

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»
В.о. завідувача кафедри
Олексій ГОГОРЕНКО

« ____ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

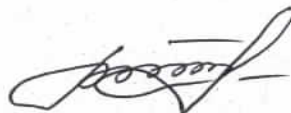
ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ГОЛОВНОГО ДВИГУН НА РЕЖИМАХ ЧАСТКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Освітня програма – Двигуни внутрішнього згоряння

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи



Василь НАЛИВАЙКО

Здобувач освіти



Олексій ГАВРИЛЮК

Миколаїв 2024

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ДВЗ, У та ТЕ
Олексій ГОГОРЕНКО

« » 20 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

Гаврилюк Олексій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Покращення показників роботи головного двигун на режимах часткових навантажень

2. Керівник роботи к.т.н., доц. Наливайко В.С.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ ” 20 року №

3. Строк подання здобувачем роботи

4. Вихідні дані до роботи Двигун – МАК 7М43С; паливо – дизельне, водень;
потужність двигуна – 6300 кВт, частота обертання колінчастого валу – 500 хв⁻¹

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Застосування двигуна МАК 7М43С на танкері "FURE NORD"; Визначення напрямків модернізації двигуна для покращення його екологічних характеристик на режимах часткових навантажень; Розробка системи подачі та отримання водню на борту судна; Забезпечення вимог охорони праці; Економічне обґрунтування

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Машинне відділення танкера "FURE NORD"; Поперечний переріз двигуна МАК
7М43С; Схема отримання і подачі водню до двигуна; Схема паливної системи
двигуна; Електромагнітний клапан подачі водню

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

_____	<i>Олексій ГАВРИЛЮК</i>
(підпис)	(прізвище та ініціали)
_____	<i>Василь НАЛИВАЙКО</i>
(підпис)	(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній розроблений комплекс заходів щодо покращення екологічних показників роботи двигуна МАК 7М43С шляхом використання добавок водню. Розглянуто економічний ефект від модернізації. Наведені заходи щодо забезпечення охорони праці.

Кваліфікаційна робота виконана українською мовою на 68 сторінках розрахунково-пояснювальної записки. Використано 10 джерел. Графічна частина представлена на 5 кресленнях формату А1.

Ключові слова: екологічні параметри, випускні гази, часткове навантаження, водень.

The qualification work presents a set of measures to improve the environmental performance of the MAK 7M43S engine by using hydrogen additives. The economic effect of the modernization is analyzed. Measures to ensure occupational safety are also provided.

The qualification work is executed in Ukrainian language on 68 pages of explanatory note. 10 sources are used. The graphic part is presented on 5 drawings of format A1.

Key words: environmental parameters, exhaust gases, partial load, hydrogen.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						2
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Застосування двигуна МАК 7М43С на танкері "FURE NORD"	5
Розділ 2. Визначення напрямків модернізації двигуна для покращення його екологічних характеристик на режимах часткових навантажень....	18
Розділ 3. Розробка системи подачі та отримання водню на борту судна...	32
Розділ 4. Економічне обґрунтування впровадження модернізації.....	52
Розділ 5. Забезпечення вимог охорони праці.....	56
Висновки.....	62
Список використаної літератури.....	63
Додаток А. Машинне відділення танкера "FURE NORD".....	64
Додаток Б. Поперечний переріз двигуна МАК 7М43С.....	65
Додаток В. Схема отримання і подачі водню до двигуна.....	66
Додаток Г. Схема паливної системи двигуна.....	67
Додаток Д. Електромагнітний клапан подачі водню.....	68

ВСТУП

У зв'язку з майбутнім посиленням норм щодо викидів, постала потреба в розробці спеціальних методів зменшення шкідливих викидів від випускних газів дизельних двигунів. Найбільш поширеним підходом у морському флоті стали первинні методи зниження викидів NO_x , які базуються на зволоженні повітряного заряду. Проте ці методи мають низку недоліків: підвищення питомої витрати палива, зростання димності вихлопу, зниження температури вихлопних газів, висока вартість, значні розміри та маса систем. Завдання зменшення токсичності вихлопних газів ускладнюється тим, що зазвичай потрібно одночасно скорочувати викиди кількох токсичних компонентів. Крім того, реалізація деяких методів зниження NO_x часто призводить до погіршення паливної ефективності, що зазвичай є неприйнятним.

Мета даної роботи – розробити умови по поліпшенню екологічних показників головного двигуна танкера "FURE NORD" на режимах часткових навантажень шляхом використання домішок водню до основного палива.

Задачі що вирішуються у роботі:

1. Проведення комплексного аналізу для визначення напрямків модернізації двигуна для покращення його екологічних характеристик на режимах часткових навантажень.
2. Розробка системи подачі та отримання водню на борту судна.
3. Оцінити запропоновані рішення, технічні рекомендації та заходи з техніки безпеки.

Об'єкт дослідження – двигун.

Предмет дослідження – параметри роботи двигуна на режимах часткових навантажень.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						4
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1
ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА МАК 7M43C НА ТАНКЕРІ
"FURE NORD"

Компанія Fartygskonstruktioner AB була однією з перших європейських конструкторських бюро, які вийшли на зростаючий китайський суднобудівний ринок, і зі своєї бази в Уддеваллі, де колись розташовувалася одна з провідних шведських верфей, представив цікавий портфель проектів, зокрема танкерів для перевезення продуктів, для клієнтів, які підписують контракти в Китайській Народній Республіці.

Fure Nord (рис. 1.1 – 1.2, табл. 1.1) є середнім прикладом такого типу суден і має двокорпусну конструкцію, в якій вантажний простір розділений на шість пар вантажних танків поперечними і центральними перегородками [1]. Дві трюми для зливу осаду розташовані в подовженому форштевні, над верхньою палубою, на якій знаходиться циліндричний вантажний зливний танк об'ємом 40 м³. Завдяки тому, що всі палубні ребра жорсткості винесені назовні на верхню палубу, а бічні і нижній шпангоути знаходяться всередині подвійного корпусу, вантажні танки мають внутрішні поверхні, що легко очищаються, на які нанесено покриття International Interline. Очищення танків здійснюється за допомогою 26 стаціонарних і двох портативних установок Scanjet.

Вантаж обробляється 12 занурювальними насосами Framo з гідравлічним приводом, кожен з яких має продуктивність 330 м³/год, а два аналогічних насоси продуктивністю 100 м³/год обслуговують резервуари для осаду. Також доступний портативний насос продуктивністю 70 м³/год. Можна перевозити шість класів вантажу, а одночасне завантаження щонайменше двох танків через будь-який вантажний перехід можливе зі швидкістю 1200 м³/год.

					<i>KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ</i>	Аркуш
						5
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Швидкість розвантаження – 2000 м³/год. Індивідуальні палубні лінії завантаження/розвантаження з'єднують кожну вантажну цистерну з колектором міделів, і в кожній цистерні є окремі зливні лінії.

Гальмові танки також мають окремі всмоктувальні та зливні трубопроводи, а також по одному з'єднанню з вантажним колектором і за бортом. Бічні, подвійне дно і носова пікова цистерни призначені для водяного баласту, який подається двома зануреними насосами Framo продуктивністю 500 м³/год. Встановлено мазутну систему опалення з первинним теплом від двох мазутних котлів і одного котла, що працює на вихлопних газах. Бічні танки в носовій частині машинного відділення, P&S, служать бункерами і відстійниками, і захищені з боку корпусу перемичками, призначеними для резервуарів технічної води, а в носовій частині – порожнечами.

Конструкція Fure Nord має подовжений форштевень, на якому побудований великий хвилеріз, що захищає швартовне обладнання від стихійних явищ. Трап над верхньою палубою забезпечує зв'язок з рубкою, де розташовані машинне відділення та майстерні та склади. Вище розташовані чотири житлові приміщення і рульова рубка на всю ширину судна з навігаційним і контрольним обладнанням, включаючи системи рівня і сигналізації Saab, а також комп'ютер навантаження Nara.

Головну рушійну установку забезпечує один середньообертовий дизельний двигун MAK 7M43 потужністю 6300 кВт при 500 об/хв, з'єднаний через редуктор Renk з гребним гвинтом CP Kamewa з високим нахилом, виготовленим з нержавіючої сталі, що працює зі швидкістю 118 об/хв. Відбір потужності від редуктора з'єднаний з генератором змінного струму потужністю 1000 кВт, а також з трьома дизельними генераторами змінного струму Volvo/Newage Stamford, кожен з яких виробляє 750 кВт. В носовій частині встановлено висувний азимутальний рушій Brunvoll, а кермо – типу Schilling Mariner з криголамом, вбудованим в кормову раму.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Танкер «FURE NORD»

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		7

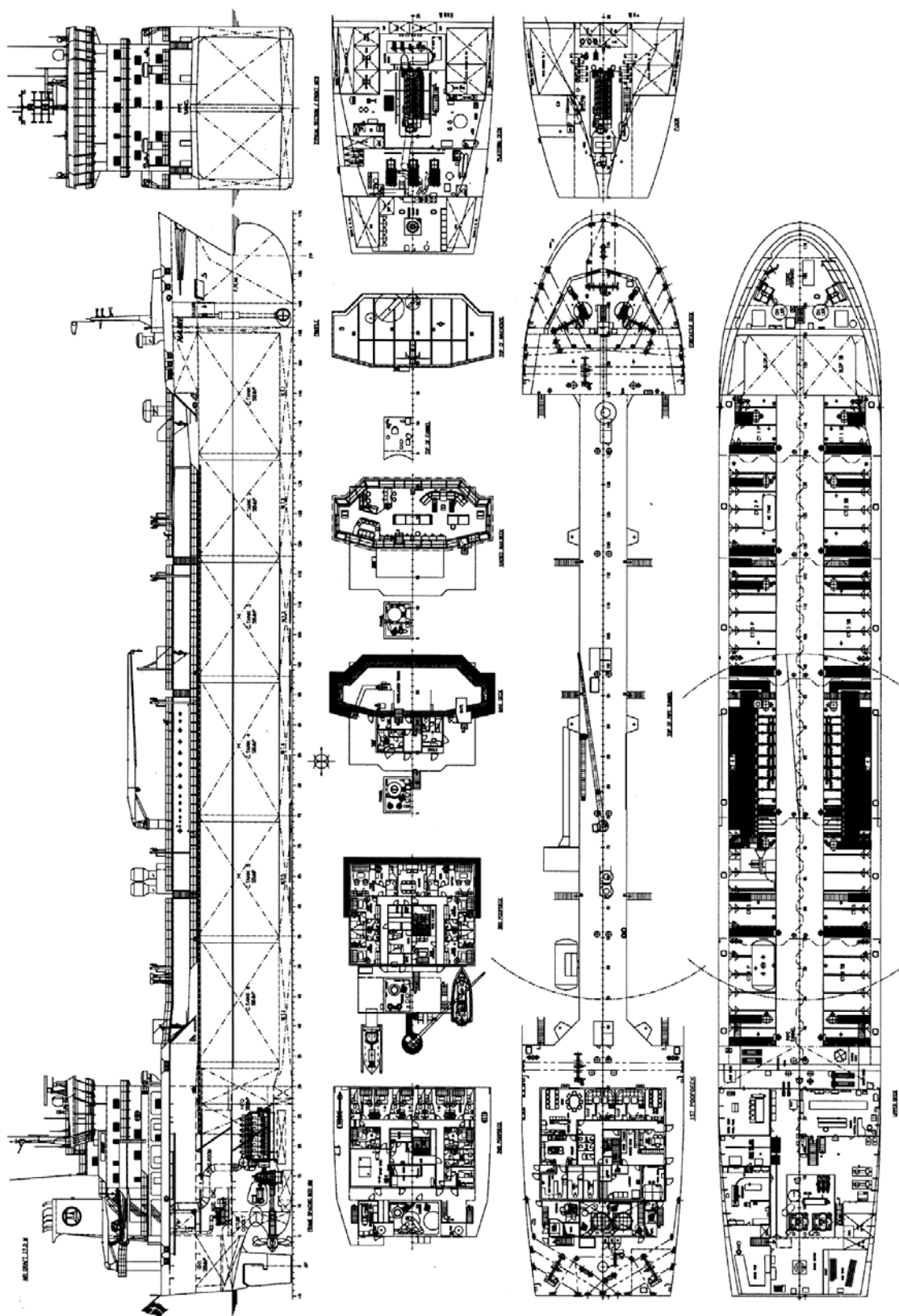


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд танкера «FURE NORD»

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ

Аркуш

8

Судно ходить під прапором Ліберії. Позивний судна – 5LPQ4. MMSI – 636023832. IMO – 9271884.

Таблиця 1.1 – Головні характеристики судна

Параметр	Значення
Довжина максимальна, м	144,00
Довжина між перпендикулярами, м	134,40
Ширина найбільша, м	21,50
Проектна осадка, м	8,00
Дедвейт, т	13200
Швидкість судна, вуз	15,50
Повна водотоннажність судна, т	21556

Опис двигуна МАК 7М43С

МАК 7М43С (рис. 1.3 – 1.4) це чотиритактний дизельний двигун, нереверсивний, з турбонаддувом, водяним охолодженням і з прямим впорскуванням палива [2].

Конфігурація: 7 – рядний;

Діаметр циліндра: 430 мм;

Хід поршня: 610 мм;

Циліндрична потужність: 900 кВт;

Частота обертання колінчастого вала: 500 об/хв.;

Середня швидкість поршня: 10,2 м/с;

Висота двигуна: 6566 мм;

Довжина двигуна: 8981 мм;

Ширина двигуна: 2904 мм;

Середній ефективний тиск: 2,44 МПа.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Під час розробки двигуна основна увага приділялася підвищенню ефективності його використання за такими напрямками:

- експлуатаційна надійність: забезпечена завдяки зменшенню корозії, механічного зносу, кількості з'єднань, що знижує ризик виникнення дефектів;
- низькі експлуатаційні витрати: досягнуті завдяки невеликій витраті палива, можливості використання важкого палива, мінімальній витраті масла на чад, довговічності деталей, простоті монтажу та обслуговування, використанню нескладних штекерних з'єднань і зменшенню трудомісткості обслуговування;
- оптимальний екологічний режим: відповідає вимогам міжнародних стандартів завдяки таким технічним рішенням, як оптимізація конструкції камери згоряння, систем наддуву, уприскування палива та використання великого ходу поршня.

