

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

Кафедра двигунів
внутрішнього згорання,
установок та технічної
експлуатації

«Допущений до захисту»
завідувач кафедри
Гогоренко О. А.

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розрахунок допоміжного суднового двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Освітня програма – Двигуни внутрішнього згорання

Для здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Керівник роботи

Здобувач освіти



О. С. Митрофанов

А. В. Гунько

Миколаїв 2025

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ДВЗ, У та ТЕ
О. А. Гогоренко
«___» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

Гулько Андрій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок допоміжного суднового двигуна 4ЧН 20/28
(Wartsila 4L20)

2. Керівник роботи д.т.н., проф. Митрофанов О. С.
(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 ДВЗ прототип - 4ЧН 20/28, потужність – 720 кВт;
частота обертання – 1000 хв⁻¹

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Опис конструкції двигуна 4ЧН 20/28.

2. Розрахунок робочого циклу та динаміки дизеля 4ЧН 20/28.

3. Розрахунок та проектування поршня суднового двигуна 4ЧН 20/28.

4. Аналіз та розробка заходів з охорони праці при експлуатації суднових ДВЗ.

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Поперечний розріз дизеля 4ЧН 20/28.

2. Індикаторна діаграма та діаграми динаміки дизеля 4ЧН 20/28.

3. Поршень дизеля 4ЧН 20/28.

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Митрофанов О. С., проф. каф. ДВЗ, У та ТЕ		
2	Митрофанов О. С., проф. каф. ДВЗ, У та ТЕ		
3	Митрофанов О. С., проф. каф. ДВЗ, У та ТЕ		
4	Митрофанов О. С., проф. каф. ДВЗ, У та ТЕ		

8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Виконання першого розділу		
2.	Виконання другого розділу		
3.	Виконання третього розділу		
4.	Виконання четвертого розділу		

Здобувач освіти

_____ /А. В. Гунько /
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ /О. С. Митрофанов/
 (підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна бакалаврська робота – «*Розрахунок допоміжного суднового двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)*» містить базові розрахунки, що мають місце для двигунів внутрішнього згоряння, зокрема такі, як розрахунок робочого циклу, кінематики руху та динаміки діючих сил, а також проектуванню елементів кривошипно-шатунного механізму двигуна.

Описано загальну конструкцію допоміжного суднового двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) та здійснено розрахунок робочого циклу на номінальному режимі експлуатації, а також розрахунки кінематики руху і динаміки діючих сил.

Проаналізовано умови роботи та навантаження поршнів та пальців кривошипно-шатунного механізму двигуна, а також сучасні матеріали, що застосовують у двигунобудуванні для їх виготовлення. Виконано розробку та проектування поршня та поршневого пальця допоміжного суднового двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20). Встановлено, що усі напруги у проєктованих елементах знаходяться у допустимих межах.

Детально розглянуто основні правила безпечного обслуговування суднових допоміжних дизелів екіпажем, а також проведено розрахунок необхідного штучного освітлення в машинному приміщенні.

Кваліфікаційна бакалаврська робота написана українською мовою на 60 аркушах записки та має три додатки у вигляді графічної частини роботи.

Ключові слова: допоміжний судновий дизельний двигун; робочий цикл; номінальна потужність двигуна; розрахунок динаміки; розрахунок кінематики; поршневий палець; поршень.

					КРБ.142.4227см.25.05.00.ПЗ	Лист
						4
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACTS

The bachelor's thesis – «*Calculation of the auxiliary marine engine 4CHN 20/28 (Wartsila 4L20)*» contains basic calculations for internal combustion engines, in particular, such as the calculation of the duty cycle, motion kinematics and dynamics of acting forces, as well as the design of the engine crank mechanism elements.

The general design of the auxiliary marine engine 4CHN 20/28 (Wartsila 4L20) is described, and the operating cycle at the nominal operating mode is calculated, as well as the motion kinematics and dynamics of the acting forces.

The working conditions and loads of the pistons and pins of the engine crank mechanism, as well as modern materials used in the engine industry for their manufacture, were analysed. The development and design of the piston and piston pin of the auxiliary marine engine 4CHN 20/28 (Wartsila 4L20) is carried out. It is established that all stresses in the designed elements are within the permissible limits.

The basic rules for safe maintenance of auxiliary diesel engines by the crew are considered in detail, and the necessary artificial lighting in the engine room is calculated.

The bachelor's thesis is written in Ukrainian on 60 pages and has three appendices in the form of a graphic part of the work.

Key words: auxiliary marine diesel engine; duty cycle; rated engine power; dynamics calculation; kinematics calculation; piston pin; piston.

					<i>КРБ.142.4227см.25.05.00.ПЗ</i>	Лист
						5
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
Розділ 1. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНА 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)	
1.1. Основні параметри та конструктивні особливості СОД типу 4ЧН 20/28.....	9
1.2. Висновок до розділу.....	17
Розділ 2. РОЗРАХУНОК РОБОЧОГО ЦИКЛУ ТА ДИНАМІКИ ДИЗЕЛЯ 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)	
2.1. Розрахунок робочого циклу та побудова індикаторної діаграми суднового двигуна типу 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20).....	18
2.2. Розрахунок кінематики та динаміки суднового двигуна 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20), а також побудова графіків зміни сил, діючих на КШМ.....	28
2.3. Висновок до розділу.....	38
Розділ 3. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПОРШНЯ СУДНОВОГО ДВИГУНА 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)	
3.1. Аналіз умов роботи поршня та матеріалів, що застосовують для їх виробництва.....	39
3.2. Аналіз умов роботи поршневого пальця та матеріалів, що застосовують для його виробництва.....	46
3.3. Розрахунок поршня та пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20).....	48
3.4. Висновок до розділу.....	51
Розділ 4. АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДВЗ	
4.1. Базові правила безпечного обслуговування суднових ДВЗ.....	53
4.2. Розрахунок штучного освітлення машинного приміщення судна.....	57
4.3. Висновок до розділу.....	58

ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	60

Додаток А. Поперечний розріз дизеля 4ЧН 20/28

Додаток Б. Індикаторна діаграма та діаграми динаміки

Додаток В. Поршень дизеля 4ЧН 20/28

					<i>КРБ.142.4227см.25.05.00.ПЗ</i>	Лист
						7
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Дизельні установки посідають провідне місце в транспортному флоті, причому їхній інтенсивний розвиток дає змогу припустити, що вони матимуть переважне застосування і на судах, що будуються. Так, у 2024 р. частка теплоходів у випуску суден за кількістю становила 99,3%. Це пояснюється насамперед їхньою високою енергетичною ефективністю. Коефіцієнт корисної дії дизеля перевищує 45 %, що визначає його паливну економічність. Дизелі надійні в роботі, прості в обслуговуванні та ремонті, мають обмежену витрату повітря, мало схильні до впливу атмосферних умов. Вони мають порівняно низький температурний рівень, простоту дистанційного автоматичного керування. Позитивними якостями дизелів є їхній швидкий запуск, висока прийомистість, значний гальмівний момент, що особливо важливо для транспортних установок. Суднові двигуни великої та середньої потужності можуть працювати на важкому паливі, ціна якого на світовому ринку значно нижча за ціну дизельного палива.

Поряд із позитивними якостями двигуни внутрішнього згорання мають і низку недоліків. Серед них обмежена порівняно з паровими та газовими турбінами агрегатна потужність, високий рівень шуму, токсичність випускних газів, підвищена витрата масла, більша чутливість до зростання навантаження, поява неврівноважених сил інерції та можливість виникнення крутильних коливань.

					<i>КРБ.142.4227см.25.05.00.ПЗ</i>	Лист
						8
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНА 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

1.1. Основні параметри та конструктивні особливості СОД типу 4ЧН 20/28

Судновий дизель серії L20 (рис. 1.1) виробництва фірми Wartsila – чотирьох-тактний двигун, який може працювати, як на морському дизельному паливі типу – MDO, так і важкому паливі – HFO. Причому дизелі серії L20 можуть переключатися з роботи на MDO на HFO і назад без перерви подачі потужності на будь-якому режимі навантаження дизеля.

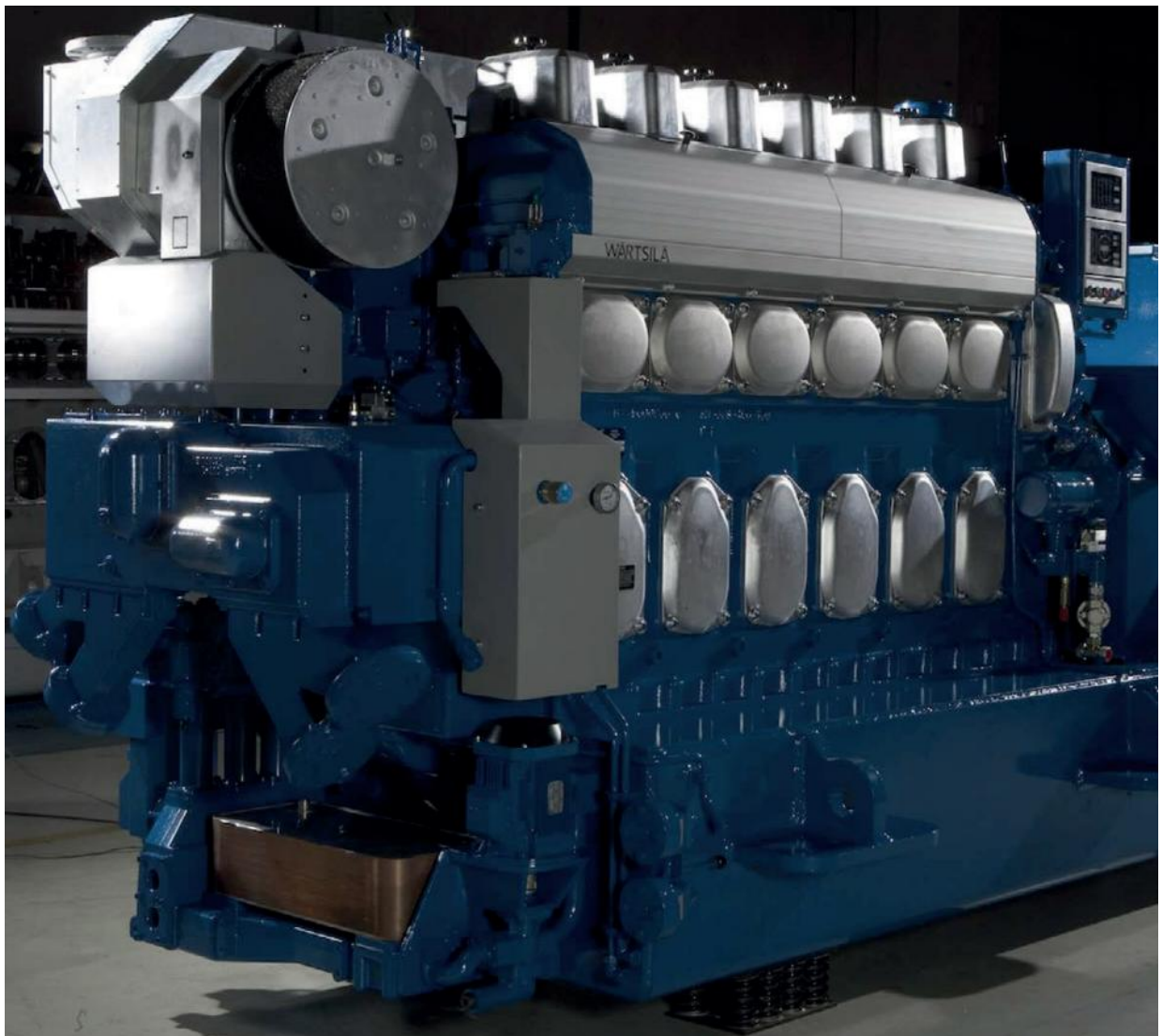


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд дизелів серії L20 виробництва фірми Wartsila

					КРБ.142.4227см.25.05.01.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		9

Суднові дизелі серії L20 виробництва фірми Wartsila довели свою надійність, безвідмовність та міцність більш ніж чотирма тисячами виготовлених та поставлених двигунів. Серія двигунів L20 була розроблена ще у 1992 р. та постійно вдосконалювалася протягом усього часу. Дизеля серії L20 охоплюють нижній діапазон потужності типорозмір них моделей дизелів фірми Wartsila.

