технічний стан ПНВТ і дотримання регламентів його обслуговування є важливими не лише з точки зору безпеки праці, а й з позицій зменшення негативного впливу суднових двигунів на навколишнє середовище.

					КРМ.142.6221м.25.12.00.ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Significant ships of 2007. The Royal Institution of Naval Architects, 2007. pp. 78 - 79.
2. OPERATION MANUAL Diesel Engine Yanmar 6N-330, 2004. 116 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.25.12.00.ПЗ</i>	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		