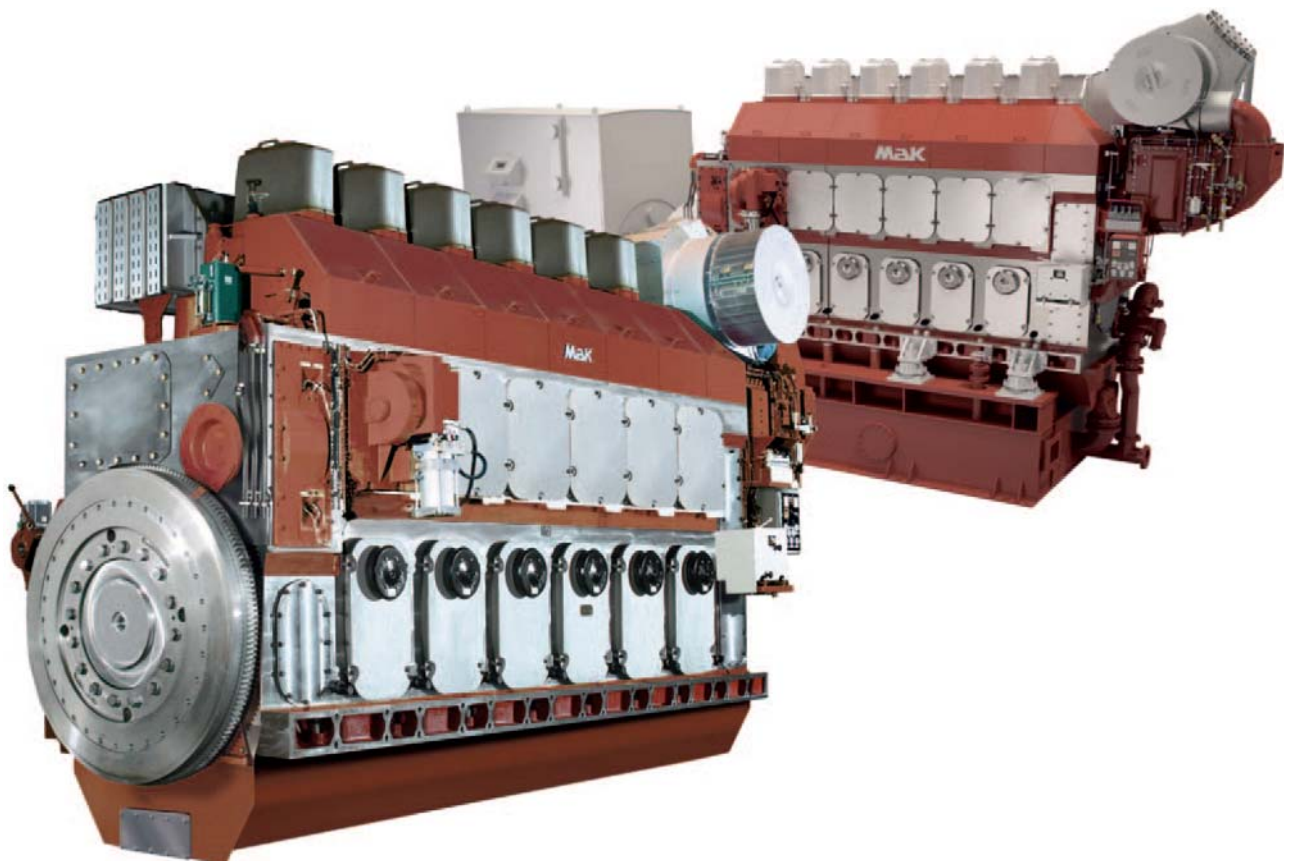


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд двигуна МАК М43

					<i>KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ</i>	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		10

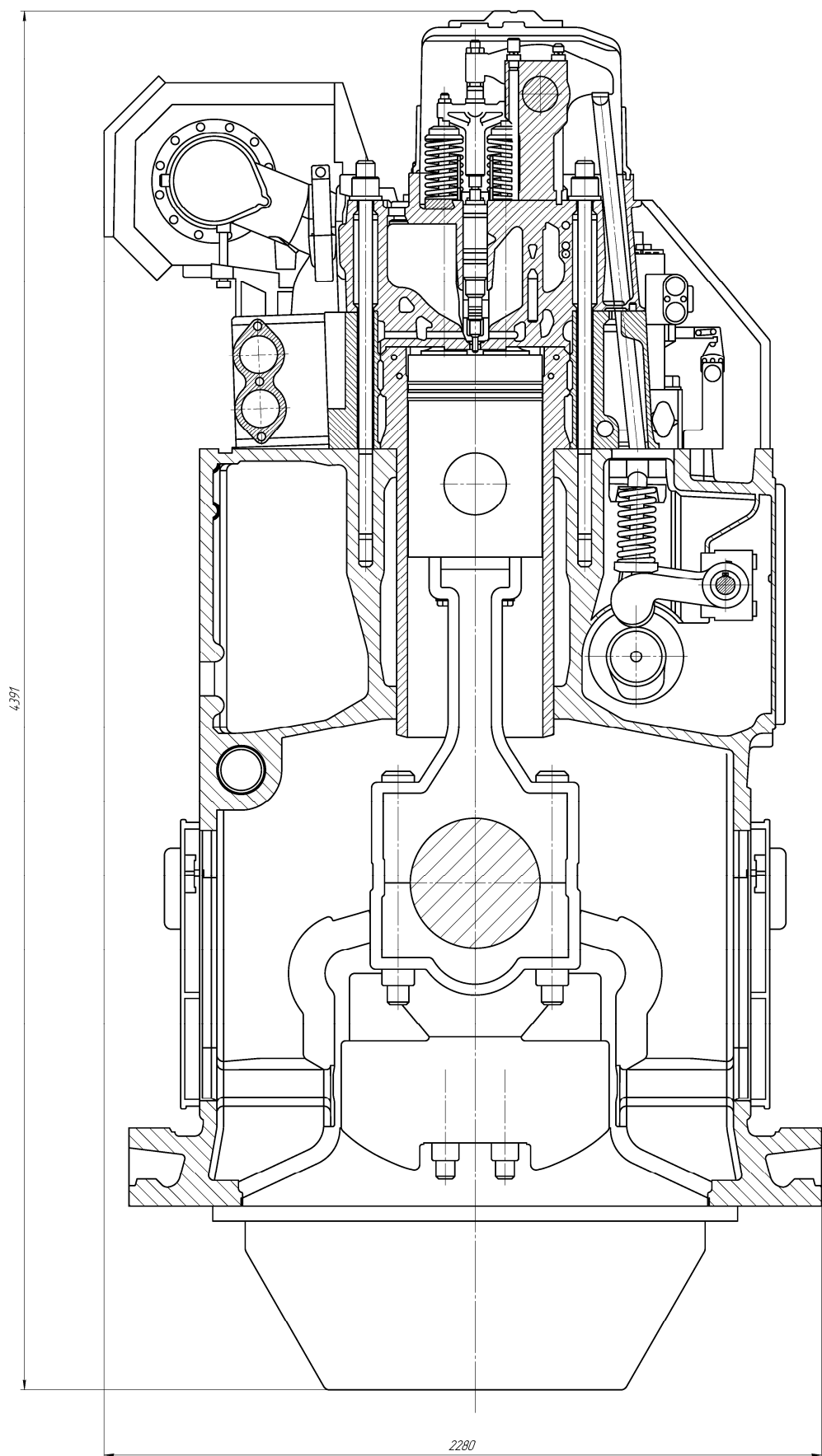


Рисунок 1.4 – Поперечний перетин двигуна МАК 7М43

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ

Аркуш

11

Основний принцип конструкції двигуна 7М43 — надійність і простота. Двигун розроблявся таким чином, щоб забезпечити можливість подальшого підвищення середнього ефективного тиску та збільшення циліндрової й агрегатної потужностей без змін таких ключових елементів, як розміри підшипників, товщина стінок, діаметри валів, шестерень тощо. Принцип «інтелігентної простоти» яскраво втілено в скороченні кількості вузлів. Завдяки високій інтеграції функцій у компоненти конструкції потреба в деталях, зокрема трубопроводах, зменшена приблизно на 40 % порівняно з традиційними двигунами. Це дозволяє усунути близько 40 % з'єднань, що знижує можливість виникнення дефектів і трудовитрати на монтаж та обслуговування.

Блок-картер (рис. 1.5) має жорстку конструкцію і виготовлений із чавуну з кульоподібним графітом. Поперечні різьбові з'єднання між блок-картером і кришками підшипників підвищують загальну жорсткість. Блок-картер не має каналів для охолоджувальної води, що виключає можливість виникнення корозійних пошкоджень.

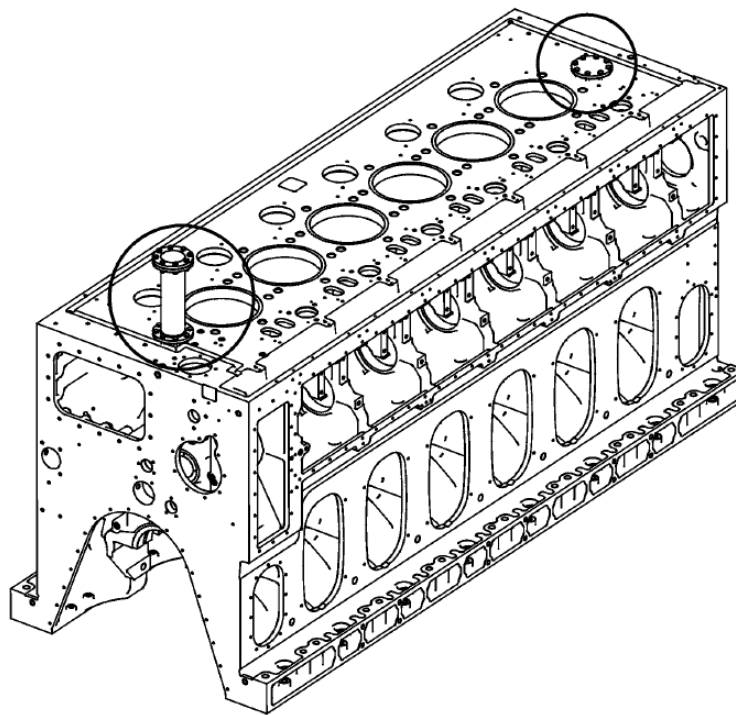


Рисунок 1.5 – Блок-картер

Втулка циліндра (рис. 1.6) охолоджується лише в найбільш критичних зонах — у верхній частині навколо камери згорання. Це забезпечує оптимальний теплообмін саме там, де це найбільш необхідно. Канал наддувного повітря інтегровано безпосередньо в блок-картер. Повітря для наддуву транспортується через канали блоку-картера та сорочку водяного охолодження у кришці циліндра до впускних клапанів. Ця конструктивна особливість дозволяє уникнути необхідності монтажу чи демонтажу трубопроводів наддувного повітря під час проведення робіт на кришці циліндра. Таким чином, усувається ризик утворення нещільностей у з'єднаннях трубопроводу або його пошкодження, що підвищує надійність і знижує трудовитрати під час обслуговування.

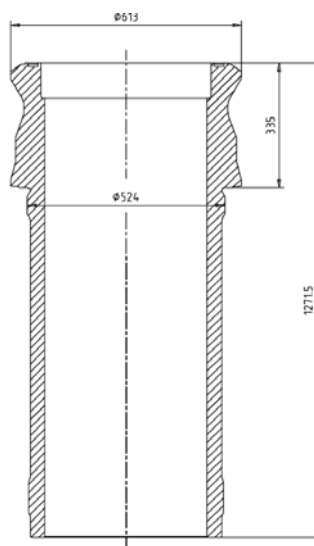


Рисунок 1.6 – Втулка циліндра

Розподільний вал (рис. 1.7) інтегрований у блок-картер, що спрощує конструкцію та підвищує її компактність. Для зменшення тертя та зносу штовхальники клапанів і паливні насоси високого тиску (ПНВТ) приводяться в дію через проміжні важелі. Ці важелі мають можливість легкої регуляції, що дозволяє змінювати час відкриття клапанів або зсувати момент упорскування палива. Регулювання здійснюється шляхом установки важелів на валу з ексцентриком або за допомогою елементів електронного управління. Такий

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

підхід забезпечує високу точність і гнучкість налаштувань у процесі експлуатації.

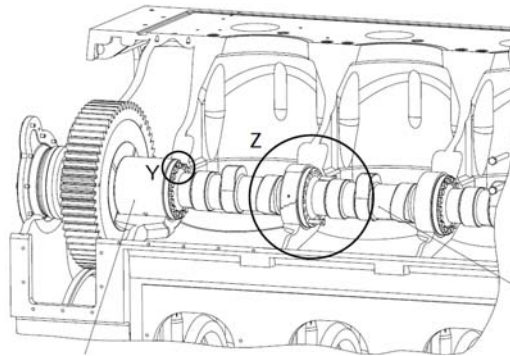


Рисунок 1.7 – Розподільний вал

Складений поршень (рис. 1.8) має конструкцію, що складається з верхньої сталевोї частини та нижньої частини з чавуну з кулеподібним графітом. Це рішення забезпечує надійну передачу зусиль і витримування тиску газів до 19 МПа і вище, відповідно до максимального тиску згоряння. У верхній частині поршня розташовані канавки для двох ущільнювальних кілець і одного маслоснімного кільця. Ці канавки проходять індукційне гартування, що підвищує їх зносостійкість. Робоча поверхня верхнього кільця покрита спеціальним захисним шаром і має відшліфовану сферичну форму. Такий підхід до конструкції канавок і кілець забезпечує тривалий термін служби поршня, а також мінімальну витрату масла, що підвищує ефективність і надійність двигуна.

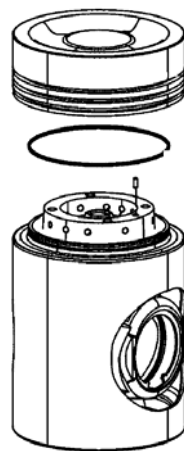


Рисунок 1.8 – Поршень

Розробка двигуна М43 включала пошук не лише у напрямку оптимізації існуючих рішень, але й реалізацію нових ідей:

1) На кришці, що закриває порожнину зубчастої передачі, замість масляного трубопроводу використано канавки. Це усуває ризик нещільностей і пошкоджень трубопроводів.

2) Насоси монтуються на панель за допомогою кріпильних болтів, що спрощує установку та виключає потребу в контролі зазору між зубами.

Двигуни М43 відзначаються простотою монтажу на судах:

1) Усі робочі середовища (паливо, змащувальне масло, вода) підводяться з боку муфти, а трубопроводи легкодоступні.