До безперечних переваг судових дизелів серії L20 виробництва фірми Wartsila можна віднести:

- відпрацьована та досить надійна технологія роботи дизелів на важкому виді палива;
- легкий монтаж, експлуатація та обслуговування;
- низький рівень емісії шкідливих компонентів з відпрацьованими газами, що відповідає сучасним світовим нормам;
- низька витрата палива на всіх можливих діапазонах роботи дизеля;
- мінімальна кількість деталей двигуна завдяки модульній конструкції;
- вбудована надійна та проста в експлуатації система автоматики та керування дизелем.

Суднові дизелі серії L20 виробництва фірми Wartsila підходять для досить широкого діапазону використання. Завдяки своїй модульній конструкції та високій компактності двигуни серії L20 можуть бути застосовані у якості приводу генератору у складі дизель-генераторної установки, а також можуть застосовуватися у якості головних судових двигунів у дизель-редукторній енергетичній установці (наприклад для малих вантажних суден, поромів і буксирів).

Дизельний двигун 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) може ефективно працювати на різних типах паливах, з в'язкістю від 1,8 сСт до 730 сСт. Двигун 4ЧН 20/28 також здатний застосовувати паливо з низьким вмістом сірки ($S < 0,1\%$), яке рекомендовано для застосування в контрольованих на викиди токсичних компонентів районах плавання.

Той факт, що дизелі серії L20 виробництва фірми Wartsila були спочатку спроектовані для надійної та ефективної роботи з найменш якісними (палива з

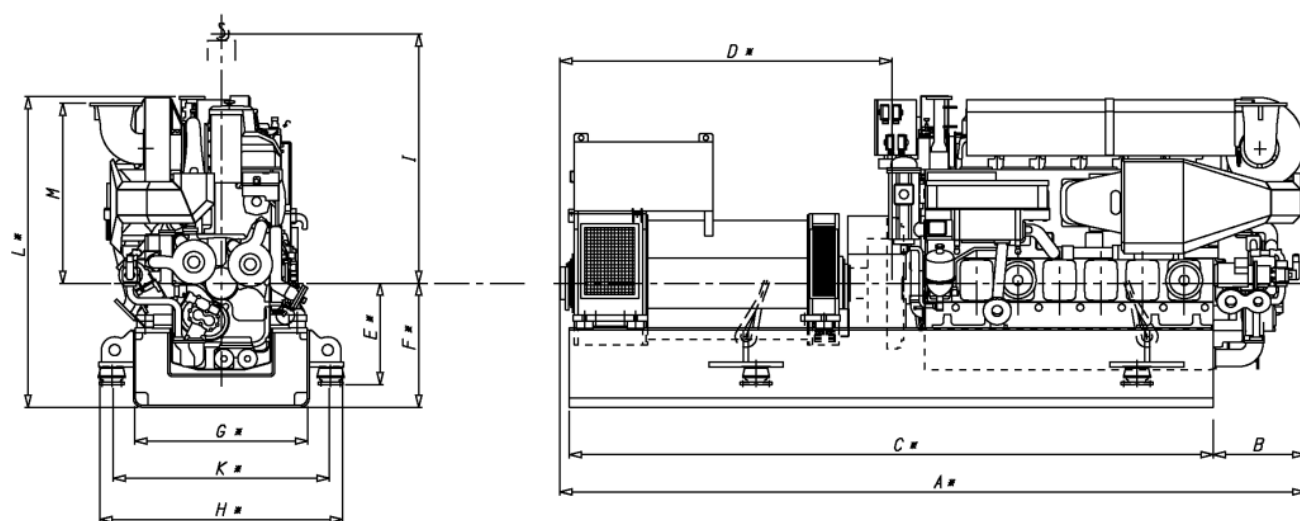
					КРБ.142.4227см.25.05.01.ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вмістом сірки та інших шкідливих складових) важкими паливами, означає, що дизелі цієї серії є максимально надійними при роботі на легких дизельних паливах.

Інтервал до проведення капітального ремонту дизелів серії L20 складає до 24000 годин.

Також відмінною особливістю даної серії є система змінного закриття впускного клапану, що забезпечило високу економію палива, особливо при низьких навантаженнях двигуна.

Основні габаритні розміри дизель-генераторної установки з двигуном 4ЧН 20/28 (4L20) подано на рис. 1.2.



Двигун	A*	B	C*	D*	E*	F*	G*	H*	I	K*	L*	M	Вага *
W 4L20	4910	665	4050	2460	725	990	1270/1420	1770/1920	1800	1580/1730	2338	1168	14.0

Рисунок 1.2 – Розміри дизель-генераторної установки з двигуном Wartsila 4L20

Блок-картер двигуна 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) є цілним, литим з чавуна (див. рис. 1.3). Блок-картер містить різні канали для подачі масла та охолоджуючої води. Дизель 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) має підвісний колінчастий вал, що є притаманним для даного типорозміру двигунів. Кришки корінних підшипників колінчастого валу кріпляться знизу до блок-картеру двома гідравлічно-затягнутими шпильками. Також для надання більшої жорсткості та надійності

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.01.ПЗ

Аркуш

11

з'єднання кришки додатково фіксуються у горизонтальній площині також гідравлічно-затягнутими болтами.

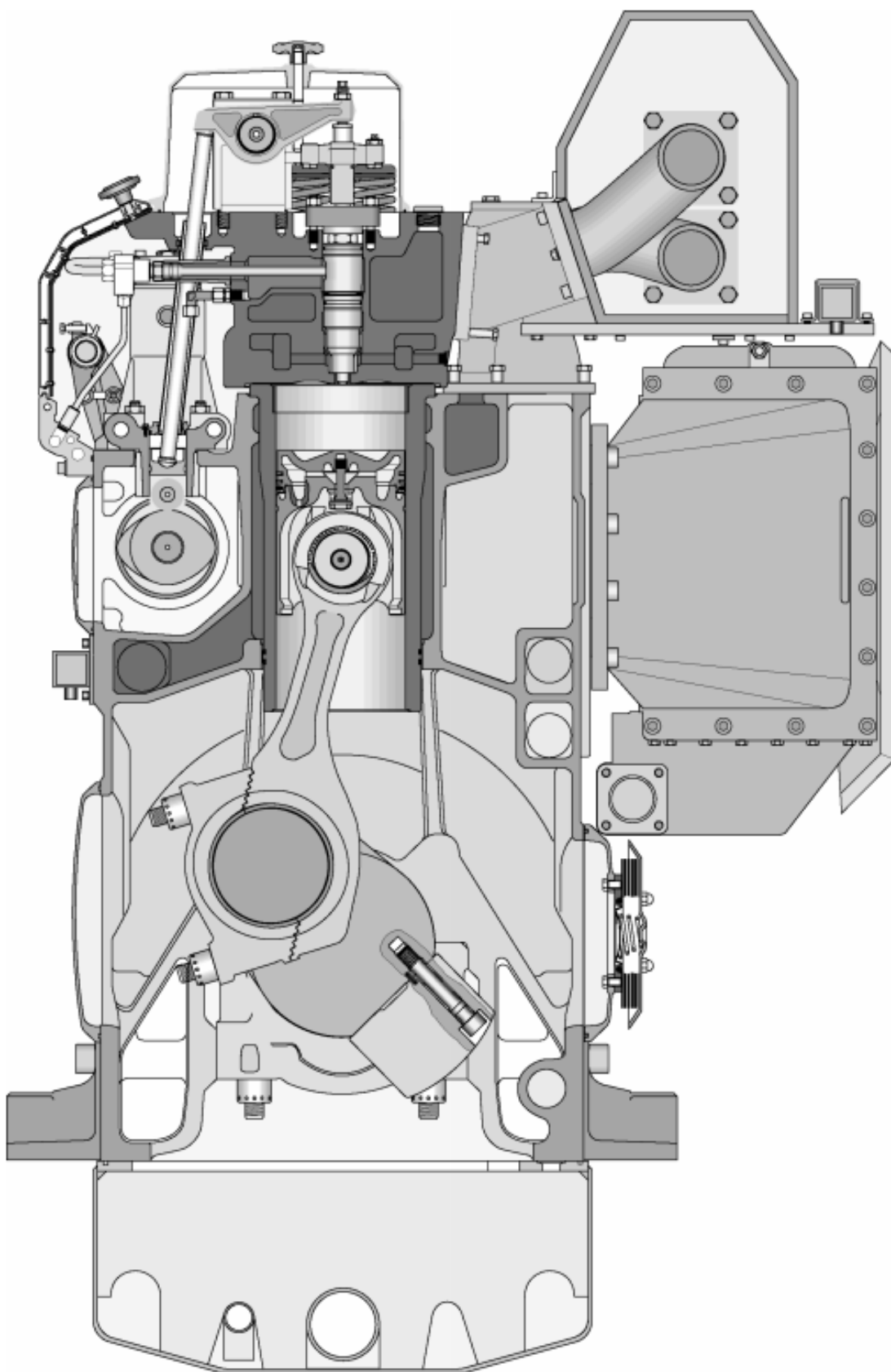


Рисунок 1.3 – Поперечний розріз СОД 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.01.ПЗ

Аркуш

12

Колінчастий вал (рис. 1.4) двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) кований з високоякісної легованої сталі. Для кування використовують один цільний шматок сталі.



Рисунок 1.4 – Вигляд колінчастого валу СОД 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

Шатун (рис. 1.5) двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) виготовлено зі високоміцного сплаву, що забезпечує надійну та безвідмовну роботу навіть при перевантаженні дизеля.



Рисунок 1.5 – Вигляд шатуна та елементів кріплення нижньої головки дизеля 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.01.ПЗ

Аркуш

13

Сполучні шпильки нижньої головки шатуна затягнуті гідравлічно. Масло для змащення поверхонь тертя потрапляє крізь виконані отвори зокрема і у стрижні шатуна.

Втулка робочого циліндру (рис. 1.6) СОД 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) виготовлено за технологією відцентрового лиття зі високоякісного сірого чавуну розробленого з підвищеними показниками зносостійкості й високої міцності. Втулка робочого циліндру мокрого типу, захищена О-подібними кільцем.



Рисунок 1.6 – Втулка робочого циліндру СОД 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

Поршень СОД 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) складається з двох частин – жароміцної сталевий головки та чавунної спідниці (рис. 1.7). Спідниця поршня дизеля 4L20 дуже добре змащується, що забезпечується контрольованим потоком масла в втулці циліндра при будь-яких умовах експлуатації дизеля.

Поршень має примусове охолодження маслом, яке поступає до сталевий головки п через шатун та поршневий палець. Канавки під поршневі кільця у верхній частині спеціально загартовані до певної твердості, що покращує зносостійкість.

Комплект поршневих кілець містить компресійні кільця та підпружинені ма-
слоз'ємні кільця. Всі кільця двигуна Wartsila 4L20 хромовані та розташовані у
верхній частині поршня.



Рисунок 1.7 – Поршень дизеля 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

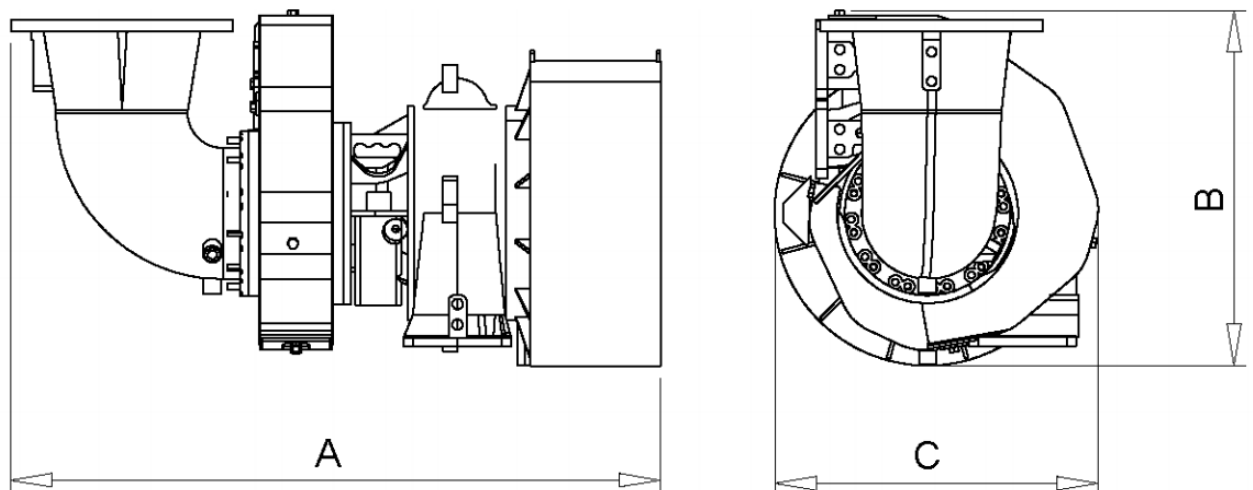
Кришка циліндру дизеля 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) виготовлена з сірого ча-
вуну (рис. 1.8). Вогневе днище має досить ефективне охолодження водою, яка по-
дається з периферії кришки в радіальному напрямку до центру.



Рисунок 1.8 – Індивідуальна кришка циліндра дизеля 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

Між каналами охолодження робочих клапанів спеціально висвердлене отвори, щоб забезпечити максимальну тепловіддачу. Сідла випускних клапанів також охолоджуються безпосередньо водою.

Турбонагнітач (рис. 1.9) системи повітропостачання, спроектовано таким чином, що він ідеальне поєднує у собі високий ступень стиснення повітря і високий ККД. Охолоджувач наддувочного повітря (ОНП) трубчастого типу та охолоджується водою.



Двигун	Турбонагнітач			
	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Weight [kg]
W 4L20	945	576	480	150

Рисунок 1.9 – Турбонагнітач системи повітропостачання дизеля 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)

Вся система газовідведення дизеля 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) розміщена у ізолюваному просторі, що складається з панелей, що легко знімаються. Для ізоляції поверхонь використовується мінеральна вата.

Дизель 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20) оснащено спеціально вбудованою модульною системою автоматизації – UNIC (вона може бути у двох різних версіях). UNIC модифікації C1 має дротовий сигнальний інтерфейс із зовнішніми системами. UNIC модифікації C2 має інтерфейс для керування функціями та інтерфейс зв'язку у вигляді шини для сигналізації та здійснення контролю.

Обидві версії системи UNIC мають спеціальний модуль безпеки дизеля та панель керування, встановлені на самому двигуні. Модуль безпеки дизеля обробляє найважливіші параметри та відповідає за безпеку, наприклад, перевищення швидкості обертання, тиску масла. Модуль безпеки системи UNIC також виявляє можливі несправності та оповіщення сигналом про виявлену поломку. Панелі керування дизелем мають кнопки пуску і зупинки, а також дисплей, який демонструє найбільш важливі параметри роботи двигуна. Контроль частоти обертання колінчастого валу дизелів серії L20 обов'язково включений в систему автоматизації. Додаткові функції системи UNIC модифікації C2: всі необхідні функції керування дизелем додатково обробляються обладнанням двигуна, застосовано шини зв'язку пов'язані із зовнішніми системами двигуна, наявність більш інформаційний дисплея.

1.2. Висновок до розділу

Судновий СОД 4ЧН 20/28 (4L20) виробництва фінської двигунобудівної компанії Wartsila має сучасну конструкцію, низькі показники ефективної витрати палива та забруднення навколишнього середовища. Однак конструкторами даного дизеля було заздалегідь закладено додатковий потенціал для подальшого форсування та покращення експлуатаційних показників.

					КРБ.142.4227ст.25.05.01.ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК РОБОЧОГО ЦИКЛУ ТА ДИНАМІКИ ДИЗЕЛЯ 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

2.1. Розрахунок робочого циклу та побудова індикаторної діаграми су- днового двигуна типу 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

Розрахункові цикли різних теплових машин різного ступеня складності мають значні відхилення і ряд закладених припущень від реальних циклів, що протікають у теплових двигунах. У всіх розрахункових циклах двигунів внутрішнього згоряння у залежності від обраної методики та складності, кількості прийнятих припущень і ще багатьох супутніх факторів може враховуватися чи ні деякі наступні процеси і явища:

- змінення кількості та якості робочого тіла (складу, а також фізичних властивостей);

- у разі кінцевої швидкості процесу тепловиділення при згоряння циклової дози пального й процесу дисоціювання компонентів згоряння хімічна енергія, яку містить паливо виділяється не миттєво, а поступово;

- при протіканні процесу розширення робочого тіла в циліндрі теплового двигуна відбувається поступове догоряння присутніх залишків пального та відновлених, після дисоціації, газів, з подальшим деяким виділенням певної кількості теплоти;

- робоче тіло у циліндрі двигуна має змінну теплоємність, що пов'язано з тим, що температура та склад газів в циліндрі двигуна постійно (перш за все у результаті вигорання палива) змінюється;

- врахування усіх присутніх теплових (процес теплообміну між стінками робочого об'єму і робочім тілом, між нагрітими деталями ДВЗ і охолоджуючою рідиною, та інші) та аеродинамічних втрат у двигуні.

Відповідно з зазначеним вище дійсний цикл, що відбуваються у тепловому двигуні на сьогодні не може бути математично описаними повністю на сто відсотків із за обмежень і недосконалості розроблених вченими розрахункових методик

					КРБ.142.4227см.25.05.02.ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

й значної складності процесів, що відбуваються в робочому просторі реального теплового двигуна.

Варто відзначити, що чим досконаліша (точно описана) математична модель теплового розрахунку, тим точніші й достовірніші одержані результати моделювання теплового розрахунку до дійсних у тому чи іншому процесі циклу.

В кваліфікаційній бакалаврській роботі було застосовано класичну загальноприйнятну методику теплового розрахунку ДВЗ, яка була сформульована й структурована ще на початку минулого століття відомим вченим В.І. Гріневецьким і у подальшому дороблена і вдосконалена професором Є.К. Мазінгом (насьогодні має назву – методика Гріневецького–Мазінга). Ця методика була заснована на фундаментальних, загально відомих основах термохімії, а також термодинаміки.

Підхід опису процесів у методиці Гріневецького–Мазінга, який було запропоновано професором Гріневецьким, досить вдало та повно охоплює сутність теплових (базових) явищ, що відбуваються в робочому просторі.

Запропонована Гріневецьким методика є досить надійною та точною, особливо для виконання інженерно-аналітичних розрахунків та попередніх теоретичних досліджень існуючих чи перспективних двигунів.

На основі методики Гріневецького–Мазінга дослідник може здійснити:

- кількісне оцінювання базових явищ у ДВЗ, як на етапі проектування двигуна так і при виконанні досліджень існуючих вже двигунів;
- отримати загальну уяву щодо важливих параметрів робочого циклу двигуна та його показників енергетичної та економічної ефективності;
- дослідити вплив параметрів процесу на ефективність енергоперетворення;
- одержати величини параметрів стану робочого тіла (температури робочого тіла та тиску) у характерних точка, таких, як початок/кінець процесу стиснення, максимальний тиск/температура згоряння, кінець процесу розширення.

Методика представлена у програмному комплексі *Matcad* у вигляді програми розрахунку робочого циклу з уточненням параметрів агрегату наддуву. Програма є доступною та може вільно застосовуватися здобувачами освіти кафедри ДВЗ, У та ТЕ, НУК ім. адм. Макарова.

					КРБ.142.4227см.25.05.02.ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розрахунок циклу дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20), виконано для номінального режиму експлуатації двигуна (максимальна вихідна потужність та оберти). Вихідні дані для здійснення теплового розрахунку та його результати для зручності подальшого використання та аналізу наведено у табличній формі (табл. 2.1 й 2.2).

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для моделювання режиму номінального навантаження дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

№ з.п.	Параметри	Значення/розмірність
1	Номінальна ефективна потужність дизеля	$N'_e = 720$ кВт
2	Номінальна частота обертання колінчастого валу	$n = 1000$ хв ⁻¹
3	Тиск навколишнього середовища	$P_0 = 0,1013$ МПа
4	Температура навколишнього середовища	$T_0 = 298$ К
5	Тиск наддуву	$P_k = 0,4$ МПа
6	Коефіцієнт продувки робочого циліндру дизеля	$\varphi_a = 1,05$
7	Коефіцієнт залишкових газів у робочому циліндрі	$\gamma_r = 0,02$
8	Коефіцієнт використання виділеної теплоти в точці – z	$\xi_z = 0,95$
9	Коефіцієнт використання виділеної теплоти в точці – b	$\xi_b = 0,98$
10	Ступінь стиснення дизеля	$\varepsilon = 15$
11	Ступінь підвищення тиску при згорянні	$\lambda = 1,2$
12	Підігрів заряду повітря від стінок циліндру дизеля	$\Delta T_a = 20$
13	Частка ходу поршня витрачена на продувку (для 2-х тактних двигунів)	$\phi_n = 0$
14	Коефіцієнт округлення теоретичної індикаторної діаграми	$\zeta = 0,99$
15	Механічний ККД двигуна	$\eta_m = 0,90$
16	Адіабатний ККД компресору агрегата наддуву	$\eta_{k.ad} = 0,83$
17	Втрата тиску стиснутого повітря в ОНП	$\Delta P_{ox} = 0,004$ МПа
18	ККД охолоджувача стиснутого повітря	$\eta_o = 0,87$
19	Температура газів, що залишилися у циліндрі дизеля	$T_r = 800$ К
20	Масовий склад застосованого на двигуні палива (кг/кг):	$C = 0,87; H = 0,126; O = 0,004; S = 0$
21	Нижча теплота згоряння застосованого на двигуні палива	$Q_H = 42700$ кДж/кг
22	Кількість циліндрів дизеля	$i = 4$
23	Діаметр циліндру дизеля	$D_c = 0,2$ м
24	Хід поршня дизеля	$S = 0,28$ м
25	Коефіцієнт тактності дизеля	$z = 0,5$
26	Коефіцієнт надлишку повітря	$\alpha = 2,2625$
27	Показник адіабати для свіжого повітря	$k_B = 1,4$
28	ККД адіабатний турбіни	$\eta_{t.ad} = 0,82$
29	ККД механічний турбіни	$\eta_{t.m} = 0,92$
30	Температура води охолодження	$T_w = 300$, К
31	Коефіцієнт втрат тиску на впуску	$\xi_a = 0,98$

32	Відношення тисків перед турбіною до тиску за компресором	$\psi_t = 0,816$
----	--	------------------

Таблиця 2.2 – Результати теплового розрахунку дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

№ з.п.	Параметри / спосіб визначення	Значення / розмірність
Процес наповнення		
1	Температура за наддувним компресором, $T_k = T_0 \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{0.286} - 1}{\eta_{kad}} \right]$	470,733102 К
2	Температура у впускному ресивері $T_s = T_k - \eta_o \cdot (T_k - T_w)$	322,19501 К
3	Температура заряду повітря в кінці наповнення, $T_a = \frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}$	351,17211 К
4	Тиск у ресивері ДВЗ, $P_s = P_k - \Delta P_{ox}$	0,396001 МПа
5	Тиск у кінці наповнення циліндру ДВЗ, $P_a = \xi_a \cdot P_s$	0,3881101 МПа
6	Коефіцієнт наповнення $\eta_n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{P_a}{P_s} \cdot \frac{T_s}{T_a} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_r} \cdot (1 - \phi_n)$	0,94412
Процес стиснення		
7	Середня мольна ізохорна теплоємність свіжого повітря	$c_v' \leftarrow 19,26 + 0,0025 \cdot T$ кДж/(кмоль·К)
8	Середня мольна ізохорна теплоємність відпрацьованих газів (ВГ)	$c_v'' \leftarrow 20,47 + 0,0036 \cdot T$ кДж/(кмоль·К)
9	Коефіцієнти у рівнянні регресії теплоємності суміші газів на кінці процесу стиснення $c_{vc}'' = \frac{\gamma_r \cdot c_v'' + [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - \gamma_r] \cdot c_v'}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r)} = a_{vc} - b_c \cdot T$	$b_c = 0,00251; a_{vc} = 19,2701$
10	Показник політропи стиснення $n_1 - 1 = \frac{8.13}{a_{vc} + b_c \cdot T_a \cdot (1 + \varepsilon^{n_1 - 1})}$	1,361011
11	Тиск повітря на кінці стиснення, $P_c = P_a \cdot \varepsilon^{n_1}$	15,48901 МПа
12	Температура на кінці стиснення, $T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_1 - 1}$	934,441001 К
Процес згоряння		
13	Дійсна кількість свіжого повітря для здійснення згоряння $L = \frac{\alpha}{0.21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right)$	1,119 кмоль/кг
14	Коефіцієнт молекулярної зміни $\beta_0 = 1 + \frac{8 \cdot H + O}{32 \cdot L}$	1,0283
15	Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни $\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}$	1,02771
16	Частка пального, що згорає до z, $x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b}$	0,969001