2) Паливні та масляні фільтри монтуються безпосередньо на двигун.

3) Паливні насоси високого тиску (ПНВТ) «знають» фазу чотиритактного циклу відповідного циліндра. Це дозволяє реалізувати функцію подачі пускового повітря за допомогою ПНВТ.

Інтеграція золотникового розподільника в насос дозволила відмовитися від окремого розподільника пускового повітря і повітряних трубопроводів. Це зменшило обсяги монтажних робіт і спростило конструкцію.

Двигуни М43 поєднують в собі надійність, функціональність і зручність обслуговування, що робить їх оптимальним вибором для суднобудування.

Кришка циліндра двигуна М43 (рис. 1.9) є одним із найбільш багатофункціональних вузлів конструкції. Вона виготовлена з чавуну з кульоподібним графітом, що забезпечує високу міцність і довговічність. Особливістю конструкції кришки є подвійне днище, яке завдяки своїй формі забезпечує високу жорсткість. Ця властивість дозволяє кришці витримувати значні навантаження, що виникають під час роботи двигуна, і сприяє її надійності в експлуатації. Кришка виконує кілька важливих функцій, забезпечуючи роботу ключових систем двигуна, таких як наддув, охолодження та подача палива, що робить її центральним елементом у забезпеченні ефективної та стабільної роботи двигуна М43.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

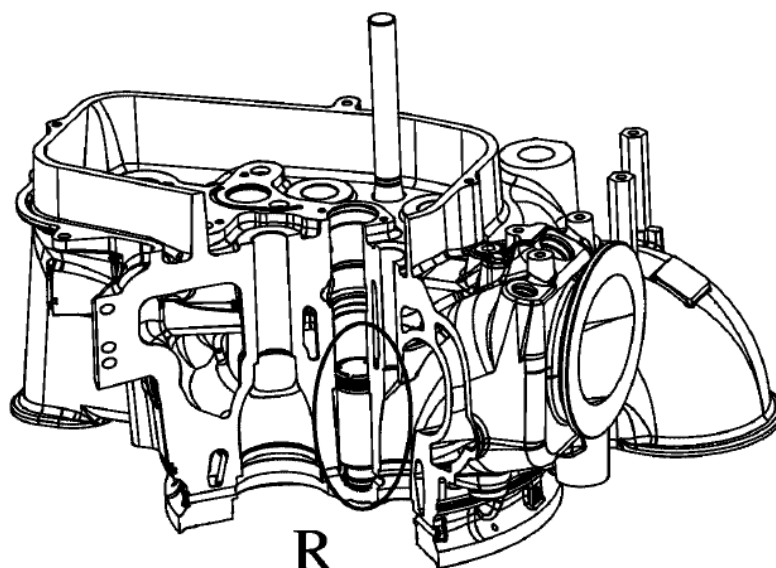


Рисунок 1.9 – Кришка циліндра

Камера згорання та випускні клапани двигуна М43 піддаються інтенсивному охолодженню, що слугує профілактикою проти високотемпературної корозії. Такий підхід забезпечує довговічність компонентів і підвищує надійність роботи двигуна в умовах високих температур. Два впускні та два випускні клапани кінематично зв'язані спільним коромислом, що значно спрощує процес налаштування зазору в приводі (рис. 1.10). Ця конструктивна особливість сприяє зручності технічного обслуговування та забезпечує стабільну роботу клапанної системи.

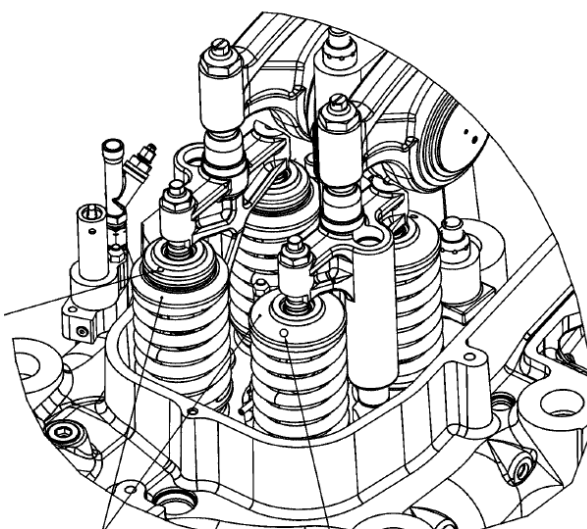


Рисунок 1.10 – Механізм газорозподілу

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ

Аркуш

16

Для уникнення зайвих витрат при монтажі трубопроводів у двигуні М43 передбачено поєднане підведення масла, води та повернення витоків палива. Простота монтажу забезпечується використанням штекерних з'єднань для цих середовищ. Радіальні входи для води та наддувного повітря у штекерних з'єднаннях дозволяють демонтувати кришку циліндра менш ніж за 30 хвилин.

Під час монтажу кришка циліндра насаджується на сорочку водяного охолодження, яка одночасно виконує функцію центрування. Фіксація кришки здійснюється чотирма болтами з використанням гідравлічного інструменту.

Конструювання двигуна М43 супроводжувалося розрахунками методом кінцевих елементів для оцінки поведінки конструкції при різних навантаженнях (частота обертання, потужність, температура). Цей підхід забезпечує високу міцність і надійність конструкції, починаючи з простих вузлів, як-от коромисло, і закінчуючи складними компонентами, такими як кришка циліндра чи блок-картер.

Двигун М43 призначений для роботи в тропічних умовах і використання важкого палива. У зв'язку з цим він піддається спеціальним тропічним випробуванням, що гарантує його ефективність і довговічність у жорстких умовах експлуатації.

Усі конструкторські рішення, реалізовані компанією МАК, спрямовані на досягнення основної концепції двигуна М43 — надійність і простота. Цей підхід дозволяє забезпечити тривалий термін служби, ефективність і зручність в експлуатації та обслуговуванні.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ ДВИГУНА ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЙОГО ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РЕЖИМАХ ЧАСТКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Відпрацьовані гази (ВГ) двигунів на 99,0...99,9% складаються з продуктів повного згоряння, зокрема діоксиду вуглецю (CO_2) і водяної пари (H_2O), а також залишкового кисню і азоту, що містяться в повітрі.

Однак залишкова частина ВГ, яка становить не більше 1% від загальної витрати газів (практично рівної витраті повітря), визначає екологічний рівень двигуна. Ця незначна частка містить шкідливі компоненти, які впливають на довкілля, зокрема на рослинний і тваринний світ, здоров'я людини, а також на стан архітектурних споруд.

Сажа є частками твердих вуглецевих продуктів, що містять до 99% чистого вуглецю. У процесі згоряння в дизельному двигуні ці частки піддаються коагуляції, формуючи вторинні та третинні структури з лінійними розмірами 0,3...100 мкм. Наявність сажі в відпрацьованих газах викликає чорний дим у вихлопі, що є суттєвим недоліком дизельних двигунів, особливо під час розгону.

Найбільша кількість сажі утворюється під час дифузійного горіння в ядрі факела дизельного палива на повних навантаженнях [3]. Це зумовлено:

- Високою місцевою концентрацією компонентів палива з високою температурою кипіння.
- Низькою концентрацією кисню ($\alpha < 0,3-0,7$).

На такті розширення частина утвореної сажі вигоряє в турбулентному полум'ї. Ступінь вигорання залежить від:

- Концентрації кисню поблизу часток.
- Температури.
- Часу перебування часток у циліндрі.

Збільшення турбулентності та вихрового руху повітряно-паливного заряду покращує перемішування пальної суміші, що призводить до інтенсифікації вигорання сажі та гальмування її утворення. Як результат, зменшується димність відпрацьованих газів. Цей ефект особливо важливий для зниження негативного впливу дизельних двигунів на довкілля та покращення їхньої екологічної ефективності.

Оксид вуглецю (CO) утворюється переважно під час згоряння палива за недостатньої кількості кисню. Крім того, незначна кількість CO може утворюватися в пристінкових шарах суміші або внаслідок дисоціації CO₂ при високих температурах.

У дизельних двигунах CO утворюється в основному в результаті:

- Реакцій холоднополуменового згоряння.
- Згоряння палива в локальних зонах із дефіцитом кисню.

Однак значна частина CO, яка утворюється, окислюється до CO₂ ще під час роботи двигуна. Унаслідок цього викиди CO з відпрацьованими газами дизельних двигунів залишаються невеликими, становлячи за об'ємом не більше 0,1...0,2%. Це є однією з причин, чому дизельні двигуни зазвичай характеризуються нижчим рівнем викидів оксиду вуглецю порівняно з бензиновими двигунами.

Вуглеводні у відпрацьованих газах утворюються з молекул палива, які не зазнали повного згоряння. У зоні поблизу стінок камери згорання температура газів є недостатньою для повного згоряння палива, тому тут полум'я гаситься, і частина палива залишається незгорілою.

Вуглеводні також можуть потрапляти у відпрацьовані гази внаслідок:

- Наявності зон у заряді з надмірно збідненою або збагаченою сумішшю.
- Пропусків займання у карбюраторних двигунах.

Присутність вуглеводнів у відпрацьованих газах дизелів є однією з причин появи білого або блакитного диму. Хоча вуглеводні в кількостях, які

викидаються в атмосферу поршневими двигунами внутрішнього згоряння, самі по собі не є надто небезпечними, вони сприяють утворенню фотохімічного смогу. Смог, утворений за участю вуглеводнів, має шкідливий вплив на здоров'я людей і довкілля. У багатьох країнах встановлені жорсткі обмеження на вміст вуглеводнів у відпрацьованих газах для запобігання утворенню смогу та зниження екологічної шкоди. Зменшення викидів вуглеводнів є важливим напрямком удосконалення двигунів, що сприяє поліпшенню їхньої екологічної безпеки.

Альдегіди утворюються в дизельних двигунах під час холоднополумєневих процесів, що відбуваються на початковій стадії перед основним горінням. Особливо інтенсивне утворення альдегідів спостерігається при роботі двигуна на холостому ходу або під малими навантаженнями, коли температури згоряння є низькими. Присутність альдегідів, разом із вуглеводнями, у відпрацьованих газах є причиною неприємного запаху, що є одним із недоліків дизельних двигунів. Цей запах характерний для роботи дизелів у режимах із низьким тепловим навантаженням, де умови згоряння не забезпечують повного окислення палива.

Оксиди азоту (NO_x), що утворюються в циліндрі дизельного двигуна, на 90% складаються з оксиду азоту (NO) та діоксиду азоту (NO_2). Їх утворення зумовлене хімічними реакціями між киснем і азотом повітря при високих температурах, характерних для процесу згоряння. Процес утворення NO починається з появи атомарного кисню (O), який виникає внаслідок дисоціації молекул кисню (O_2) при температурах, що перевищують 2200 K. Найбільша кількість NO формується в зонах циліндра, які згорають першими та тривалий час залишаються при високій температурі. Це явище пояснюється:

- Залежністю швидкості утворення NO від температури: У зонах, де паливо згоряє раніше, температура продуктів згоряння підвищується через стискання внаслідок подальшого згоряння (ефект Махе).

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Впливом локального складу суміші: У багатих сумішах у ядрі факела кількість NO залежить від концентрації кисню. Наприклад, при збільшенні числа соплових отворів подачі палива утворення NO може зростати через покращене перемішування суміші.

Зниження емісії NO_x є одним із ключових завдань сучасного двигунобудування та експлуатації двигунів. Кількість NO_x залежить від обсягів азоту повітря, який окислюється під час згоряння, та визначається переважно температурою в камері згоряння.

Відповідно до вимог Міжнародної морської організації (ІМО), допустимий рівень NO_x у дизельних двигунах залежить від їхнього обертового режиму:

- Малооборотіві двигуни: ≤ 17 г/кВт·год.
- Середньооборотіві двигуни (500...800 об/хв): 13...12 г/кВт·год.
- Високооборотіві двигуни (1000...1500 об/хв): 11,5...10,5 г/кВт·год.

Сучасні технології зменшення NO_x зосереджені на:

- Зниженні температури в камері згоряння.
- Оптимізації процесів згоряння.
- Використанні методів очищення відпрацьованих газів, таких як селективне каталітичне відновлення (SCR).

Впровадження цих рішень сприяє дотриманню екологічних норм та покращує екологічну ефективність двигунів.

Завдяки оптимізації робочих процесів вдалося значно зменшити утворення оксидів азоту (NO_x) і забезпечити відповідність нормам, встановленим Додатком VI Міжнародної конвенції MARPOL. Проте у зв'язку з майбутнім посиленням вимог до викидів шкідливих речовин виникла необхідність у розробці спеціальних методів їх зниження [4].

Методи зниження викидів NO_x

Ці методи поділяються на дві основні групи:

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Первинні методи

Базуються на зниженні температури в зонах згоряння палива, оскільки температура є основним фактором утворення NO_x. Цей підхід є дуже ефективним і широко застосовується.

Основні способи зниження температури:

- Змішування палива з водою до паливного насоса високого тиску та уприскування у вигляді водопаливної емульсії.
- Уприскування води безпосередньо в циліндр, для чого дизель оснащується окремою системою подачі води.
- Зволоження наддувного повітря шляхом уприскування забортної води в потік гарячого повітря після відцентрового компресора.

Вторинні методи

Засновані на хімічній нейтралізації NO_x перед випуском відпрацьованих газів в атмосферу. До них належать системи очищення вихлопних газів, такі як селективне каталітичне відновлення (SCR).

Застосування первинних методів у морському флоті

На морських судах найбільше поширення отримали первинні методи, оскільки вони:

- Безпосередньо впливають на процес згоряння.
- Мають менші витрати на експлуатацію в порівнянні з вторинними методами.
- Не потребують значної модифікації судових систем.

Використання цих методів дозволяє не лише знизити викиди NO_x, але й забезпечити дотримання сучасних екологічних стандартів, сприяючи зменшенню впливу судових дизелів на навколишнє середовище.

Зменшення кількості оксидів азоту (NO_x), що утворюються в камері згоряння дизельного двигуна при зволоженні робочого тіла, зумовлене наступними процесами:

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Вплив водяної пари: Завдяки високій теплоємності водяна пара відбирає значну кількість теплової енергії на процес пароутворення, що призводить до зниження температури в камері згоряння.

- Температурний вплив на утворення NOx: Швидкість реакцій утворення оксидів азоту залежить від температури в зоні згоряння. Чим нижча температура, тим менша кількість NOx утворюється.

Збільшення вмісту водяної пари в газовій суміші в циліндрі знижує температуру згоряння палива, тим самим суттєво скорочуючи утворення оксидів азоту.