17	Коефіцієнт молекулярної змінення у з $\beta_z = 1 + \left(\frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \cdot x_z$	1,02701
18	Середня ізохорна теплоємність у з $c''_{vz} = \frac{(m \cdot x_z + \gamma_r) \cdot c''_v + [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - (x_z + \gamma_r)] \cdot c'_v}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + (m - 1) \cdot x_z} = a_{vz} + b_z \cdot T$ $\Delta M = \left(\frac{H}{4} + \frac{O}{32} \right), \quad m = 1 + \frac{\Delta M}{L_0}, \quad L_0 = 0.495 \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}$	$m=1,064; \Delta M=0,0316$ $b_z = 0,00299112; a_{vz} = 19,796821$
19	Коефіцієнти рівняння регресії визначення теплоємності в точці b $c_{vb} = \frac{(m + \gamma_r) \cdot c''_v + (\alpha - 1) \cdot (1 + \gamma_r) \cdot c'_v}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + (m - 1)} = a_{vb} + b_b \cdot T$	$b_b = 0,003003$ $a_{vb} = 19,813001$
20	Температура в точці z $\frac{\xi_z \cdot Q_H}{\alpha \cdot L_0} + [c'_v + 8.314 \cdot \lambda + \gamma_r \cdot (c''_v + 8.314 \cdot \lambda)] \cdot T_c = \beta_z \cdot (1 + \gamma_r) \cdot c''_{pz} \cdot T_z$	1876,55812 K
21	Максимальний тиск в точці z $P_z = \lambda \cdot P_c$	18,5870 МПа
Процес розширення		
22	Супінь попереднього розширення $\rho = \frac{\beta_z}{\lambda} \cdot \frac{T_z}{T_c}$	1,72001
23	Супінь подальшого розширення $\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}$	8,7191
24	Показник політропи розширення $n_2 = \frac{8.314 \cdot \left(\frac{\beta_z}{\beta} \cdot T_z - T_b \right)}{\frac{Q_H \cdot (\xi_b - \xi_z)}{L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta} + \frac{\beta_z}{\beta} \cdot (a_{vz} + b_z \cdot T_z) \cdot T_z - (a_{vb} + b_b \cdot T_b) \cdot T_b} + 1$ $T_b = T_z \cdot \frac{1}{\delta^{n_2-1}}$ температури в точці b	$n_2 = 1,2802$ $T_b = 1025,0711 \text{ K}$
25	Тиск у точці b $P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}$	1,1632 МПа
Індикаторні показники		
26	Теоретичний індикаторний середній тиск у циліндрі, $P'_i = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \cdot \left[\lambda \cdot (\rho - 1) + \frac{\lambda \cdot \rho}{n_2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right]$	2,7553 МПа
27	Дійсний індикаторний середній тиск у циліндрі, $P_i = P'_i \cdot \zeta \cdot (1 - \phi_n)$	2,72801 МПа
28	Питома індикаторна витрата палива $b_i = 433 \cdot \frac{P_s \cdot \eta_H}{\alpha \cdot L_0 \cdot T_s \cdot P_i}$	0,16501 кг/(кВт·год)
29	ККД дизеля індикаторний, $\eta_i = \frac{3600}{b_i \cdot Q_H}$	0,5121
Ефективні показники		
30	Ефективний середній тиск дизеля, $P_e = P_i \cdot \eta_m$	2,45501 МПа
31	ККД дизеля ефективний, $\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$	0,46131
32	Ефективна питома витрата пального дизеля, $b_e = \frac{b_i}{\eta_m}$	0,1828 кг/(кВт·год)

33	Ефективна потужність, $N_e = 13.1 \cdot D_c^2 \cdot S_c \cdot z \cdot P_e \cdot n \cdot i$	720,3591 кВт
34	Похибка розрахунку $\Delta N = \frac{N_e - N'_e}{N_e}$	0,05 %
Оцінка дійсного P_k		
35	Витрата повітря $G = \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \right) \cdot S_c \cdot \left(\frac{P_s \cdot 10^6}{R \cdot T_s} \right) \cdot \eta_H \cdot i \cdot z \cdot \left(\frac{n}{60} \right) \cdot \phi_a$	1,245 кг/год
36	Витрата ВГ, $G_t = G + b_e \cdot \frac{N_e}{3600}$	1,282 кг/год
37	Тиск ВГ, $P_r = \psi_t \cdot P_k$	0,32601 МПа
38	Температура ВГ, $T_t = T_b \cdot \left(\frac{P_r}{P_b} \right)^{\frac{n_2-1}{n_2}}$	776,456 К
39	Загальна кількість ВГ (продуктів згоряння) $M_s = \left(\frac{C}{12} \right) + \left(\frac{H}{2} \right) + [0.21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0] + (0.79 \cdot \alpha \cdot L_0)$	1,15101 кмоль/кг
40	Універсальна газова стала для ВГ (продуктів згоряння), $R_t = \frac{1}{\frac{C}{12 \cdot M_s \cdot 189} + \frac{H}{2 \cdot M_s \cdot 461.6} + \frac{0.21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0}{M_s \cdot 259.8} + \frac{0.79 \cdot \alpha \cdot L_0}{M_s \cdot 296.8}}$	287,42701 Дж/кг·К
41	Показник адіабати ВГ $k_t = \frac{(a_{vb} + b_b \cdot T_t) + 8.314}{a_{vb} + b_b \cdot T_t}$	1,37501
42	Дійсний ступінь підвищення тиску двигуна $P_k = \left[1 + \frac{\left(\frac{k_t}{k_t - 1} \right) \cdot R_t \cdot T_t \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{P_r}{P_0} \right)^{\frac{1}{k_t}}} \right] \cdot \eta_{t.m} \cdot \eta_{t.ad} \cdot G_t}{G \cdot R \cdot T_0 \cdot \left(\frac{k_B}{k_B - 1} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{kad}}} \right]^{\frac{1}{0.286}}$	3,95111
43	Дійсний тиск наддуву $P_{kd} = P_k \cdot P_0$	0,400201 МПа
44	Похибка розрахунку $\Delta P_k = \frac{P_{kd} - P_k}{P_{kd}}$	0,049 %

За отриманими при розрахунках даними (табл. 2.2), аналітичним шляхом розраховується й, відповідно, будується теоретичну індикаторну діаграму (у координатах $p-V/V_c$) дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20). Вихідні дані для виконання розрахунку – таблиця 2.3, результати – у табл. 2.4. Ординати точок наведені у

таблиці 2.4 отримано використовуючи залежності: – політропи стиснення –

$$p = \frac{P_c}{\left(\frac{V}{V_c}\right)^{n_1}}, \text{ а також розширення } - p = \frac{P_z \cdot \rho^{n_2}}{\left(\frac{V}{V_c}\right)^{n_2}}.$$

Таблиця 2.3 – Початкові дані для побудови індикаторної діаграми дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у p – V/V_c координатах

P_r , МПа	P_a , МПа	P_s , МПа	P_k , МПа	P_b , МПа	P_c , МПа	P_z , МПа	n_1	n_2	ρ	δ
0,326101	0,38801	0,39612	0,400212	1,163201	15,48921	18,58701	1,36103	1,2804	1,72021	8,71904

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку індикаторної діаграми дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у p – V/V_c координатах

№ з.п.	Значення точок діаграми		
	(V/V_c)	$P_{ст}$	$P_{розш}$
1	1	15,489	18,587
2	1,72	7,404047	18,587
3	2,418947	4,654873	12,01279
4	3,117895	3,295171	8,680466
5	3,816842	2,502211	6,700456
6	4,515789	1,990356	5,402896
7	5,214737	1,636327	4,49395
8	5,913684	1,378874	3,825668
9	6,612632	1,184388	3,315939
10	7,311579	1,033009	2,915758
11	8,010526	0,912306	2,594177
12	8,709474	0,814131	2,330752
13	9,408421	0,732938	2,111467
14	10,10737	0,66483	1,926411
15	10,80632	0,606999	1,768391
16	11,50526	0,557369	1,632068
17	12,20421	0,51438	1,513399
18	12,90316	0,476833	1,409272
19	13,60211	0,443798	1,317255
20	14,30105	0,414541	1,23542
21	15	0,388475	1,162221

Теоретична (згорнута) індикаторна діаграма дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у p – V/V_c координатах, подана на рис. 2.1.

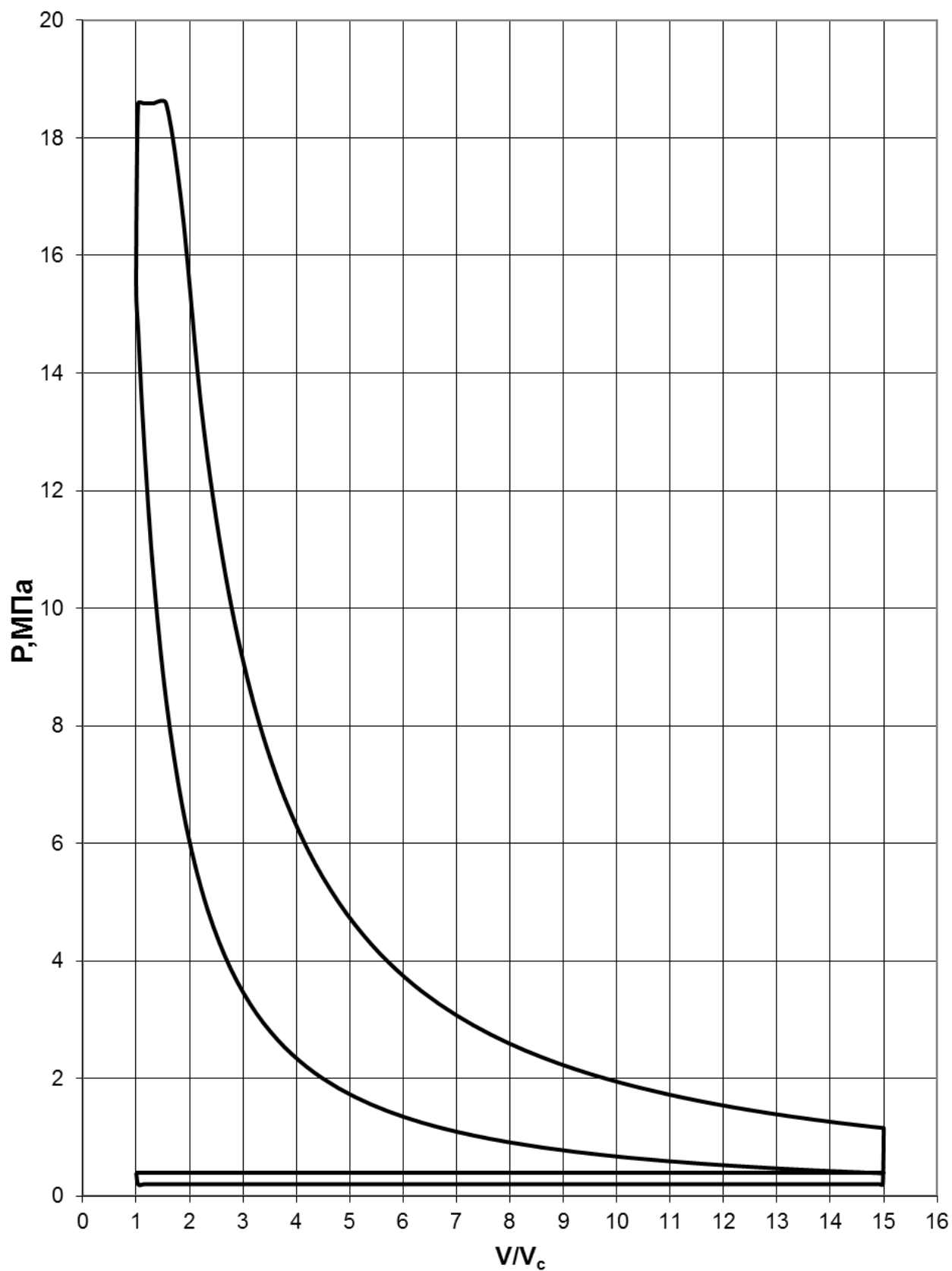


Рисунок 2.1 – Теоретична індикаторна діаграма дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у $p-V/V_c$ координатах

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227ст.25.05.02.ПЗ

Аркуш

25

За отриманими при розрахунках даними (табл. 2.2), аналітичним шляхом розраховується й, відповідно, будується теоретичну індикаторну діаграму (у координатах $T-V/V_c$) дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20). Вихідні дані для виконання розрахунку – таблиця 2.5, результати – у табл. 2.6. Ординати точок наведені у таблиці 2.4 отримано використовуючи залежності: – політропи стиснення –

$$T = \frac{T_c}{\left(\frac{V}{V_c}\right)^{n_1-1}}, \text{ а також розширення } - T = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}, \text{ температура в точці діаграми у } -$$

$$T_y = T_c \lambda.$$

Таблиця 2.5 – Початкові дані для побудови індикаторної діаграми дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у $T-V/V_c$ координатах

T_r, K	T_a, K	T_s, K	T_k, K	T_b, K	T_c, K	T_z, K	λ
776,456112	351,172002	322,195121	470,733132	1025,07014	934,421021	1878,55811	1,20

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку індикаторної діаграми дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у $T-V/V_c$ координатах

№ з.п.	Значення точок діаграми		
	(V/V_c)	$T_{\text{стис}}, K$	$T_{\text{розш}}, K$
1	1	934,421	1121,305
2	1,72	768,2752	1878,558
3	2,418947	679,2872	1707,486
4	3,117895	619,81	1590,345
5	3,816842	576,1657	1502,78
6	4,515789	542,2302	1433,663
7	5,214737	514,78	1377,043
8	5,913684	491,9283	1329,39
9	6,612632	472,4844	1288,451
10	7,311579	455,6533	1252,707
11	8,010526	440,8806	1221,089
12	8,709474	427,7653	1192,82
13	9,408421	416,0093	1167,315
14	10,10737	405,3855	1144,126
15	10,80632	395,7172	1122,905
16	11,50526	386,8645	1103,371
17	12,20421	378,7151	1085,3
18	12,90316	371,1772	1068,508
19	13,60211	364,1755	1052,841
20	14,30105	357,6471	1038,173
21	15	351,5391	1024,394

Теоретична індикаторна діаграма дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у T – V/V_c координатах, подана на рис. 2.2.

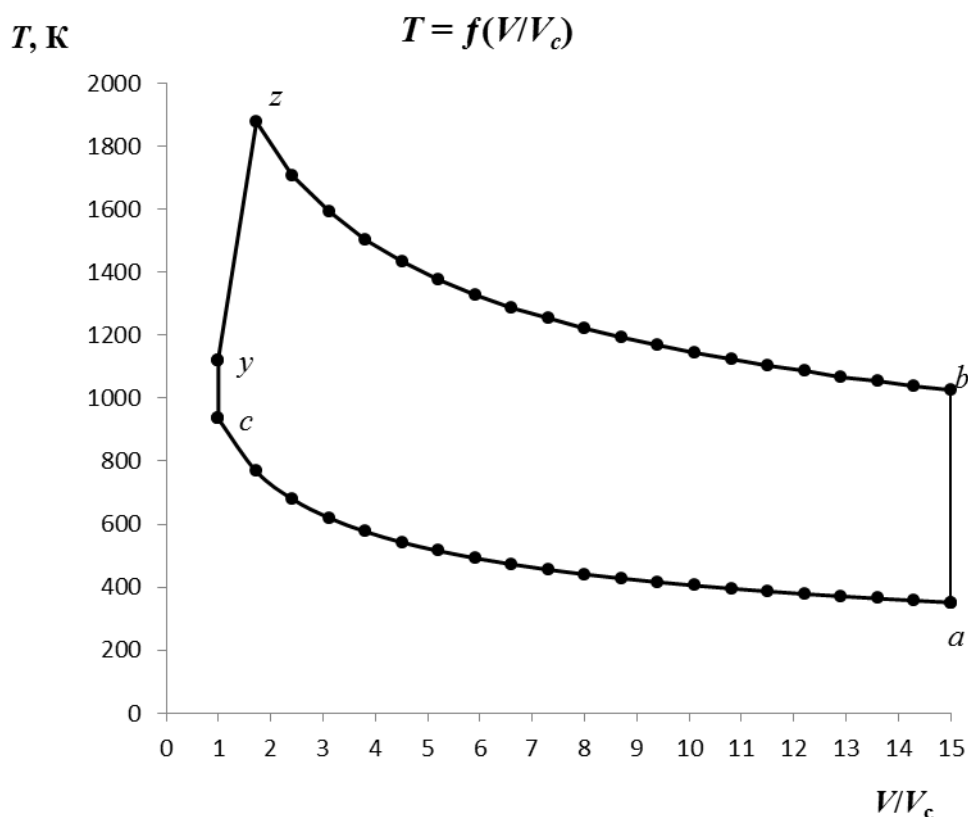


Рисунок 2.2 – Теоретична індикаторна діаграма дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у T – V/V_c координатах

За отриманими при розрахунках даними (табл. 2.2), аналітичним шляхом розраховується й, відповідно, будується теоретичну індикаторну діаграму (у координатах T – S) дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20).

Для оцінки значення ентропії застосовуємо залежність вигляду:

$$S = \left[c_p \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \right]$$

У рівнянні ентропії c_p – ізобарна теплоємність, R – газова стала, а T_0 , p_0 – відповідні значення температури і тиску навколишнього середовища. Таким чином, для процесу стиснення –

$$S = \left[c_{p_i} \cdot \ln \left(\frac{T_{сж}}{T_0} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_{сж}}{p_0} \right) \right],$$

розширення буде $S = \left[c_{pi} \cdot \ln \left(\frac{T_{раси}}{T_0} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_{раси}}{p_0} \right) \right]$.

Теоретична індикаторна діаграма дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у T - S координатах, подана на рис. 2.3.

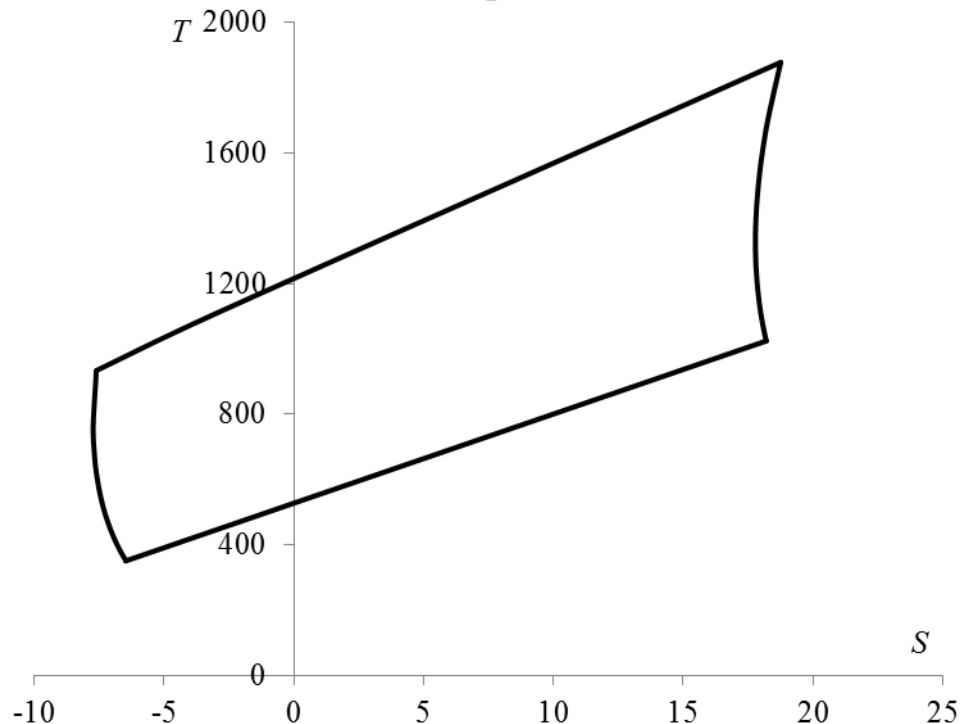


Рисунок 2.3 – Теоретична індикаторна діаграма дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) у T - S координатах

2.2. Розрахунок кінематики та динаміки суднового двигуна 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20), а також побудова графіків зміни сил, діючих на КШМ

Переміщення поршня суднового двигуна 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) ви-
значається, як:

$$S_{\varphi} = r \cdot \left[(1 - \cos \varphi) + \left(\frac{1}{\lambda} \right) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right) \right].$$

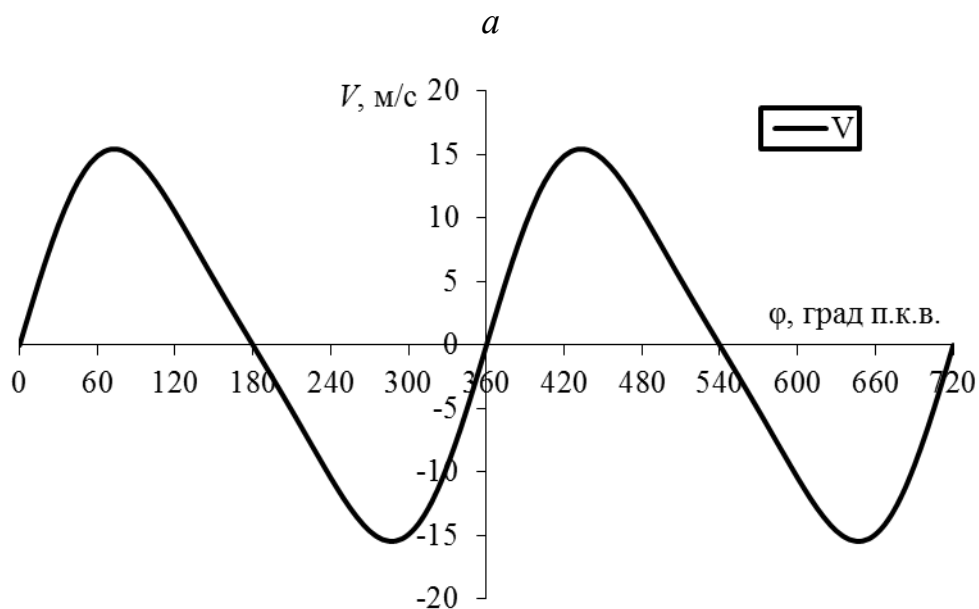
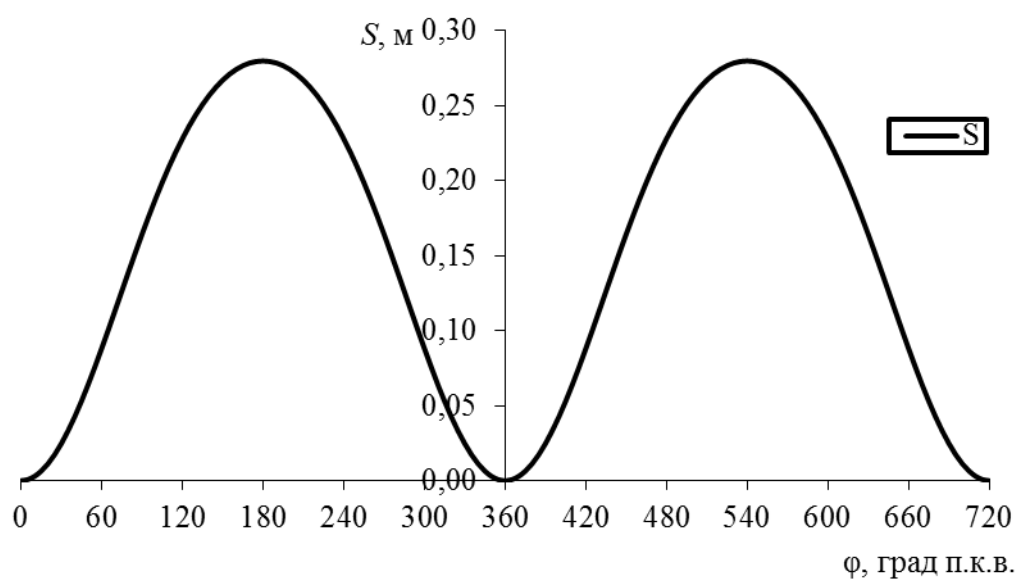
Швидкість поршня суднового двигуна 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) є пер-
шою похідною за часом від переміщення поршня, тоді маємо вираз:

$$V_{\varphi} = r \cdot \omega \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}.$$

Прискорення поршня суднового двигуна 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) є похідною за часом від швидкості, тоді маємо вираз:

$$j_{\varphi} = r \cdot \omega \cdot \left[\frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} + \lambda \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^3 \beta} \right].$$

Графіки переміщення поршня його швидкості та відповідно прискорення від кута φ (кут повороту колінвалу) суднового дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) представлені на рис. 2.4, а їх координати (розрахункові значення точок) – таблиці – 2.7