Зниження температури в камері згоряння, зменшуючи утворення NOx, також впливає на ефективність робочого циклу – частина теплової енергії, акумульованої водяною парою, відводиться з циліндра разом із відпрацьованими газами, що зменшує корисну роботу циклу.

Таким чином, зволоження робочого тіла є ефективним методом зниження емісії NOx, але вимагає компромісу між зменшенням викидів і збереженням паливної ефективності двигуна.

Використання **водопаливної емульсії** на річкових і морських судах активно досліджувалося у 1970-х роках як спосіб зниження питомої витрати палива та зменшення утворення нагару під час роботи на важких сортах палива.

Переваги методу:

- Відсутність змін конструкції двигуна: Для застосування емульсії не потрібна модифікація дизеля, що забезпечує збереження його надійності.

- Стабільна витрата палива: При вмісті води в емульсії до 30% витрата палива змінюється несуттєво.

- Зменшення димності та викидів NOx: Додавання 10% води в паливо дозволяє знизити викиди NOx приблизно на 10%.

- Низька вартість впровадження: Установка системи водопаливної емульсії на судно є порівняно недорогою.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Екологічний ефект: Зменшується димність відпрацьованих газів, що позитивно впливає на екологію.

Недоліки методу:

- Обмежений потенціал зниження NO_x: Максимальне зниження викидів NO_x становить до 30%, що обмежено запасом продуктивності паливного насоса високого тиску, параметрами форсунок тощо.
- Корозія паливної апаратури: При використанні палива з високим вмістом сірки можливе збільшення корозійного зносу паливної системи.

Водопаливна емульсія є ефективним та економічно доступним способом зменшення викидів NO_x і димності відпрацьованих газів без значних змін у конструкції дизеля. Однак її застосування має обмеження за ефективністю та ризику корозії при роботі з сірковмісним паливом. Цей метод доцільно використовувати у випадках, коли необхідне часткове покращення екологічних показників за мінімальних витрат.

Безпосереднє упорскування води

У 1999 році компанія "Вяртсиля N80" завершила випробування системи безпосереднього упорскування води на середньообертовому дизелі серії У46. У цій системі дистильована вода упорскується в циліндр спеціальним паливним насосом високого тиску через форсунку з двома окремими соплами: для води та для палива.

Уприскування води здійснюється наприкінці такту стискання перед поданням палива. Це забезпечує максимальний ефект у зниженні викидів NO_x, оскільки вода знижує температуру згоряння палива, а отже, і утворення оксидів азоту.

Переваги методу

- Висока ефективність зниження NO_x: Застосування методу дозволяє знизити викиди NO_x на 60–70%. Ефект досягається при співвідношенні води до палива приблизно 0,7 (за даними "Вяртсиля N80").

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Можливість упорскування великих обсягів води: Завдяки спеціалізованій системі уприскування.

Недоліки методу

- Складність і вартість впровадження: Реалізація цього методу потребує суттєвої модернізації дизеля, що вимагає значних капіталовкладень.
- Обмежений ресурс розпилювачів: Сопла для уприскування води мають невеликий термін служби, що підвищує експлуатаційні витрати.
- Збільшення питомої витрати палива: Підвищується на 5...7%, що впливає на економічність двигуна.
- Зростання димності вихлопу: Викликається додатковими процесами в камері згоряння.
- Висока витрата дистильованої води: Витрата води є значною і співмірна з годинною витратою палива дизеля.

Безпосереднє упорскування води є високоефективним методом зниження викидів NO_x , який може скоротити їх на 60...70%. Проте цей метод має значні обмеження, пов'язані з високими капітальними і експлуатаційними витратами, збільшенням витрати палива і води, а також зростанням димності. Застосування цього методу доцільне у випадках, коли пріоритетом є значне зниження емісій шкідливих газів, навіть за умов підвищення витрат.

Система зволоження наддувного повітря

У 1998 році кафедрою теплоенергетики Технологічного інституту міста Лунд (Швеція) була розроблена система зволоження наддувного повітря, яку випробували на трициліндровому дизелі "Пілстік" PC 2.6B (потужність 2000 кВт). Згодом систему встановили на пором "Mariella", який належить компанії "Viking Line AB". Енергетична установка судна складалася з чотирьох середньообертових дизелів "Пілстік" 12 PC 2.6 потужністю 5750 кВт кожен.

					KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Переваги системи

- Ефективне зниження NO_x : Система дозволяє подавати в циліндр значну кількість водяної пари, що забезпечує зниження викидів NO_x на 70% і більше.
- Використання заборотної води: Для отримання пари використовується забортна вода, яка попередньо підігрівається за рахунок утилізації тепла, що зменшує експлуатаційні витрати.

Недоліки системи

- Збільшення питомої витрати палива: Введення водяної пари призводить до зниження ефективності робочого циклу.
- Зростання димності вихлопу: Утворення додаткових продуктів неповного згоряння.
- Зниження температури відпрацьованих газів: Це може впливати на ефективність системи утилізації тепла.
- Висока вартість: Встановлення та обслуговування системи потребують значних інвестицій.
- Габарити і маса: Система займає багато місця і додає вагу судовій установці.

Незважаючи на недоліки, системи зволоження наддувного повітря мають значний потенціал у зниженні викидів оксидів азоту. Це робить їх перспективними для подальшого розвитку і впровадження, особливо на судах, де дотримання екологічних норм є пріоритетом. Зростання вимог до зниження емісій шкідливих речовин сприятиме вдосконаленню цих технологій та їх адаптації для широкого використання.

Вторинні методи зниження викидів

Технологія **селективного каталітичного відновлення** (Selective Catalytic Reduction, SCR) оксидів азоту (NO_x) із застосуванням аміаку впроваджена датською компанією "Haldor Topsoe" і використовується на

					KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

поромках у Балтійському морі, а також на більш ніж 20 дизельних теплоелектростанціях у Скандинавії.

SCR-процес проводиться при температурі 330–420°C за участю титан-ванадієвих каталізаторів.

Одна з основних проблем SCR – використання газоподібного аміаку, який є токсичним і небезпечним у поводженні. Це питання успішно вирішується шляхом заміни аміаку водним розчином сечовини. У зоні реакції аміак утворюється в результаті розкладання сечовини, що значно підвищує безпеку технології.

Ключові фактори ефективності SCR

- Каталізатор: Якість і технологія виготовлення каталізатора є критичними для ефективності процесу.
- Дозування реагенту: Система дозування аміаку повинна забезпечувати стехіометричне співвідношення реагентів для різних режимів роботи дизеля.

Переваги:

- Високий рівень очищення газів від NOx.
- Можливість застосування на різних установках.

Недоліки:

- Висока вартість системи.
- Значні експлуатаційні витрати.

Десульфитація відпрацьованих газів

Для зниження викидів оксидів сірки (SOx) до рівня менше 6,0 г/(кВт·год) використовуються технічні системи очищення, такі як скрубрування морською водою.

Скрубер виконує функцію глушника і забезпечує тепломасообмін між відпрацьованими газами та морською водою, яка розпилюється в протитечії до газів. У результаті оксиди сірки та зважені частки поглинаються морською водою.

					KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Вода, насичена забрудненнями, проходить через:

- Перший гідроциклон — видаляє сажу.
- Другий гідроциклон — відділяє менш щільні частки, включаючи нафтовмісні відходи.
- Сепаратор шламу — завершує процес очищення.

Технології SCR і скрубрування забезпечують значне зниження емісії NO_x і SO_x , відповідаючи сучасним екологічним стандартам. Хоча вони потребують значних фінансових вкладень, їх ефективність у зменшенні впливу на довкілля виправдовує витрати, особливо в регіонах із суворими екологічними вимогами [5].

Зменшення токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів є складним завданням, оскільки зазвичай потрібно одночасно скорочувати викиди кількох шкідливих компонентів, таких як оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_x), оксид вуглецю (CO), вуглеводні та тверді частки. Реалізація деяких способів зменшення NO_x , як правило, супроводжується погіршенням паливної економічності двигуна, що є небажаним, особливо для морських суден.

У кваліфікаційній роботі буде досліджено один із перспективних методів, який дозволяє не лише покращити екологічні характеристики двигуна, але й підвищити його економічність – використання водню.

Розглянутий підхід ґрунтується на застосуванні водню як палива або паливної добавки. Використання водню має низку потенційних переваг:

- Зменшення токсичних викидів: Застосування водню сприяє зниженню утворення NO_x завдяки нижчій температурі згоряння і відсутності викидів вуглецевих сполук (CO , CO_2 , вуглеводнів).
- Підвищення економічності: Водень має високу енергетичну щільність, що сприяє ефективнішій роботі двигуна.
- Екологічність: Продуктами згоряння водню є лише вода, що мінімізує шкідливий вплив на довкілля.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Цей метод є перспективним у контексті переходу на відновлювані джерела енергії та досягнення більш високих екологічних стандартів. Дослідження в рамках роботи будуть спрямовані на оцінку ефективності використання водню в двигунах і його впливу на екологічні та економічні показники.

Водень вирізняється високими енергетичними характеристиками, унікальними кінетичними властивостями, екологічною чистотою та практично необмеженими ресурсами для виробництва. Його масова енергоемність перевищує показники традиційних вуглеводневих палив у 2,5...3 рази, спиртів – у 5...6 разів, а аміаку – у 7 разів.

Вплив водню на робочий процес двигунів внутрішнього згоряння обумовлений його особливими властивостями. Він має вищу дифузійну здатність, більшу швидкість згоряння і широкі межі займання. Енергія займання водню на порядок менша, ніж у вуглеводневих палив, що сприяє більш ефективному робочому процесу, кращій економічності й нижчій токсичності вихлопних газів.

Воднево-повітряна суміш легко запалюється в широкому діапазоні концентрацій ($\alpha = 0,2...10$), що дозволяє забезпечити стабільну роботу двигуна на різних швидкісних режимах. Це також дає змогу регулювати потужність як якісним, так і кількісним методами.

Водень вирізняється високою швидкістю розповсюдження фронту полум'я, яка може перевищувати 200 м/с. Це спричиняє утворення хвилі тиску, що рухається в камері згоряння зі швидкістю понад 600 м/с. Висока швидкість згоряння водню сприяє підвищенню ефективності робочого процесу, але також призводить до:

- Зростання максимального тиску й температури циклу, що підвищує жорсткість робочого процесу.
- Зниження моторесурсу двигуна через високий тиск.

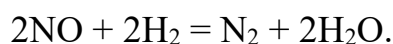
					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Інтенсивного утворення оксидів азоту (NO_x) через високі температури.

Шляхи вирішення проблеми

- Зниження максимального тиску можливе шляхом деформації двигуна або поступового спалювання водню під час такту робочого ходу.
- Скорочення емісії NO_x до незначних рівнів може бути досягнуто:
- Збідненням робочої суміші (при $\alpha > 1,8$ емісія NO_x практично відсутня).
- Введенням води у впускний трубопровід (подача води масою в 8 разів більшою за масу водню знижує емісію NO_x у 8...10 разів).
- Вплив водню на склад відпрацьованих газів
- Використання водню значно зменшує кількість вуглеводнів і оксиду вуглецю у вихлопі завдяки відсутності вуглеводневого палива.
- Проте навіть при роботі на чистому водні у відпрацьованих газах можуть міститися невеликі кількості вуглеводневих сполук, які утворюються через вигорання мастил, що потрапляють у камеру згоряння.
- У разі використання вуглеводневих палив для займання робочої суміші кількість вуглеводневих сполук залежить від обсягу використаного палива.

Присутність в зоні реагування додаткової кількості водню призводить до зниження виходу NO_x з газами, оскільки експериментально встановлено, що при згоранні паливно-повітряної суміші окрім окислювальних реакцій має місце відновлення азоту:



З розглянутого вище виходить, що участь в робочому циклі водню сприяє якісному поліпшенню екологічних показників дизеля, принаймні, по двох основних компонентах газів – оксиді азоту і сажі, які, як відомо, в сукупності визначають сумарну токсичність дизельного вихлопу.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

На рис. 2.1 показано зниження змісту оксидів азоту в відпрацьованих газах двигуна 4ЧН 10,5/12 з добавкою 0,5% по масі водню. Зниження спостерігається в усьому діапазоні зміни режимів навантажень дизеля до 40%.

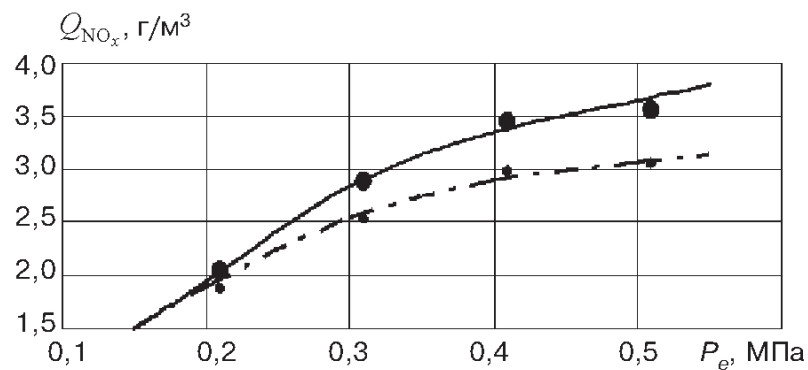


Рисунок 2.1 – Екологічні показники дизеля при його роботі на традиційному і воднево-дизельному сумішевому паливі: _____ – при роботі на дизельному паливі; _ . _ . _ – при роботі на сумішевому паливі.

Застосування водню H_2 в двигунах цікаво також у зв'язку з відсутністю в його складі молекули вуглецю. При цьому водень - абсолютно нетоксичний газ. Робота ДВЗ на водні стійка при укр. бідних сумішах - до $\alpha = 6$. Це дозволяє понизити викиди оксидів азоту практично до нуля.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПОДАЧІ ТА ОТРИМАННЯ ВОДНЮ НА БОРТУ СУДНА

Обґрунтування запропонованих технічних рішень шляхом виконання теплового розрахунку робочих циклів двигуна

Для розрахунку робочого процесу с домішкою водню враховуємо зміну масового елементарного складу палива (C, H, O), питомої нижчої теплоти згоряння палива та коефіцієнтів використання теплоти в точці z та в точці b . Нижча теплота згоряння суміші дизельного палива і водню розраховується за формулою:

$$Q_n^{cm} = \omega_m^D Q_n^D + \omega_m^H Q_n^H$$

де Q_n^{cm} – нижча теплота згоряння суміші палив;

Q_n^D – нижча теплота згоряння дизельного палива;

Q_n^H – нижча теплота згоряння водневого палива;

ω_m^D – масова концентрація дизельного палива;

ω_m^H – масова концентрація водневого палива.