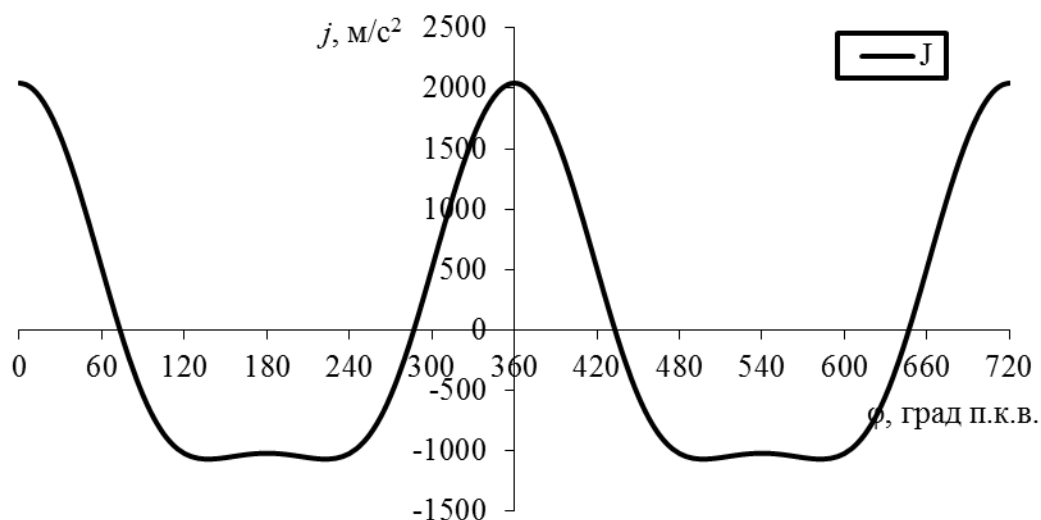
б

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.02.ПЗ

Аркуш

29



в

Рисунок 2.4 – Діаграми кінематики дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20): а – переміщення поршня дизеля; б – швидкість поршня; в – прискорення поршня

Таблиця 2.7 – Розрахункові значення точок діаграм переміщення, швидкості та прискорення поршня дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

φ°	S, м	V, м/с	j, м/с ²
0	0,000	0,000	2043,972
5	0,001	1,703	2030,997
10	0,003	3,385	1992,263
15	0,006	5,024	1928,349
20	0,011	6,599	1840,222
25	0,017	8,091	1729,248
30	0,025	9,481	1597,193
35	0,033	10,753	1446,231
40	0,043	11,891	1278,931
45	0,053	12,884	1098,245
50	0,064	13,722	907,466
55	0,076	14,397	710,172
60	0,088	14,905	510,137
65	0,101	15,247	311,223
70	0,113	15,424	117,241
75	0,126	15,442	-68,198
80	0,139	15,310	-241,848
85	0,152	15,039	-400,968
90	0,164	14,642	-543,450
95	0,176	14,134	-667,904
100	0,188	13,529	-773,690
105	0,199	12,844	-860,898
110	0,209	12,094	-930,283
115	0,219	11,294	-983,154
120	0,228	10,456	-1021,242
125	0,236	9,592	-1046,553
130	0,244	8,711	-1061,236
135	0,251	7,823	-1067,451
140	0,257	6,932	-1067,277

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.02.ПЗ

Аркуш

30

145	0,263	6,044	-1062,633
150	0,267	5,161	-1055,232
155	0,271	4,285	-1046,553
160	0,274	3,417	-1037,828
165	0,277	2,556	-1030,047
170	0,279	1,700	-1023,963
175	0,280	0,849	-1020,105
180	0,280	0,000	-1018,785
185	0,280	-0,849	-1020,105
190	0,279	-1,700	-1023,963
195	0,277	-2,556	-1030,047
200	0,274	-3,417	-1037,828
205	0,271	-4,285	-1046,553
210	0,267	-5,161	-1055,232
215	0,263	-6,044	-1062,633
220	0,257	-6,932	-1067,277
225	0,251	-7,823	-1067,451
230	0,244	-8,711	-1061,236
235	0,236	-9,592	-1046,553
240	0,228	-10,456	-1021,242
245	0,219	-11,294	-983,154
250	0,209	-12,094	-930,283
255	0,199	-12,844	-860,898
260	0,188	-13,529	-773,690
265	0,176	-14,134	-667,904
270	0,164	-14,642	-543,450
275	0,152	-15,039	-400,968
280	0,139	-15,310	-241,848
285	0,126	-15,442	-68,198
290	0,113	-15,424	117,241
295	0,101	-15,247	311,223
300	0,088	-14,905	510,137
305	0,076	-14,397	710,172
310	0,064	-13,722	907,466
315	0,053	-12,884	1098,245
320	0,043	-11,891	1278,931
325	0,033	-10,753	1446,231
330	0,025	-9,481	1597,193
335	0,017	-8,091	1729,248
340	0,011	-6,599	1840,222
345	0,006	-5,024	1928,349
350	0,003	-3,385	1992,263
355	0,001	-1,703	2030,997
360	0,000	0,000	2043,972
365	0,001	1,703	2030,997
370	0,003	3,385	1992,263
375	0,006	5,024	1928,349
380	0,011	6,599	1840,222
385	0,017	8,091	1729,248
390	0,025	9,481	1597,193
395	0,033	10,753	1446,231
400	0,043	11,891	1278,931
405	0,053	12,884	1098,245
410	0,064	13,722	907,466
415	0,076	14,397	710,172
420	0,088	14,905	510,137
425	0,101	15,247	311,223
430	0,113	15,424	117,241
435	0,126	15,442	-68,198
440	0,139	15,310	-241,848

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.02.ПЗ

Аркуш

31

445	0,152	15,039	-400,968
450	0,164	14,642	-543,450
455	0,176	14,134	-667,904
460	0,188	13,529	-773,690
465	0,199	12,844	-860,898
470	0,209	12,094	-930,283
475	0,219	11,294	-983,154
480	0,228	10,456	-1021,242
485	0,236	9,592	-1046,553
490	0,244	8,711	-1061,236
495	0,251	7,823	-1067,451
500	0,257	6,932	-1067,277
505	0,263	6,044	-1062,633
510	0,267	5,161	-1055,232
515	0,271	4,285	-1046,553
520	0,274	3,417	-1037,828
525	0,277	2,556	-1030,047
530	0,279	1,700	-1023,963
535	0,280	0,849	-1020,105
540	0,280	0,000	-1018,785
545	0,280	-0,849	-1020,105
550	0,279	-1,700	-1023,963
555	0,277	-2,556	-1030,047
560	0,274	-3,417	-1037,828
565	0,271	-4,285	-1046,553
570	0,267	-5,161	-1055,232
575	0,263	-6,044	-1062,633
580	0,257	-6,932	-1067,277
585	0,251	-7,823	-1067,451
590	0,244	-8,711	-1061,236
595	0,236	-9,592	-1046,553
600	0,228	-10,456	-1021,242
605	0,219	-11,294	-983,154
610	0,209	-12,094	-930,283
615	0,199	-12,844	-860,898
620	0,188	-13,529	-773,690
625	0,176	-14,134	-667,904
630	0,164	-14,642	-543,450
635	0,152	-15,039	-400,968
640	0,139	-15,310	-241,848
645	0,126	-15,442	-68,198
650	0,113	-15,424	117,241
655	0,101	-15,247	311,223
660	0,088	-14,905	510,137
665	0,076	-14,397	710,172
670	0,064	-13,722	907,466
675	0,053	-12,884	1098,245
680	0,043	-11,891	1278,931
685	0,033	-10,753	1446,231
690	0,025	-9,481	1597,193
695	0,017	-8,091	1729,248
700	0,011	-6,599	1840,222
705	0,006	-5,024	1928,349
710	0,003	-3,385	1992,263
715	0,001	-1,703	2030,997
720	0,000	0,000	2043,972

					КРБ.142.4227см.25.05.02.ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Для зручності виконання динамічного аналізу дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) утворені у двигуні сили P_z та P_j (так, як вони фактично мають загальну для обох точку прикладання й також діють по єдиній лінії), замінюють алгебраїчною їх сумою (її ще прийнято називати сумарною силою P_Σ):

$$P_\Sigma = P_z + P_j.$$

Силу інерції P_j , яка виникає від поступально-рухомих мас КШМ, визначають як суму гармонійних функцій, а саме першого порядку P_{jI} та другого порядку P_{jII} . Ці гармонічні функції відрізняються швидкістю свого змінення та амплітудою. Таким чином значення сили інерції визначається як:

$$P_j = -m_j \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (\cos \varphi + \lambda \cdot \cos 2\varphi) = C \cdot \cos \varphi + \lambda \cdot C \cdot \cos 2\varphi = P_{jI} + P_{jII}, \text{ Н};$$

де $C = -m_j \cdot r \cdot \omega^2$.

Відповідно зазначена сумарна сила розкладається за схемою наведеною на рис. 2.5, а розкладені складові визначаються як:

$$N = P_\Sigma \cdot \operatorname{tg} \beta, \text{ Н}; \quad Q = P_\Sigma \cdot \frac{1}{\cos \beta}, \text{ Н}; \quad Z = P_\Sigma \cdot \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta}, \text{ Н}; \quad T = P_\Sigma \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\sin \beta}, \text{ Н}.$$

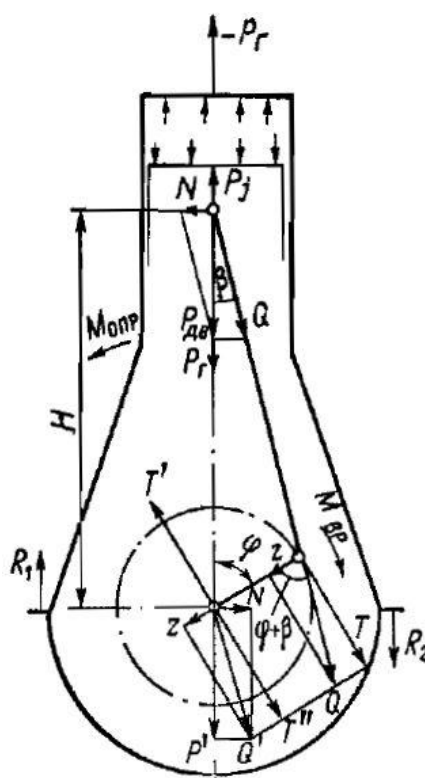


Рисунок 2.5 – Схема розкладання сумарної сили на складові на прикладі рядного тронкового двигуна

Результати виконаних у роботі динамічних розрахунків дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) представлено у табличній (табл. 2.8) та графічній (рис. 2.6 та 2.7) формі.