Розрахунок нижчої теплоти згоряння та масового елементарного складу наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Властивості суміші палив

Параметр		Одиниці виміру	Масовий елементарний склад палива, %		Суміш (ДТ – 99,5%, Н ₂ – 0,5%)
			Дизельне паливо	Водень	
Компоненти	C	%	87	0	86,57
	H	%	12,6	100	13,04
	O	%	0,4	0	0,40
Питома нижча теплота згоряння		кДж/кг	42700	120000	43087

Коефіцієнти використання теплоти в точці z та в точці b дорівнюють 0,95 та 0,98.

Виконаємо розрахунок робочого процесу для навантаження 50% та 25% від номінального навантаження на дизельному паливі та з 0,5% домішкою водню.

В даній роботі використовується класична методика теплового розрахунку, розроблена В. І. Гріневецьким і далі вдосконалена Є. К. Мазінгом [6].

Метод теплового розрахунку заснований на загально відомих положеннях термодинаміки та термохімії, достатньо повно охоплює сутність теплових явищ, що протікають в робочому циліндрі і представляє собою інженерне аналітичне дослідження.

Метод забезпечує достатню задовільну для практики точність розрахунків, не дивлячись на те, що цикл, що проходить в двигуні описується найпростішими термодинамічними процесами і вводиться ряд опитних коефіцієнтів, які оцінюють реальні умови протікання робочих процесів в двигуні.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для теплового розрахунку двигуна при роботі на дизельному паливі

Параметр	Позн.	Од. виміру	$N_e, \%$		
			100	50	25
Ефективна потужність	N_e	кВт	6300	3150	1575
Відносна ефективна потужність	$\frac{N_e}{N_{en}}$	—	1	0,5	0,25
Частота обертання КВ	n_n	хв ⁻¹	500	500	500
Відносна частота обертання КВ	$\frac{n}{n_n}$	—	1	0,95	0,88
Незалежні параметри					
Число циліндрів	i	—	7		
Діаметр циліндра	D	м	0,43		
Хід поршня	S	м	0,61		
Коефіцієнт тактності	z	—	0,5		
Тиск навколишнього середовища	P_0	МПа	0,1013		

Температура навколишнього середовища	T_0	К	293		
Ступінь стиску	ε	—	15		
Масовий склад дизельного палива:	C	%	87		
	H ₂		12,6		
	S		0		
	O ₂		0,4		
Частка ходу поршня втраченого на продувку	ψ_s	—	0		
Коефіцієнт зміни тиску на впуску	ξ_a	—	0,97		
Підігрів заряду від стінок циліндру	ΔT_a	К	15		
Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми	ζ	—	0,98		
Коефіцієнт залишкових газів	γ_r	—	0,025		
Температура залишкових газів	T_r	К	800		
Коефіцієнт використання теплоти в точці z та в точці b	ξ_z	—	0,92		
	ξ_b		0,95		
Ступінь підвищення тиску при згорянні	λ	—	1,2		
ККД системи охолодження двигуна	η_o	—	0,8		
Залежні параметри					
Середня швидкість поршня	C_m	м/с	10,17	9,66	8,95
Середній тиск механічних втрат	ΔP_m	МПа	0,183	0,179	0,173
Потужність механічних втрат	ΔN_m	кВт	474,19	440,23	394,50
Механічний ККД	η_m	—	0,93	0,88	0,80
Тиск надуву	P_k	МПа	0,41	0,23	0,15
Відношення P_t/P_k	ψ_t	—	0,78	0,86	0,90
Температура повітря за компресором	T_k	К	545,41	421,83	348,85
Щільність повітря на вході в турбокомпресор	ρ_k	кг/м ³	2,62	1,90	1,50
Адіабатний ККД компресора турбокомпресора	η_{kad}	—	0,81	0,77	0,73
Адіабатний ККД турбіни турбокомпресора	η_{iad}	—	0,82	0,78	0,74
Зниження температури в ОНП	$\Delta T_{охл}$	К	201,93	103,07	44,68
Втрата тиску повітря за ОНП	$\Delta P_{охл}$	МПа	0,004	0,002	0,001
Температура повітря в ресивері двигуна	T_s	К	343,48	318,77	304,17
Тиск повітря в ресивері	P_s	МПа	0,41	0,23	0,15
Щільність повітря в ресивері	ρ_s	кг/м ³	4,12	2,49	1,71
Відносна щільність повітря в ресивері	$\frac{\rho_s}{\rho_{сн}}$	—	1,00	0,61	0,41
Відносна індикаторна потужність	$\frac{N_i}{N_{ін}}$	—	1,00	0,53	0,29
Коефіцієнт надлишку повітря	α	—	2,36	2,55	2,8

Результати теплового розрахунку двигуна на дизельному паливі при навантаженнях 50% та 25% представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати теплового розрахунку двигуна на дизельному паливі

Параметр	Навантаження, %	
	50	25
Температура повітря за компресором, T_k (К)	391,4	337,1
Температура повітря перед двигуном, T_s (К)	312,6	310,6
Температура заряду к кінцю наповнення, T_a (К)	339,2	337,2
Тиск повітря перед двигуном, P_s (МПа)	0,233	0,149
Тиск заряду к кінцю наповнення, P_a (МПа)	0,226	0,145
Коефіцієнт наповнення, η_n	0,935	0,934
Середній показник політропи стиску, n_1	1,363	1,363
Тиск в кінці процесу стиску, P_c (МПа)	9,059	5,798
Температура в кінці процесу стиску, T_c (К)	906,5	901,8
Максимальна температура згоряння, T_z (К)	1737	1671,8
Максимальний тиск згоряння, P_z (МПа)	10,871	6,96
Ступінь попереднього розширення, ρ_o	1,635	1,578
Ступінь наступного розширення, δ	9,172	9,505
Середній показник політропи розширення, n_2	1,29	1,29
Температура в кінці процесу розширення, T_b (К)	913,7	858,4
Тиск в кінці процесу розширення, P_b (МПа)	0,623	0,376
Теоретичний середній індикаторний тиск, P_{ti} (МПа)	1,454	0,863
Дійсний середній індикаторний тиск, P_i (МПа)	1,425	0,845
Індикаторна питома витрата палива, g_i (кг/кВт*год)	0,168	0,166
Індикаторний ККД, η_i	0,503	0,509
Середній ефективний тиск, P_e (МПа)	1,282	0,693
Ефективна витрата палива, g_e (кг/кВт*год)	0,186	0,202
Ефективний ККД, η_e	0,452	0,417
Ефективна потужність, N_e (кВт)	3150	1570

Тепловий розрахунок двигуна при роботі на часткових навантаженнях 25% та 50% від номіналу з використанням домішок водню до дизельного палива

Для розрахунку робочого процесу з добавкою водню на режимі 50% і 25% від номінальної потужності приймаємо за основу ті ж допущення і вихідні дані що і для попередніх розрахунків. Зміниться масовий елементарний склад палива (С, Н, О), нижча питома теплота згорання палива і коефіцієнти використання тепла в точках b і z. Баланс ефективної потужності двигуна і баланс між турбіною і компресором забезпечувався шляхом зміни значення коефіцієнта надлишку повітря α тобто якісним регулюванням. Результати розрахунків наводяться в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати теплового розрахунку двигуна на дизельному паливі з домішкою водню

Параметр	Навантаження, %	
	50	25
Температура повітря за компресором, T_k (К)	391,4	337,1
Температура повітря перед двигуном, T_s (К)	312,6	310,6
Температура заряду к кінцю наповнення, T_a (К)	339,2	337,2
Тиск повітря перед двигуном, P_s (МПа)	0,233	0,149
Тиск заряду к кінцю наповнення, P_a (МПа)	0,226	0,145
Коефіцієнт наповнення, η_n	0,935	0,934
Середній показник політропи стиску, n_1	1,363	1,363
Тиск в кінці процесу стиску, P_c (МПа)	9,059	5,798
Температура в кінці процесу стиску, T_c (К)	906,5	901,8
Максимальна температура згорання, T_z (К)	1698,2	1622,8
Максимальний тиск згорання, P_z (МПа)	10,872	6,958
Ступінь попереднього розширення, ρ_o	1,639	1,579
Ступінь наступного розширення, δ	9,15	9,50
Середній показник політропи розширення, n_2	1,291	1,297
Температура в кінці процесу розширення, T_b (К)	942,4	857,6

Тиск в кінці процесу розширення, P_b (МПа)	0,624	0,375
Теоретичний середній індикаторний тиск, P_{ti} (МПа)	1,504	0,863
Дійсний середній індикаторний тиск, P_i (МПа)	1,459	0,845
Індикаторна питома витрата палива, g_i (кг/кВт*год)	0,161	0,159
Індикаторний ККД, η_i	0,519	0,526
Середній ефективний тиск, P_e (МПа)	1,286	0,691
Ефективна витрата палива, g_e (кг/кВт*год)	0,179	0,194
Ефективний ККД, η_e	0,467	0,431
Ефективна потужність, N_e (кВт)	3150	1570

За результатами розрахунків робочого процесу можна зробити ряд висновків:

- при роботі двигуна на часткових навантаженнях більш доцільним є використання домішок водню до основного палива, оскільки в порівнянні з роботою тільки на основному паливі зменшився максимальний тиск згоряння та підвищилась економічність;

- за рахунок підвищення коефіцієнту надлишку повітря α зменшилась максимальна температура згоряння приблизно на 50 К.

Зниження максимальної температури згоряння та реакційні властивості водню сприяють зниженню викидів оксидів азоту NO_x на 40% – з 10 г/кВт*год при роботі на дизельному паливі до 6 г/кВт*год при роботі з домішкою водню.

Всі перераховані факти вказують на те що основні параметри двигуна знаходяться у допустимих межах, тому запропонована модернізація не повинна сказатися на його надійності при істотному зменшенні витрат на паливо як на номінальних так і на долевих режимах роботи.

Аналіз сучасних способів отримання та зберігання водню

З розглянутого в розділі 2 можна зробити висновок, що участь в робочому циклі водню сприяє якісному поліпшенню екологічних показників

дизеля, принаймні, по двом основних компонентах відпрацьованих газів – оксиду азоту і сажі, які, як відомо, в сукупності визначають сумарну токсичність дизельного вихлопу.

Приведений аналіз можливих механізмів впливу присадок водню на внутрішньоциліндрові процеси дизеля, безумовно, не є вичерпним і не виключає інші види їх дії на складний механізм робочого циклу. Проте слід підкреслити, що при всіх перевагах вживання водню в дизелях зв'язане з рядом істотних труднощів. Основна проблема використання в якості моторного палива водню – відсутність інфраструктури його виробництва в необхідних кількостях.

До теперішнього часу промисловістю не освоєний випуск малогабаритних енергоємних засобів зберігання водню. Відомі способи зберігання водню у вигляді стислого газу в балонах високого тиску, в зрідженому стані в криогенних резервуарах і в зв'язаному стані в металогідридних акумуляторах. Навіть найкращий з них по енергощільності – криогенний – поступається по цьому показнику нафтовим паливам у декілька разів, не говорячи вже про системи зберігання і транспортування.

Необхідне також вирішення проблеми безпечного зберігання водню. Один з найбільш прийнятних варіантів – використання як енергоносіїв не самого водню, а безпечного і зручного сировинного продукту, з якого безпосередньо можна було б шляхом термохімічної конверсії отримувати газоподібні продукти з високим вмістом водню. Як сировинний продукт для здобуття водневого палива, в принципі, може бути використане традиційне моторне паливо, оскільки вміст водню в ньому складає близько 15 мас. %.

Проте на шляху розвитку подібних систем отримання водню виникає ряд серйозних проблем, стримуючих на даний момент їх впровадження в промисловість. Високий температурний рівень дисоціації (конверсії) цього виду рідких вуглеводнів обумовлює необхідність додаткових витрат теплової енергії на організацію конверсійного процесу; присутність сірки в моторному

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

паливі унеможлиблює використання каталізаторів, а великий відносний вміст інертних компонентів у складі цільових продуктів конверсії створюють додаткові складнощі при їх використанні.

Відмічені складнощі, пов'язані з організацією процесу конверсії традиційних моторних палив, викликають необхідність пошуку інших сировинних джерел для здобуття водневих газів. До них можуть бути віднесені, зокрема, вуглеводневі з'єднання, що мають простішу в порівнянні з моторними паливами молекулярну структуру і знижену температуру дисоціації. При цьому переважнішими для вживання в двигунах є з'єднання, що мають температуру дисоціації і теплових ефектів в ендотермічних реакціях розкладання (витрати теплової енергії на подолання внутрішньомолекулярних зв'язків), сумірні з температурою і енергією відпрацьованих газів на випуску двигуна. Очевидно, що в цьому випадку з'являється реальна можливість використання «безкоштовної» теплової енергії відпрацьованих газів для організації конверсійного процесу без додаткового джерела тепла [7].

Подібними властивостями володіють спирти і ряд ефірів. Метиловий і особливо етиловий спирти вже відносно давно застосовуються в автомобільних двигунах як часткові заміники традиційних палив.

Питання здобуття водневого газу (синтез-газу) з етанолу шляхом його термохімічної конверсії на теоретичному і практичному рівнях вивчені в хімічних галузях науки і техніки. У публікаціях подібні дослідження знайшли своє віддзеркалення відносно недавно, в основному стосовно двигунів з іскровим запаленням.

Конверсія етанолу у водневий газ може бути здійснена трьома методами:

паровою конверсією (паровий риформинг)

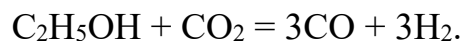


					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

розкладанням



та вуглекислотою конверсією («сухий риформинг»)



У ДВЗ доцільно застосовувати метод парової конверсії, де енергія відпрацьованих газів буде вистачати для здійснення реакції і здобуття необхідної кількості пари. Реакція вуглекислотою конверсії в порівнянні з паровою конверсією ще більш ендотермічна і вимагає джерела CO_2 , а реакція розкладання характеризується невисоким виходом водню.

Розробка системи отримання водню шляхом термохімічної конверсії етанолу

Використовуючи рекомендації зарубіжних джерел, а також враховуючи особливості проведення реакції парової конверсії, які були описані в попередньому розділі, була розроблена принципова схема отримання водню для двигуна МАК 7М43С. Вона представлена на рис.3.1.

Згідно з схемою, необхідна кількість рідкого етанолу і води подається насосами (12,14) з резервуарів (13,15) до випарників (10, 11). У випарниках під впливом тепла відпрацьованих газів відбуваються послідовно нагрів, випар і перегрів до температури початку реакції парової конверсії. Пари етанолу і води, що утворилися, змішуються в змішувачі і поступають реактор (8). Під впливом тепла відпрацьованих газів, які протікають в міжтрубному просторі реактора, відбувається реакція конверсії з утворенням водневого газу. Далі цей газ поступає в теплообмінник (6), де охолоджується до необхідної температури. Відпрацьовані гази після реактора прямують до випарників. Водневий газ після охолоджувача поступає до нейтралізатора CO_2 (5), звідки вже чистий водень упорскується через електромагнітний клапан (2) у впускні колектори циліндрів двигуна (21).

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

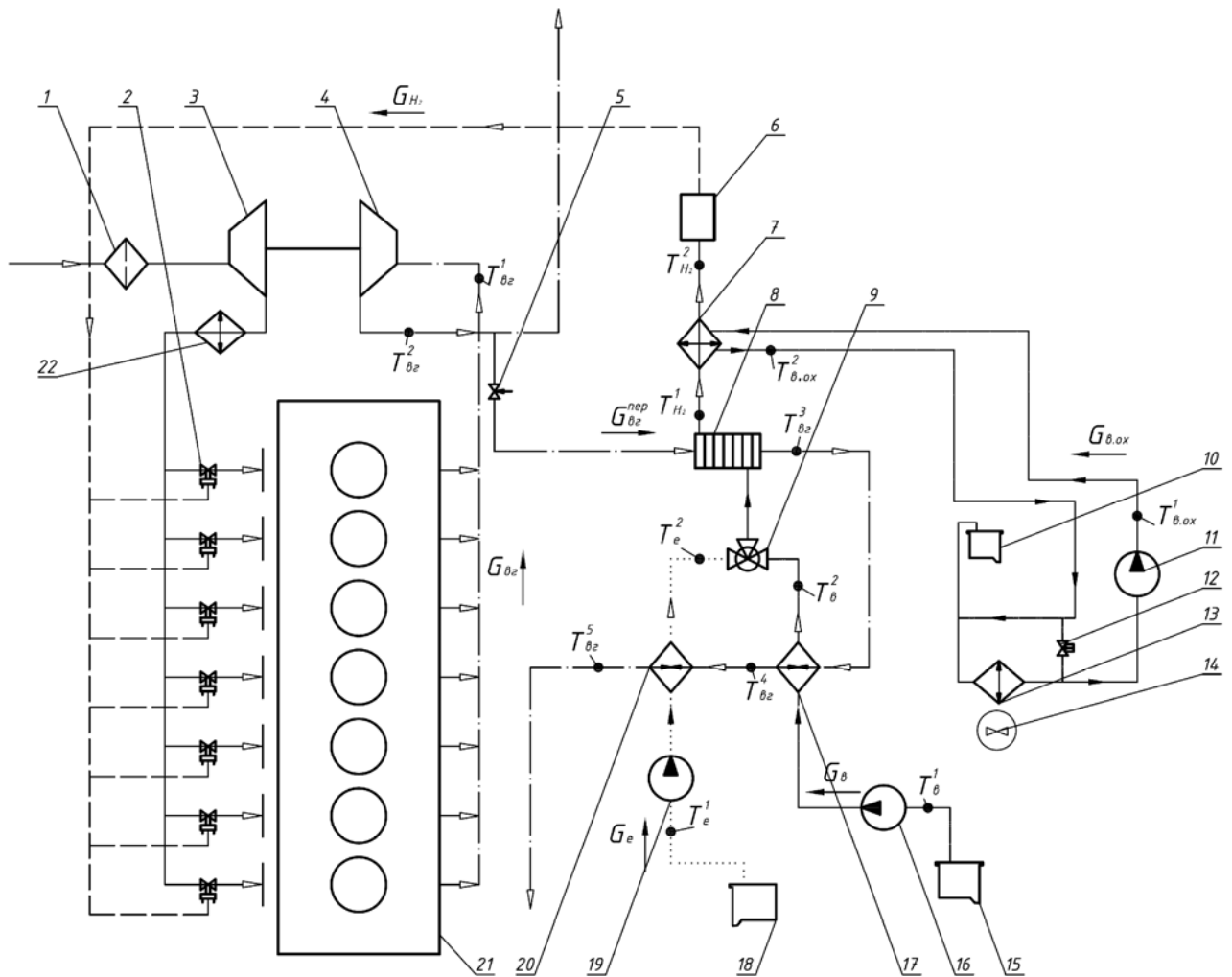


Рисунок 3.1 – Система отримання водню шляхом парової конверсії етанолу:

1 – повітряний фільтр; 2 – електромагнітні клапани; 3 – компресор;
 4 – турбіна; 5 – нейтралізатор; 6 – охолоджувач водневого газу; 7 – клапан перепуску відпрацьованих газів; 8 – термохімічний реактор; 9 – змішувач;
 10 – випарник етанолу; 11 – випарник води; 12, 14 – насоси; 13 – резервуар з етанолом; 15 – резервуар з водою; 16 – вентилятор; 17 – охолоджувач води;
 18 – перепускний клапан; 19 – резервуар з охолоджуючою водою; 20 – насос;
 21 – двигун; 22 – ОНП

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ

Аркуш

41

При проектуванні енергетичної установки з системою термохімічної конверсії біоетанолу необхідне одночасне виконання 2 умов, які визначають границі її ефективного використання:

1) система термохімічної конверсії в широкому діапазоні температур відпрацьованих газів повинна забезпечувати максимальний ступінь перетворення (конверсії) етанолу в синтез-газ;

2) синтез-газ, на якому працює двигун, не повинен погіршувати енергетичні, експлуатаційні і екологічні характеристики його роботи.

Основним параметром, який характеризує процес парової конверсії, а також визначає матеріальний і енергетичний баланс реакції є ступінь конверсії

$$\chi = \frac{q_{\text{ВХ}} - q_{\text{ВЫХ}}}{q_{\text{ВХ}}},$$

тобто доля етанолу, що прореагувала.

Залежність рівноважного ступеня конверсії від температури реакції представлена на рис.3.2.

Провівши аналіз параметрів ректорів, які широко використовуються в промисловості, а також користуючись рекомендаціями зарубіжних джерел було з'ясовано, що перепад між температурою відпрацьованих газів на вході в реактор і температурою утворившогося водневого газу на виході з нього лежить в діапазоні 30 – 50 °С. Вибираємо максимальне значення $\Delta T = 50$ °С.

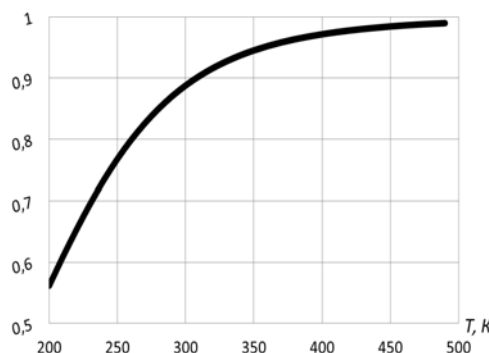


Рисунок 3.2 – Залежність рівноважного ступеня конверсії етанолу від температури реакції

За даними розрахунку робочого циклу температура відпрацьованих газів на часткових режимах 25% та 50%, після турбокомпресора складає 370-390 °С, з врахуванням вибраного перепаду, температура на виході синтез – газу відповідає значенню $T_{H_2}^1 = 320-340$ °С. Ця температура відповідає для режиму 25% $\chi = 0,92$, а для 50% $\chi = 0,95$.

Тепер проведемо розрахунок параметрів теплоносіїв в елементах термохімічної системи двигуна (рис. 3.2).

Розрахунок витрат теплоносіїв:

1) $G_{ez}^{nep} = 0,05 \cdot G_{ez}$ – витрата відпрацьованих газів, яка перепускається на термохімічну конверсію. У нашому випадку достатньо 5% від повної витрати;

2) $G_{H_2} = 0,05 \cdot g_e \cdot N_e$ – витрата водню;

3) $G_{em} = G_{H_2} \cdot \frac{46}{12}$ – витрата етанолу. 46 та 12 – молекулярна маса етанолу та води за реакцією парової конверсії;

4) $G_6 = G_{H_2} \cdot \frac{54}{12}$ – витрата води. 54 та 12 – молекулярна маса етанолу та води за реакцією парової конверсії;

5) $G_z = G_e + G_6$ – витрата водневого газу на виході з реактора;

5) $G_{6.ox} = \frac{G_z \cdot C_z^p \cdot (T_{H_2}^1 - T_{H_2}^2)}{C_{6.ox}^p \cdot (T_{6.ox}^2 - T_{6.ox}^1)}$ – витрата води, що охолоджує водневий

газ:

C_z^p – ізобарна теплоємність водневого газу;

$T_{H_2}^1$ – температура водневого газу на вході в теплообмінник 6;

$T_{H_2}^2$ – температура водневого газу на виході з теплообмінника 6;

$C_{6.ox}^p$ – ізобарна теплоємність охолоджувальної води;

$T_{6.ox}^1$ – температура охолоджувальної води на вході в теплообмінник 6

$T_{\text{в.ох}}^2$ – температура охолоджувальної води на виході з теплообмінника

6;

Розрахунок температур теплоносіїв

1) Температура відпрацьованих газів на виході з реактора

$$T_{\text{вг}}^3 = T_{\text{вг}}^2 - \frac{Q_{\text{х.р}}}{G_{\text{вг}}^{\text{пер}} C_{\text{вг}}^p}$$

$T_{\text{вг}}^2$ – температура відпрацьованих газів на вході у ректор;

$C_{\text{вг}}^p$ – ізобарна теплоємність відпрацьованих газів;

$Q_{\text{х.р}}$ – енергія, яка необхідна для протікання хімічної реакції:

$$Q_{\text{х.р}} = \Delta H_{\text{х.р}} \cdot G_e$$

$\Delta H_{\text{х.р}}$ – ентальпія хімічної реакції;

2) Температура відпрацьованих газів на виході з випарника води

$$T_{\text{вг}}^4 = T_{\text{вг}}^3 - \frac{Q_{\text{в}}}{G_{\text{вг}}^{\text{пер}} C_{\text{вг}}^p}$$

$Q_{\text{в}}$ – енергія, яка необхідна для нагріву, випарки та перегріву води з температури в резервуарі $T_{\text{в}}^1$ до температури початку реакції $T_{\text{в}}^2$:

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot \Delta H_{\text{в}}^2$$

$\Delta H_{\text{в}}^2$ - різниця ентальпій води при $T_{\text{в}}^1$ та $T_{\text{в}}^2$;

3) Температура відпрацьованих газів на виході з випарника етанолу

$$T_{\text{вг}}^5 = T_{\text{вг}}^4 - \frac{Q_e}{G_{\text{вг}}^{\text{пер}} C_{\text{вг}}^p}$$

Q_e – енергія, яка необхідна для нагріву, випарки та перегріву етанолу з температури в резервуарі T_e^1 до температури початку реакції T_e^2 :

$$Q_e = G_e \cdot \Delta H_e^2$$

ΔH_e^2 - різниця ентальпій етанолу при T_e^1 та T_e^2 ;

Результати розрахунків зведено у таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку параметрів теплоносіїв системи отримання водню для часткових режимів роботи двигуна

Позначення	Розмірність	Навантаження	
		50%	25%
G_{e2}	кг/год	21960	12960
G_{e2}^{nep}	кг/год	1080	648
G_{H_2}	кг/год	2,7	1,5
G_e	кг/год	10,3	5,8
G_{θ}	кг/год	12,6	7,1
G_z	кг/год	22,4	12,7
$G_{\theta,ox}$	кг/год	120,0	65,0
$T_{H_2}^1$	°C	340	320
$T_{H_2}^2$	°C	25	25
$T_{\theta,ox}^1$	°C	20	20
$T_{\theta,ox}^2$	°C	55	55
$T_{\theta z}^2$	°C	390,9	370,1
$T_{\theta z}^3$	°C	347,6	329,6
$T_{\theta z}^4$	°C	315,9	296,3
$T_{\theta z}^5$	°C	305,3	283,0
T_{θ}^1	°C	20	20
T_{θ}^2	°C	200	200
T_e^1	°C	20	20
T_e^2	°C	200	200
C_z^p	кДж/(кг·К)	2,4	2,4
$C_{\theta,ox}^p$	кДж/(кг·К)	4,2	4,2
$C_{\theta z}^p$	кДж/(кг·К)	1,05	1,05
$\Delta H_{x,p}$	кДж/кг	4178	4178

$\Delta H_{\epsilon_1}^2$	кДж/кг	2791,1	2791,1
$\Delta H_{e_1}^2$	кДж/кг	1348,6	1348,6
$Q_{x.p}$	кВт	12,0	6,8
Q_{ϵ}	кВт	9,7	5,5
Q_e	кВт	3,9	2,2

Розробка системи подачі водню у циліндри двигуна

Проаналізувавши особливості водню в якості палива, а також враховуючи конструктивні особливості газових двигунів та специфіку робочого процесу для двигуна МАК 7М43 була розроблена паливна система з впорскуванням водню з електронною системою управління (рис. 3.3).

Згідно зі схемою водень подається у впускні колектори двигуна 10 через спеціальні електро - магнітні клапани (форсунки) фірми « Clean air power» 4, необхідна кількість газу регулюється тривалістю відкриття цих клапанів. До переваг такої схеми відноситься відсутність горючої суміші між регулюючими органами і циліндром двигуна. У разі регулювання дросельними заслінками або дозаторами між ними і циліндром залишається нерегульований об'єм водню і повітря, що створює певну інерційність і викликає запізнювання дії регулятора при зміні робочих режимів двигуна.

Особливістю двигуна є електронна система управління. Так збір інформації про роботу двигуна здійснюється системою датчиків, в яку входять: датчик тиску наддувочного повітря 5, датчик тиску газу 3, датчик частоти обертів колінчастого валу 11, та датчик потужності 12. Так сигнали поступають в управляючу обчислювальну систему 14, де переробляються та видають сигнали на ПНВТ 8 та блок силових ключів 15, який управляє електромагнітним газовим клапаном, змінюючи тривалість його відкриття в залежності від навантаження. Змінюючи алгоритм, можна в певній мірі змінювати параметри роботи двигуна. Наприклад, дозу палива та тиск водню.