Таблиця 2.8 – Результати динамічного розрахунку дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

φ°	p_r , МПа	P_r , Н	P_p , Н	P_{dv} , Н	N , Н	Z , Н	T , Н
0	0,396	12440,3	-106286,5	-96987,7	0,0	-96987,7	0,0
5	0,396	12440,3	-105611,8	-96313,0	-2830,1	-95699,8	-11213,5
10	0,396	12440,3	-103597,7	-94298,9	-5527,8	-91906,4	-21818,6
15	0,396	12440,3	-100274,2	-90975,3	-7965,4	-85813,8	-31240,1
20	0,396	12440,3	-95691,6	-86392,7	-10024,5	-77754,0	-38968,0
25	0,396	12440,3	-89920,9	-80622,1	-11600,6	-68165,8	-44586,1
30	0,396	12440,3	-83054,1	-73755,2	-12608,0	-57569,9	-47796,5
35	0,396	12440,3	-75204,0	-65905,2	-12984,0	-46539,0	-48437,5
40	0,396	12440,3	-66504,4	-57205,6	-12693,2	-35663,0	-46494,6
45	0,396	12440,3	-57108,8	-47809,9	-11730,8	-25511,8	-42101,6
50	0,396	12440,3	-47188,3	-37889,4	-10124,6	-16598,9	-35533,0
55	0,396	12440,3	-36928,9	-27630,1	-7935,8	-9347,4	-27185,0
60	0,396	12440,3	-26527,1	-17228,3	-5256,9	-4061,5	-17548,6
65	0,396	12440,3	-16183,6	-6884,7	-2208,3	-908,2	-7173,0
70	0,396	12440,3	-6096,5	3202,3	1069,1	90,6	3374,8
75	0,396	12440,3	3546,3	12845,2	4422,2	-946,9	13552,0
80	0,396	12440,3	12576,1	21874,9	7696,1	-3780,6	22879,0
85	0,396	12440,3	20850,3	30149,2	10745,2	-8076,7	30970,9
90	0,396	12440,3	28259,4	37558,2	13443,5	-13443,5	37558,2
95	0,396	12440,3	34731,0	44029,9	15692,3	-19470,1	42494,6
100	0,396	12440,3	40231,9	49530,7	17425,9	-25762,1	45752,3
105	0,396	12440,3	44766,7	54065,6	18613,0	-31972,0	47405,9
110	0,396	12440,3	48374,7	57673,6	19254,8	-37819,2	47609,9
115	0,396	12440,3	51124,0	60422,9	19380,8	-43100,8	46571,0
120	0,396	12440,3	53104,6	62403,4	19041,5	-47692,1	44522,2
125	0,396	12440,3	54420,8	63719,6	18301,2	-51539,6	41698,9
130	0,396	12440,3	55184,3	64483,1	17230,8	-54648,5	38321,2
135	0,396	12440,3	55507,4	64806,3	15901,1	-57068,7	34581,2
140	0,396	12440,3	55498,4	64797,2	14377,7	-58879,4	30636,9
145	0,396	12440,3	55256,9	64555,7	12718,2	-60175,8	26609,5
150	0,396	12440,3	54872,1	64170,9	10969,6	-61058,5	22585,5
155	0,396	12440,3	54420,7	63719,6	9168,6	-61624,3	18619,5
160	0,396	12440,3	53967,0	63265,9	7341,0	-61961,3	14739,9
165	0,396	12440,3	53562,4	62861,3	5503,9	-62143,8	10953,4
170	0,396	12440,3	53246,1	62544,9	3666,4	-62231,4	7250,1
175	0,396	12440,3	53045,5	62344,3	1831,9	-62266,7	3608,7
180	0,396	12440,3	52976,8	62275,7	0,0	-62275,7	0,0
185	0,389	12208,6	53045,5	62112,6	-1825,1	-62035,3	-3595,3
190	0,391	12267,7	53246,1	62372,3	-3656,3	-62059,6	-7230,1
195	0,394	12367,5	53562,4	62788,4	-5497,5	-62071,8	-10940,7
200	0,398	12510,0	53967,0	63335,5	-7349,1	-62029,4	-14756,1
205	0,404	12697,9	54420,7	63977,2	-9205,6	-61873,5	-18694,8

210	0,412	12935,3	54872,1	64665,8	-11054,3	-61529,4	-22759,7
215	0,421	13227,0	55256,9	65342,4	-12873,2	-60909,1	-26933,8
220	0,432	13579,4	55498,4	65936,3	-14630,5	-59914,4	-31175,4
225	0,446	14000,4	55507,4	66366,4	-16283,9	-58442,6	-35413,7
230	0,462	14499,9	55184,3	66542,7	-17781,2	-56394,0	-39545,1
235	0,480	15090,1	54420,8	66369,4	-19062,3	-53682,8	-43433,0
240	0,503	15786,2	53104,6	65749,2	-20062,4	-50249,2	-46909,3
245	0,529	16606,9	51124,0	64589,4	-20717,2	-46072,8	-49782,4
250	0,559	17575,8	48374,7	62809,0	-20969,4	-41186,7	-51849,2
255	0,596	18722,5	44766,7	60347,7	-20775,7	-35686,9	-52914,2
260	0,639	20084,2	40231,9	57174,6	-20115,2	-29737,9	-52813,0
265	0,691	21708,5	34731,0	53298,0	-18995,5	-23568,5	-51439,6
270	0,753	23656,4	28259,4	48774,3	-17458,2	-17458,2	-48774,3
275	0,828	26007,0	20850,3	43715,8	-15580,4	-11711,0	-44907,4
280	0,919	28863,9	12576,1	38298,5	-13474,2	-6619,0	-40056,5
285	1,030	32364,2	3546,3	32769,0	-11281,3	-2415,6	-34572,2
290	1,168	36691,1	-6096,5	27453,0	-9165,4	776,8	-28932,2
295	1,340	42092,4	-16183,6	22767,3	-7302,7	3003,4	-23720,4
300	1,557	48906,8	-26527,1	19238,2	-5870,3	4535,3	-19595,9
305	1,834	57601,4	-36928,9	17530,9	-5035,1	5930,8	-17248,6
310	2,191	68824,4	-47188,3	18494,7	-4942,1	8102,3	-17344,4
315	2,657	83477,9	-57108,8	23227,7	-5699,2	12394,5	-20454,4
320	3,273	102807,8	-66504,4	33161,9	-7358,2	20673,7	-26952,8
325	4,090	128493,8	-75204,0	50148,3	-9879,8	35412,3	-36856,9
330	5,178	162670,9	-83054,1	76475,3	-13073,0	59693,1	-49559,2
335	6,611	207689,5	-89920,9	114627,1	-16493,6	96917,0	-63391,8
340	8,442	265193,9	-95691,6	166360,9	-19303,5	149725,9	-75038,2
345	10,627	333862,0	-100274,2	230446,3	-20176,9	217371,9	-79133,3
350	12,913	405672,1	-103597,7	298932,9	-17523,4	291348,6	-69166,4
355	14,751	463397,2	-105611,8	354643,8	-10420,9	352386,1	-41290,5
360	15,470	485991,9	-106286,5	376563,8	0,0	376563,8	0,0
365	18,587	583910,6	-105611,8	475157,3	13962,1	472132,3	55321,7
370	18,587	583910,6	-103597,7	477171,4	27971,7	465064,9	110406,7
375	18,587	583910,6	-100274,2	480494,9	42070,1	453233,9	164997,8
380	18,587	583910,6	-95691,6	485077,5	56285,5	436573,0	218797,4
385	16,725	525424,9	-89920,9	432362,5	62212,3	365561,5	239107,8
390	13,287	417411,8	-83054,1	331216,3	56619,5	258532,0	214642,1
395	10,640	334258,8	-75204,0	255913,2	50417,7	180713,5	188085,5
400	8,624	270924,7	-66504,4	201278,7	44661,3	125480,7	163592,0
405	7,088	222661,3	-57108,8	162411,0	39849,7	86664,0	143019,9
410	5,909	185644,3	-47188,3	135314,5	36158,0	59279,8	126898,9
415	4,997	156985,4	-36928,9	116915,0	33579,7	39552,8	115031,7
420	4,283	134561,5	-26527,1	104892,9	32006,5	24728,0	106843,2
425	3,719	116825,5	-16183,6	97500,4	31273,5	12862,0	101582,1
430	3,268	102649,3	-6096,5	93411,3	31186,2	2643,1	98444,2
435	2,903	91206,1	3546,3	91610,9	31538,6	-6753,3	96652,2
440	2,607	81884,2	12576,1	91318,8	32127,9	-15782,4	95510,4
445	2,363	74227,1	20850,3	91935,9	32766,2	-24628,7	94441,8
450	2,161	67890,4	28259,4	93008,3	33291,2	-33291,2	93008,3
455	1,993	62611,7	34731,0	94201,3	33573,5	-41656,0	90916,7
460	1,852	58189,0	40231,9	95279,4	33521,3	-49557,1	88011,0
465	1,734	54465,2	44766,7	96090,5	33080,8	-56823,6	84254,3
470	1,634	51317,4	48374,7	96550,7	32234,3	-63312,6	79703,2

475	1,549	48648,3	51124,0	96630,8	30994,6	-68928,6	74478,4
480	1,476	46380,3	53104,6	96343,4	29397,7	-73630,9	68737,0
485	1,415	44451,6	54420,8	95730,8	27495,3	-77431,8	62647,4
490	1,363	42812,0	55184,3	94854,8	25346,6	-80388,1	56370,5
495	1,319	41421,4	55507,4	93787,4	23012,0	-82589,6	50045,8
500	1,281	40247,0	55498,4	92603,9	20547,7	-84146,5	43784,2
505	1,250	39262,4	55256,9	91377,8	18002,4	-85178,1	37665,4
510	1,224	38446,2	54872,1	90176,8	15415,2	-85803,0	31738,4
515	1,203	37781,4	54420,7	89060,6	12814,9	-86132,1	26024,4
520	1,186	37254,3	53967,0	88079,9	10220,3	-86263,5	20521,2
525	1,173	36854,6	53562,4	87275,5	7641,5	-86279,4	15207,5
530	1,164	36574,4	53246,1	86679,0	5081,1	-86244,5	10047,7
535	1,159	36408,4	53045,5	86312,4	2536,2	-86205,0	4996,1
540	1,157	36353,4	52976,8	86188,7	0,0	-86188,7	0,0
545	0,200	6283,0	53045,5	56187,0	-1651,0	-56117,1	-3252,3
550	0,200	6283,0	53246,1	56387,6	-3305,4	-56104,9	-6536,4
555	0,200	6283,0	53562,4	56703,9	-4964,8	-56056,8	-9880,5
560	0,200	6283,0	53967,0	57108,5	-6626,5	-55930,9	-13305,4
565	0,200	6283,0	54420,7	57562,2	-8282,6	-55669,5	-16820,3
570	0,200	6283,0	54872,1	58013,6	-9917,1	-55199,8	-20418,3
575	0,200	6283,0	55256,9	58398,4	-11505,1	-54436,2	-24071,5
580	0,200	6283,0	55498,4	58639,9	-13011,5	-53284,4	-27725,6
585	0,200	6283,0	55507,4	58648,9	-14390,3	-51646,5	-31295,6
590	0,200	6283,0	55184,3	58325,8	-15585,5	-49430,3	-34662,0
595	0,200	6283,0	54420,8	57562,3	-16532,7	-46559,2	-37669,5
600	0,200	6283,0	53104,6	56246,1	-17162,6	-42986,3	-40129,2
605	0,200	6283,0	51124,0	54265,5	-17405,8	-38708,6	-41825,3
610	0,200	6283,0	48374,7	51516,2	-17199,2	-33781,5	-42527,0
615	0,200	6283,0	44766,7	47908,2	-16493,2	-28330,8	-42007,0
620	0,200	6283,0	40231,9	43373,4	-15259,7	-22559,5	-40064,6
625	0,200	6283,0	34731,0	37872,5	-13497,9	-16747,3	-36552,0
630	0,200	6283,0	28259,4	31400,9	-11239,6	-11239,6	-31400,9
635	0,200	6283,0	20850,3	23991,8	-8550,7	-6427,2	-24645,8
640	0,200	6283,0	12576,1	15717,6	-5529,8	-2716,4	-16439,0
645	0,200	6283,0	3546,3	6687,8	-2302,4	-493,0	-7055,8
650	0,200	6283,0	-6096,5	-2955,0	986,6	-83,6	3114,3
655	0,200	6283,0	-16183,6	-13042,1	4183,3	-1720,5	13588,1
660	0,200	6283,0	-26527,1	-23385,6	7135,8	-5513,0	23820,4
665	0,200	6283,0	-36928,9	-33787,4	9704,3	-11430,4	33243,2
670	0,200	6283,0	-47188,3	-44046,8	11769,9	-19296,4	41307,3
675	0,200	6283,0	-57108,8	-53967,3	13241,6	-28797,4	47523,8
680	0,200	6283,0	-66504,4	-63362,9	14059,5	-39501,6	51499,1
685	0,200	6283,0	-75204,0	-72062,5	14197,1	-50887,0	52962,9
690	0,200	6283,0	-83054,1	-79912,6	13660,6	-62376,0	51786,7
695	0,200	6283,0	-89920,9	-86779,4	12486,6	-73371,8	47991,3
700	0,200	6283,0	-95691,6	-92550,1	10739,0	-83295,7	41745,3
705	0,200	6283,0	-100274,2	-97132,7	8504,5	-91621,8	33354,5
710	0,200	6283,0	-103597,7	-100456,2	5888,7	-97907,5	23243,3
715	0,200	6283,0	-105611,8	-102470,3	3011,0	-101818,0	11930,4
720	0,396	12440,3	-106286,5	-96987,7	0,0	-96987,7	0,0