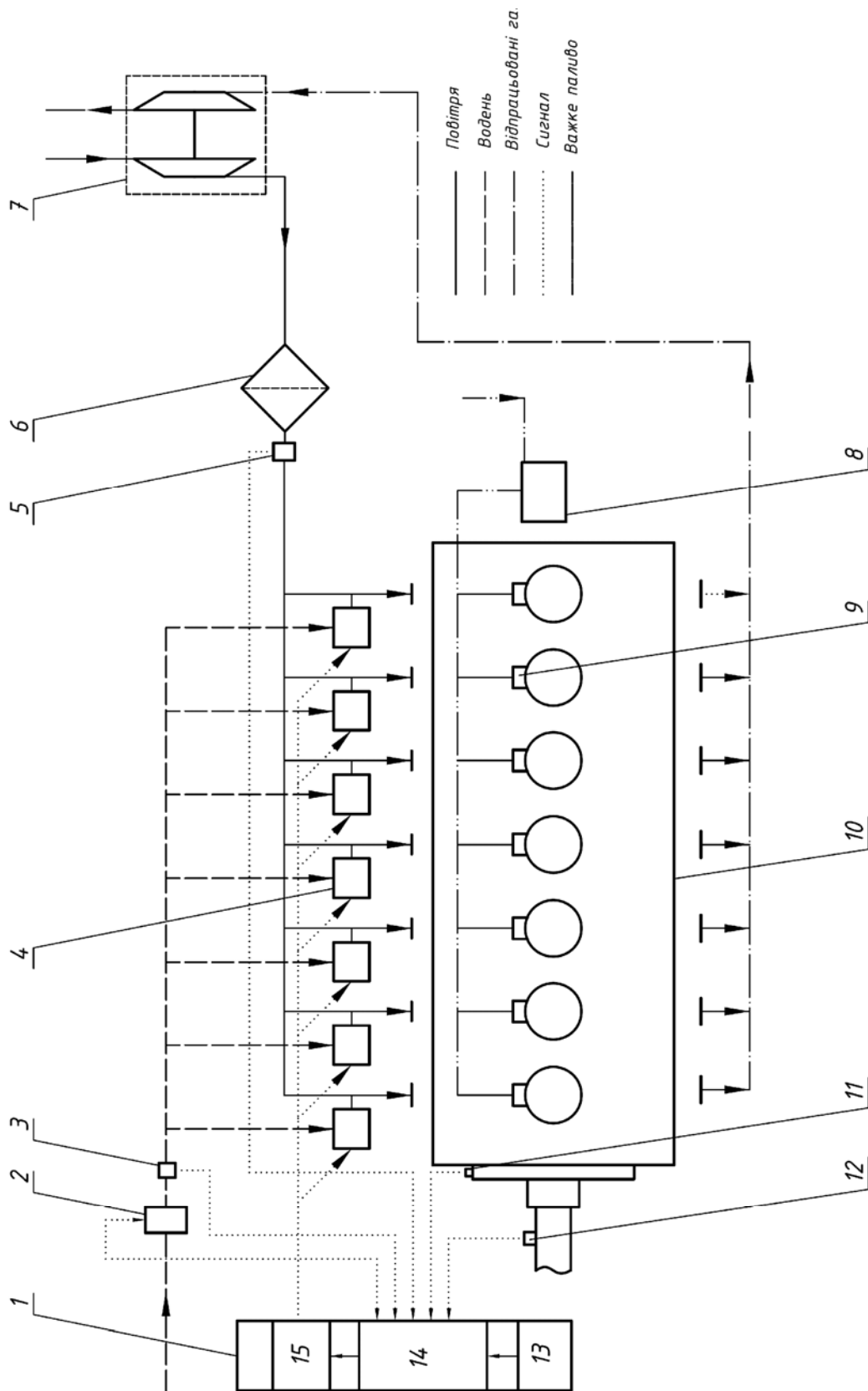


Рисунок 3.3 – Система подачі водню у циліндри двигуна

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ

Аркуш

47

Крім того, така система дозволяє здійснювати комплексне управління роботою двигуна та його захистом.

Розрахунок електромагнітного клапану подачі водню

Згідно зі схемою (рис. 3.3) водень подається на вхід до компресора через спеціальні електромагнітні клапани (ЕМК) фірми «Clean air power», необхідна кількість газу регулюється тривалістю відкриття цих клапанів.

Визначення подачі газу на режимі 50% навантаження двигуна

$$g_z = \frac{N_E \cdot g_e}{60 \cdot n \cdot i \cdot z_d} = \frac{3150 \cdot 0,89}{60 \cdot 500 \cdot 7 \cdot 0,5} = 0,0267 \text{ г/с}$$

де $g_e = 0,89 \text{ г/кВт} \cdot \text{год}$ – питома ефективна витрата водню;

$N_E = 3150 \text{ кВт}$ – потужність двигуна;

$n = 500 \text{ хв}^{-1}$ – частота обертання колінчастого валу;

$i = 7$ – кількість циліндрів;

$z_d = 0,5$ – коефіцієнт тактності двигуна.

Визначення витрати водню через ЕМК серії SP:

$$m_g = K \cdot \rho_1 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)}$$

де K – константа клапану;

$\rho_1 = 0,089 \text{ кг/м}^3$ – густина водню;

$\gamma = 1,3$ – співвідношення теплоємностей для водню;

P_1 – абсолютний тиск на вході в ЕМК, кПа;

$P_2 = 100 \text{ кПа}$ - абсолютний тиск на виході з ЕМК.

Ця формула допустима тільки для значення співвідношень P_2 / P_1 більших ніж значення критичного тиску P_p .

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$P_p = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \left(\frac{2}{1,3 + 1} \right)^{\frac{1,3}{1,3 - 1}} = 0,545$$

Тобто, максимальний тиск водню на вході в ЕМК дорівнює:

$$P_{1,max} = \frac{P_2}{P_p} = \frac{233}{0,545} = 427 \text{ кПа}$$

Визначення мінімальної необхідної витрати газу через ЕМК

Час одного оберту колінчастого валу

$$t = \frac{60}{n_k} = \frac{60}{500} = 0,12 \text{ с};$$

Максимальний кут впорскування водню у циліндр

$$\varphi_{\max} = \varphi_{\text{вн}} - \varphi_{\text{пер}} = 270 - 90 = 180^\circ \text{ ПКВ}$$

де $\varphi_{\text{вн}} = 270^\circ$ ПКВ – кут, в період якого відкритий впускний клапан;

$\varphi_{\text{пер}} = 90^\circ$ ПКВ – кут, в період якого одночасно відкриті впускний та випускний клапани.

180° ПКВ = $\frac{1}{2}$ оберту колінчастого валу.

Максимальний час впорскування газу у циліндр

$$t_{\text{вн}} = t \cdot \frac{1}{2} = 0,06 \text{ с}$$

Мінімальна необхідна витрата водню через електро - магнітний клапан

$$G_{\min} = \frac{g_{\text{ц}}}{t_{\text{вн}}} = \frac{0,0267}{0,06} = 0,445 \text{ г/с}$$

Визначимо витрати водню m_g (г/с) через кожний ЕМК в залежності від тиску на вході P_1 (рис.3.4). Результати розрахунків зведено у таблицю 3.6.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 3.6 – Результати розрахунку витрати водню через кожний ЕМК в залежності від тиску на вході

SP	K	P ₁ ,кПа	P ₂ ,кПа	m _g , г/с
051	3,92·10 ⁻⁵	260	220	0,103
	3,92·10 ⁻⁵	280	220	0,121
	3,92·10 ⁻⁵	300	220	0,134
	3,92·10 ⁻⁵	320	220	0,144
	3,92·10 ⁻⁵	340	220	0,153
	3,92·10 ⁻⁵	360	220	0,159
	3,92·10 ⁻⁵	380	220	0,165
	3,92·10 ⁻⁵	400	220	0,170
	3,92·10 ⁻⁵	420	220	0,174
021	6,86·10 ⁻⁵	260	220	0,18
	6,86·10 ⁻⁵	280	220	0,21
	6,86·10 ⁻⁵	300	220	0,23
	6,86·10 ⁻⁵	320	220	0,25
	6,86·10 ⁻⁵	340	220	0,27
	6,86·10 ⁻⁵	360	220	0,28
	6,86·10 ⁻⁵	380	220	0,29
	6,86·10 ⁻⁵	400	220	0,30
	6,86·10 ⁻⁵	420	220	0,30
014	9,46·10 ⁻⁵	260	220	0,25
	9,46·10 ⁻⁵	280	220	0,29
	9,46·10 ⁻⁵	300	220	0,32
	9,46·10 ⁻⁵	320	220	0,35
	9,46·10 ⁻⁵	340	220	0,37
	9,46·10 ⁻⁵	360	220	0,38
	9,46·10 ⁻⁵	380	220	0,40
	9,46·10 ⁻⁵	400	220	0,41

	$9,46 \cdot 10^{-5}$	420	220	0,42
010	$1,46 \cdot 10^{-4}$	260	220	0,47
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	280	220	0,56
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	300	220	0,62
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	320	220	0,66
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	340	220	0,70
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	360	220	0,73
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	380	220	0,76
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	400	220	0,78
	$1,46 \cdot 10^{-4}$	420	220	0,80

Таким чином, згідно з розрахунків нас задовольняє ЕМК SP-010. Основні характеристики клапану приведенні у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Основні характеристики ЕМК SP-010

Вид палива	Водень
Матеріал	Нержавіюча сталь
Максимальний тиск	1200 кПа
Інтервал температур	-40 °С....+ 120°С
Робоча напруга	24 В
Маса	0,137 кг

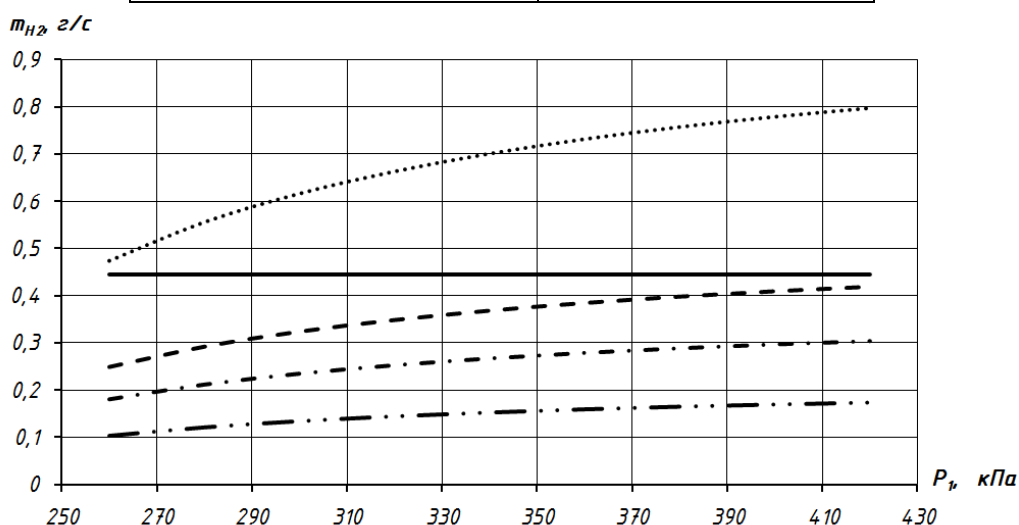


Рисунок 3.4 – Залежність витрати газу через ЕМК від тиску на вході

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ

У роботі модернізації піддалася система нейтралізації відпрацьованих газів двигуна, а саме, організовано подачу домішок водню до основного палива, в залежності від режиму роботи двигуна.

При цьому головними вихідними даними є:

- двигун марки 7М43С вартістю \$ 4,1 млн.;
- зменшення питомих витрат палива для 50% навантаження з 186 до 179 г/(кВт×год), а для режиму 25% навантаження з 202 до 194 г/(кВт×год). [розділ 3].

Визначення додаткових інвестицій на впровадження нововведень

Оптова ціна судна після його модернізації за рахунок удосконалення елементів СЕУ визначається по формулі:

$$C_n = C_0 - \sum_{i=1}^m C_{0i} + \sum_{j=1}^n C_{nj},$$

де C_0 , C_n – оптова ціна двигуна до і після модернізації (тобто базового і нового варіантів) \$;

C_{0i} – сумарна ціна агрегатів що підлягають заміні ($C_{0i} = 0$ \$);

C_{nj} – сумарна ціна нових агрегатів та вузлів ($C_{nj} = 30000$ \$);

m – кількість агрегатів СЕУ, що модернізуються (у нашому випадку $m=1,0$);

n – кількість нових агрегатів СЕУ (у нашому випадку $n=1,0$).

Оптова ціна базового двигуно приймається за даними заводу-будівника. У нашому випадку $C_0 = 4100000$ \$;

$$C_n = 4100000 - 0 + 30000 = 4130000\$$$

Замість визначення ціни базового і проектного варіантів двигуна по наведеній формулі, знайдемо їх різницю, оскільки лише два члени у цієї формули будуть розрізнятися і саме ця різниця складе додаткові інвестиції:

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$K_{\partial n} = \sum_{j=1}^n C_{nj} - \sum_{i=1}^m C_{\partial i}.$$

$$K_{\partial n} = 30000 \times 1 - 0 \times 1 = 30000 \$$$

Для розрахунку вкладень на модернізацію використовуємо узагальнені показники, якими являються робоча година на виконання та вартість 1-го нормочасу даних робіт, у залежності від їх складності, яка для України в середньому складає близько 41 грн., або 10 \$ (для закордонних виробників – від 70 до 100 \$). Додаткові інвестиції зводимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Додаткові інвестиції

Вид робіт	Тривалість, людино-години	Вартість нормо-год., \$	Кількість людей, осіб	Вартість робіт (К _в), \$
Монтаж системи	12	90	6	1080
Налаштування пристроїв	2	85	2	170
Випробування двигуна	12	100	2	1200
Регулювання елементів системи	16	100	4	1600
Всього	42	-	-	4050

Таким чином, додаткові інвестиції складуть величину:

$$K_{\partial} = K_{\partial n} + K_{\partial}$$

$$K_{\partial} = 30000 + 4050 = 34050 \$.$$

Витрати на амортизаційні відрахування $B_{ам}$ при порівняльній ефективності визначаються по нормах амортизації (H_A) і беруться в розмірі 20 % від величини додаткових інвестицій K_{∂} . Розраховуються по формулі:

$$B_{ам} = 20/100 \times K_{\partial}$$

$$B_{ам} = 20/100 \times 34050 = 6810 \$.$$

Витрати на паливо-мастильні матеріали, так звані змінні, розраховуються з урахуванням витрат палива на ходу для головного двигуна при навантаженнях 50% та 25%:

$$B_{пал} = N^{50} \cdot g_e^{50} \cdot T_e^{50} \cdot B_{п} + N^{25} \cdot g_e^{25} \cdot T_e^{25} \cdot B_{п}$$

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

де N^i – потужність двигуна (для базового та модернізованого двигуна при 50% навантаженні – 3150 кВт, при 25% – 1575 кВт);

g_e – питома витрата палива (для базового двигуна: при 50% – 0,186 кг/кВт*год, при 25% – 0,202 кг/кВт*год; для модернізованого: при 50% – 0,179 кг/кВт*год, при 25% – 0,194 кг/кВт*год);

T_e – години роботи двигуна на частковому навантаженні в рік, (для базового та модернізованого двигуна при 50% навантаження – 1500, 25% навантаження – 1000);

V_p – вартість 1 кг палива, \$, (1) [8].

$$V_{\text{пал(Б)}} = 3150 \cdot 0,186 \cdot 1500 \cdot 1 + 1575 \cdot 0,202 \cdot 1000 \cdot 1 = 878850 + 318150 = 1197000\$$$

$$V_{\text{пал(М)1}} = 3150 \cdot 0,179 \cdot 1500 \cdot 1 + 1575 \cdot 0,194 \cdot 1000 \cdot 1 = 845775 + 305550 = 1151325\$$$

В розрахунок модернізованого двигуна треба ще додати додаткову витрату етанолу для отримання домішок водню ($V_p = 0,6\$$; витрата етанолу при 50% навантаженні $g_e = 0,0032$ кг/кВт*год, при 25% $g_e = 0,0036$ кг/кВт*год):

$$V_{\text{ет}} = 3150 \cdot 0,0032 \cdot 1500 \cdot 0,6 + 1575 \cdot 0,0036 \cdot 1000 \cdot 0,6 = 9072 + 3402 = 12474\$$$

$$V_{\text{пал(М)}} = V_{\text{пал(М)1}} + V_{\text{ет}} = 1151325 + 12474 = 1163799\$$$

Додатковий економічний ефект від зменшення витрат палива виникає в результаті економії витрат на його завантаження, контроль, зберігання та роботу паливних насосів для транспортування.

Результаті розрахунків занесемо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку експлуатаційних витрат, \$

Стаття витрат	Базове рішення	Нове рішення	Відхилення
Амортизаційні відрахування $V_{ам}$	–	6810	6810
Витрати на паливо $V_{пал}$	1197000	1163799	– 33201
Всього	1197000	1170609	– 26391

Обчислення техніко-економічних показників

Загальний балансовий річний прибуток Π_6 розраховують за формулою:

$$\Pi_6 = F_{\text{ін}} - \Delta B - E_n \times K_n$$

де $F_{\text{ін}}$ – валові доходи, грн. або \$. Вони обчислюються за наступною формулою:

$$F_{\text{ін}} = \Pi_p \times P \times f,$$

Π_p – провозоспроможність судна за 1 рейс – 6701 т (розділ 1.1);

P – кількість рейсів за експлуатаційний період – 10 (розділ 1.1);

f – фрахтова ставка за 1 т вантажу, \$/тонна – 0,5 (розділ 1.1).

$$F_{\text{ін}} = 6701 \times 20 \times 0,5 = 33505 \$$$

$$\Pi_6 = 33505 - (1170609 - 1197000) - 0,2 \times 34050 = 53086 \$$$

Чистий прибуток ($\Pi_{\text{ч}}$) визначається як різниця між балансовим прибутком Π_6 та податком на прибуток:

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi_6 - (0,21 \cdot \Pi_6) = 0,79 \cdot \Pi_p$$

$$\Pi_{\text{ч}} = 0,79 \times 53086 = 41937,94 \$$$

Термін окупності додаткових інвестицій ($T_{\text{ок}}$) визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{д}} / \Pi_{\text{ч}}$$

$$T_{\text{ок}} = 34050 / 41937,94 = 0,81 \text{ року}$$

Річний економічний ефект визначається за формулою:

$$E_p = \Delta B - E_n \times K_{\text{д}}$$

$$E_p = (1197000 - 1170609) - 0,2 \times 34050 = 19581 \$$$

Таким чином, запропоновані в роботі заході дозволяють зекономити близько \$ 19581 на рік в основному за рахунок економії палива. Термін окупності запропонованих рішень становить 0,81 року або 296 днів.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Заходи із забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці на судні

Забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці на судні є пріоритетним завданням судноплавних компаній і екіпажу. Умови праці на борту мають відповідати міжнародним стандартам і вимогам для запобігання травматизму, професійним захворюванням і збереження здоров'я моряків. Основні заходи безпеки включають [9]:

1. Організація системи управління охороною праці

- **Розробка та впровадження політики охорони праці**, яка відповідає вимогам Міжнародної організації праці (МОП) і Міжнародної морської організації (ІМО).
- **Складання інструкцій і процедур** для екіпажу щодо безпечного виконання робіт.
- **Призначення відповідальних осіб** за контроль дотримання правил безпеки.

2. Забезпечення засобів індивідуального захисту (ЗІЗ)

- Видача екіпажу спеціального одягу, взуття, рукавичок, касок, засобів захисту органів дихання, зору та слуху залежно від виконуваних робіт.
- Регулярна перевірка стану та заміна ЗІЗ.

3. Контроль санітарно-гігієнічних умов

- **Підтримка чистоти та порядку** у житлових приміщеннях, на робочих ділянках і в машинних відділеннях.
- **Система вентиляції та кондиціонування** для забезпечення належної якості повітря.
- **Дезінфекція та санітарна обробка** кухні, їдальні, душових та туалетів.

4. Навчання та інструктаж екіпажу

					<i>KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ</i>	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- **Початковий інструктаж** для нових членів екіпажу щодо правил безпеки та аварійних процедур.
- **Регулярне проведення тренувань** з евакуації, дій у випадку пожежі, витоку палива чи хімічних речовин.
- **Курси першої медичної допомоги** для екіпажу.

5. Технічна безпека та обслуговування обладнання

- **Плановий технічний огляд і ремонт** суднового обладнання та механізмів.
- **Встановлення захисних огорожень** на небезпечних ділянках.
- **Робота з електрообладнанням** лише кваліфікованим персоналом.

6. Запобігання пожежам і аваріям

- **Оснащення судна пожежним обладнанням** (вогнегасники, пожежні гідранти, системи пожежної сигналізації).
- **Контроль за дотриманням правил зберігання та використання** легкозаймистих матеріалів.
- **Перевірка герметичності паливних систем і систем зберігання** небезпечних вантажів.

7. Організація аварійної готовності

- **Розробка плану аварійної евакуації** з чітким розподілом обов'язків серед членів екіпажу.
- **Проведення навчальних тривог** відповідно до вимог SOLAS (Міжнародної конвенції про охорону людського життя на морі).

8. Медичне забезпечення

- **Наявність медичного кабінету** з необхідними медикаментами.
- **Призначення відповідальної особи** з медичною підготовкою.
- **Можливість швидкого зв'язку** з медичними установами на суші у випадку надзвичайних ситуацій.

9. Захист від шкідливих факторів праці

- **Мінімізація шуму та вібрації** за допомогою демпферів і шумоізоляції.

					<i>KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ</i>	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- **Контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі** (відпрацьованих газів, випарів палива чи хімічних речовин).
- **Захист від фізичних небезпек**, таких як ковзання, падіння чи удари.

10. Психологічний комфорт та запобігання стресу

- Організація регулярного відпочинку та чергування робочих змін.
- Забезпечення доступу до засобів зв'язку для підтримки зв'язку з родинами.
- Проведення командних заходів для підтримки позитивного мікроклімату в колективі.

Дотримання цих заходів дозволяє мінімізувати ризики травм та захворювань, покращити умови праці на судні та забезпечити безпеку екіпажу.

Охорона екіпажу в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення безпеки екіпажу на морських суднах у надзвичайних ситуаціях (НС) є одним із найважливіших завдань судновласників і командного складу. НС на борту судна можуть бути викликані пожежами, зіткненнями, витоком небезпечних вантажів, аваріями машинного відділення, сильними штормами, піратськими нападами чи іншими непередбачуваними подіями. Правильна організація заходів із захисту екіпажу та забезпечення його готовності до надзвичайних ситуацій допомагає мінімізувати наслідки аварій і врятувати життя [10].

Організація аварійної готовності

Підготовка екіпажу до дій у надзвичайних ситуаціях починається з розробки та впровадження аварійного плану відповідно до міжнародних стандартів, таких як Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі (SOLAS).

Основні аспекти:

- Аварійний план: Документ, який описує дії екіпажу в різних сценаріях НС, включаючи евакуацію, гасіння пожежі, герметизацію пошкоджених ділянок тощо.
- Навчання та інструктаж: Регулярні навчання, включаючи навчальні тривоги, допомагають екіпажу швидко реагувати на небезпеку.
- Призначення відповідальних осіб: Кожен член екіпажу має чітко визначені обов'язки під час НС.

Пожежна безпека на судні

Пожежі є однією з найпоширеніших і найнебезпечніших надзвичайних ситуацій на борту. Для їх запобігання та ліквідації необхідно:

- Оснащення пожежним обладнанням: Вогнегасники, пожежні гідранти, системи пожежної сигналізації, автоматичні системи гасіння в машинному відділенні.
- Навчання екіпажу: Проведення тренувань з локалізації та гасіння пожежі.
- Контроль небезпечних речовин: Дотримання правил зберігання легкозаймистих матеріалів.
- Евакуація: Чіткий план евакуації у випадку пожежі з використанням рятувальних шлюпок або плотів.

Рятувальні засоби

Екіпаж судна має бути забезпечений необхідними засобами для порятунку в разі аварійної ситуації:

- Рятувальні жилети та костюми: Забезпечують захист у холодній воді.
- Рятувальні шлюпки та плоти: Оснащені засобами навігації, зв'язку, їжею та водою.
- Інструктаж із використання рятувальних засобів: Регулярне навчання екіпажу.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Системи сигналізації: Радіомаяки (EPIRB), які автоматично подають сигнал лиха.

Запобігання зіткненням і посадці на мілину

Щоб уникнути аварій унаслідок зіткнення чи посадки на мілину, необхідно:

- Дотримання правил Міжнародних правил запобігання зіткненням суден у морі (COLREG).
- Контроль роботи навігаційного обладнання: Радарів, ехолотів, GPS, автоматичних ідентифікаційних систем (AIS).
- Вахтовий режим: Організація безперервного чергування на містку та у машинному відділенні.

Захист від витоку небезпечних вантажів

На судах, що перевозять небезпечні вантажі (нафта, хімікати тощо), важливо забезпечити:

- Герметичність танків: Регулярна перевірка обладнання.
- Системи ліквідації розливів: Наявність сорбентів, загороджувальних бонів.
- Навчання екіпажу: Інструктаж із дій у разі витоку небезпечних речовин.

Охорона екіпажу під час штормів

Умови сильного шторму вимагають додаткових заходів безпеки:

- Закріплення обладнання: Усі предмети мають бути надійно закріплені, щоб уникнути травмування екіпажу.
- Обмеження руху: У штормових умовах екіпаж має переміщуватися лише у спеціально обладнаних зонах.
- Система стабілізації: Використання систем стабілізації судна для зниження хитамиці.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Захист від піратських нападів

- Для захисту екіпажу в районах із підвищеною піратською активністю передбачаються такі заходи:
- Фізичні бар'єри: Захисні огорожі, водомети.
- План дій: Розробка стратегій безпеки у випадку нападу.
- Засоби зв'язку: Швидке повідомлення берегових служб і суден у районі.

Психологічна підтримка

Під час НС важливим аспектом є підтримка психологічного стану екіпажу:

- Командна взаємодія: Чітка комунікація між членами екіпажу.
- Психологічна підготовка: Навчання екіпажу, як зберігати спокій у критичних ситуаціях.
- Регулярний відпочинок: Організація змінного графіка роботи.

Постійний моніторинг та вдосконалення

- Ефективність систем безпеки забезпечується регулярним аналізом і вдосконаленням:
- Розслідування інцидентів: Аналіз попередніх аварій для запобігання подібним ситуаціям.
- Інспекції: Регулярні перевірки обладнання та навчання екіпажу.
- Впровадження інновацій: Використання нових технологій для покращення безпеки.

Охорона екіпажу в надзвичайних ситуаціях є комплексним завданням, яке потребує поєднання технічних, організаційних і людських факторів. Дотримання міжнародних стандартів, ефективна організація роботи екіпажу та регулярне навчання є ключовими складовими безпеки на морі. Завдяки цим заходам можна значно знизити ризики та забезпечити збереження життя і здоров'я моряків.

					КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході підготовки та написання даної роботи було проаналізовано конструктивні особливості чотиритактного середньообертового двигуна МАК 7М43С, проведено аналіз сучасних способів зменшення рівня токсичності відпрацьованих газів. В результаті проведеного аналізу було встановлено, що одним з перспективних способів є домішки водню до основного палива. Це дозволяє покращити не тільки екологічні, але і ефективні показники двигунів. Розрахунки робочого процесу двигуна підтвердили доцільність такої модернізації. Зниження максимальної температури згоряння та реакційні властивості водню зменшили викиди оксидів азоту NO_x на 40% – з 10 г/кВт*год при роботі на дизельному паливі до 6 г/кВт*год при роботі з домішкою водню.

Також був проведений аналіз сучасних способів отримання водню на борту судна і виявлено, що найефективнішим є термохімічна конверсія вуглеводневих палив. Була спроектована та розрахована система отримання водню за рахунок парової конверсії етанолу. Проведені розрахунки по підбору електромагнітного клапану подачі водню.

В розділі охорони праці розглянуті основні напрямки забезпечення охорони праці на суднах та міжнародні норми та стандарти охорони праці на суднах.

Запропоновані в роботі заході дозволяють зекономити близько \$ 19581 на рік в основному за рахунок економії палива. Термін окупності запропонованих рішень становить 0,81 року або 296 днів.

					<i>KPM.142.6221мз.24.01.00.ПЗ</i>	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Significant ships of 2004. The Royal Institution of Naval Architects, 2004. pp. 51 - 52.
2. МАК М43С. Project guide, 2012. 487 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. <https://shipandbunker.com/prices>.
9. Міжнародні конвенції, кодекси, рекомендації ІМО і МАРПОЛ. Одеса, 2008. 80 с.
10. ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.

					<i>КРМ.142.6221мз.24.01.00.ПЗ</i>	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		