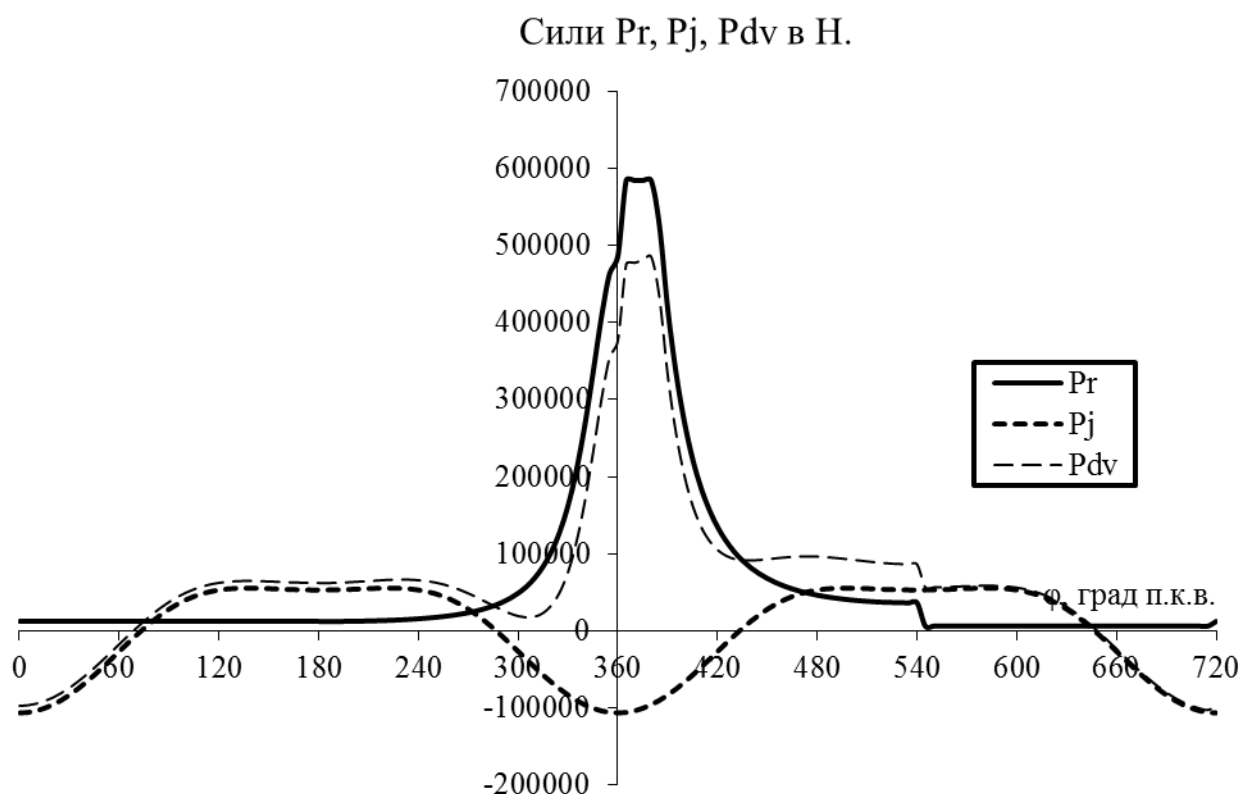


Рисунок 2.6 – Сила від тиску газів P_r , інерції P_j та їх сумарне значення – рушійна сила P_{dv} дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

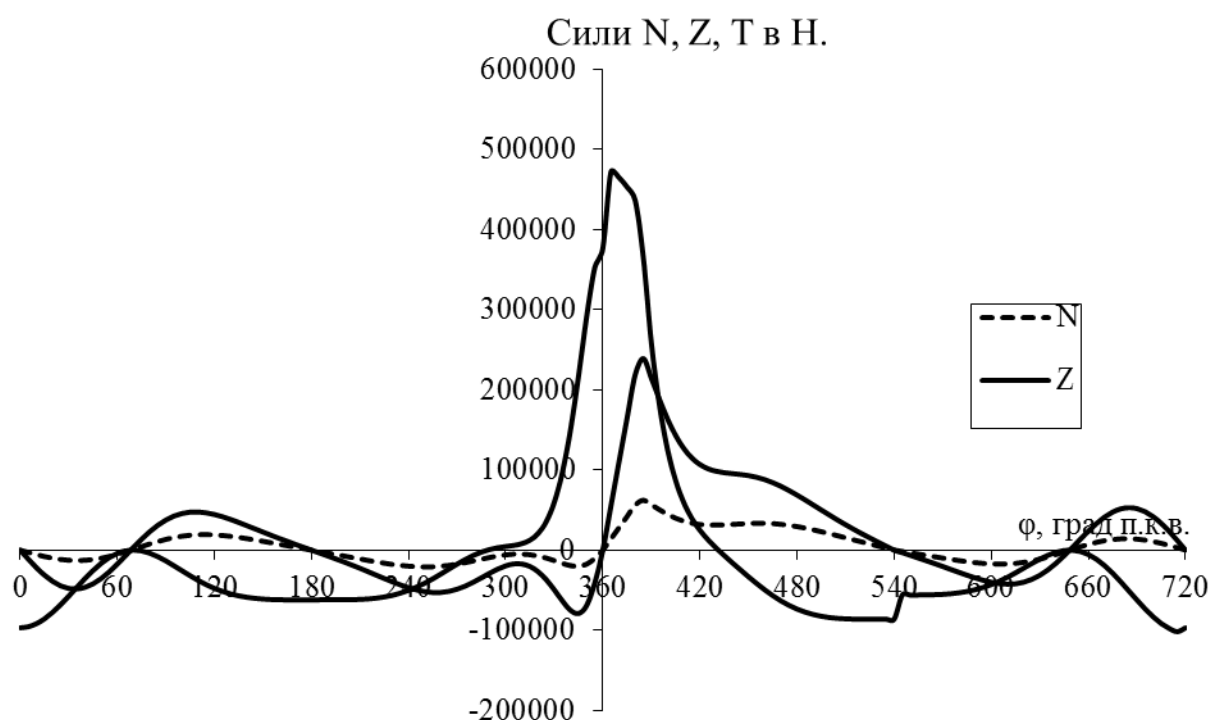


Рисунок 2.7 – Бічна N , радіальна Z й тангенціальна сила T від кута φ дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.02.ПЗ

Аркуш

37

Пара сили, що виникає при розкладанні рушійної сили, T та T' на плечі r кривошипу (рис. 2.5) створюють крутний момент дизеля $M_{кр}$, що далі передається споживачеві енергії (механічна робота двигуна):

$$M_{кр} = P_{дв} \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (l_{ш} \cdot \cos \beta + r \cdot \cos \varphi) = P_{дв} \cdot r \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} = M_{опр}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Середні значення $T_{\text{сум}}$ (або T_{Σ}) й $M_{кр}$ визначаються за виразами нижче:

$$T_{\text{сум.сер}} = \sum_{\varphi=0}^{\varphi_3-\Delta\varphi} \frac{T_{\text{сум.}\varphi} \cdot \Delta\varphi}{\varphi_3}, \text{ Н}; \quad M_{кр.сер} = T_{\text{сум.сер}} \cdot r, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

де $\varphi_3 = 180^\circ$ кут заклинювання кривошипів дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20).

Результати виконаних розрахунків сумарної дотичної сили суднового дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20) подано у вигляді залежності – рис. 2.8.

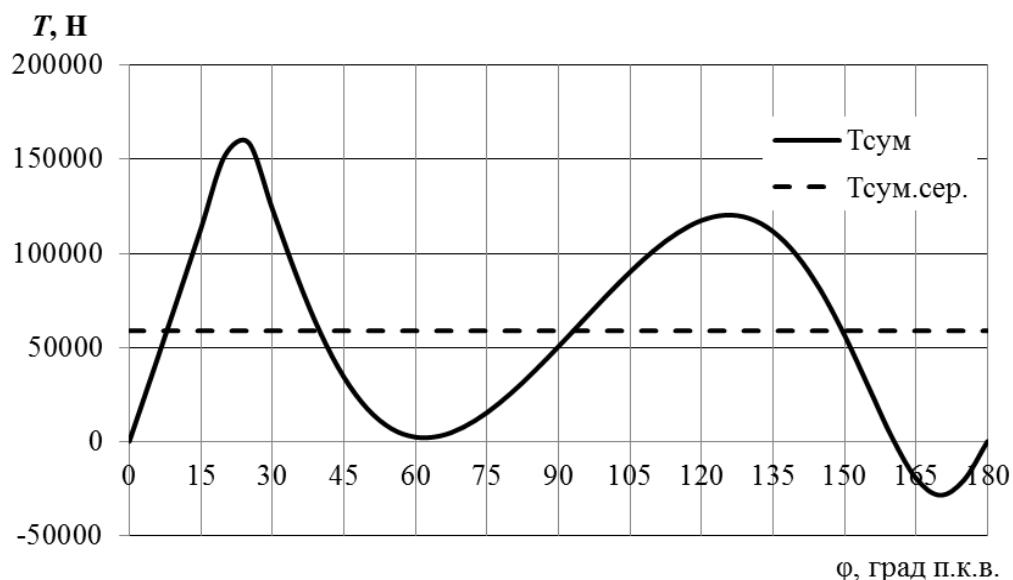


Рисунок 2.8 – Сумарна та середня дотичні сили дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

2.3. Висновки до розділу

У розділі кваліфікаційної роботи проведено розрахунок робочого циклу та ефективних показників суднового дизеля 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20), побудовано відповідні його теоретичні індикаторні діаграми у $p - V/V_c$, $T - V/V_c$ та $T - S$ координатах. Також, виконано розрахунок кінематики і динаміки за результатами чого було побудовано відповідні графіки зміни сил, діючих на елементи КШМ.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПОРШНЯ СУДНОВОГО ДВИГУНА 4ЧН 20/28 (WARTSILA 4L20)

3.1. Аналіз умов роботи поршня та матеріалів, що застосовують для їх виробництва

В комплект деталей поршневої групи у тронкових двигунів внутрішнього згоряння входять: поршень; палець поршневий; елементами кріплення пальця (стопорні кільця чи грибоподібні заглушки); маслоснімні кільця; ущільнюючі кільця.

В комплект деталей крейцкопф них двигунів внутрішнього згоряння замість пальця та елементів його фіксації входить поршневий шток, слугує для з'єднання поршня дизеля з поперечиною крейцкопфного механізму.

Поршень двигуна внутрішнього згоряння отримує силу від тиску газів, що виникає внаслідок згоряння циклової дози пального, і передає цю силу через шатуни на колінчастий вал двигуна. У тронкових двигунах внутрішнього згоряння поршень виконує роль повзуна. Він передає нормальну силу на поверхню втулки робосого циліндра, а в двотактних ДВЗ також відповідає за процеси газообміну (впуску та випуску). Механічні навантаження на поршень двигуна внутрішнього згоряння, які виникають через тиск газів у робочому циліндрі та утворені рухомими масами інерційні сили, призводять до виникнення напружень у матеріалі поршня та деформації його самого. Високі питомі тиски на поверхнях деталей, що контактують з поршнем двигуна внутрішнього згоряння, можуть спотворювати його геометрію, що, в свою чергу, викликає інтенсивне збільшення тертя та зношування під час експлуатації двигуна. Теплове навантаження, яке впливає на поршень двигуна внутрішнього згоряння через гарячі гази та тертя, призводить до його нагріву і відповідно до розширення, а перепади температур у тілі поршня викликають термічні напруги.

В залежності від типу двигуна внутрішнього згоряння, конструкції його кривошипно-шатунного механізму, а також кількості тактів дизеля і ступеня його форсування за наддувом, поршні двигуна можуть бути як цільними, так і складовими, а також охолоджуваними (за рахунок примусового подавання масла на нагріті повер-

					КРБ.142.4227см.25.05.03.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		39

хні денця) або неохолоджуваними. Матеріали, що використовуються при виготовленні поршнів двигунів внутрішнього згоряння, повинні мати досить високі свої механічні характеристики, зберігати їх навіть при підвищених температурах, а також мати добрі антифрикційні властивості і, що особливо важливо при виробництві, здатність якісно заповнювати відповідну свою ливарну форму.

При конструюванні та проектуванні швидкохідних двигунів внутрішнього згоряння утворюються додаткові вимоги, які пов'язані, перш за все, зі зменшенням маси самого поршня, досить високою теплопровідністю матеріалу та малим лінійним коефіцієнтом розширення матеріалу. Такий досить широкий спектр вимог до матеріалу поршня призводить до необхідності обрання матеріалу з різними фізико-механічними властивостями. Однак, необхідно сказати, що жоден з існуючих матеріалів не відповідає таким вимогам у повній мірі (рішенням у такому випадку є проектування складених поршнів).

Форма заготовки поршня двигуна внутрішнього згоряння формується на виробництві шляхом кування, лиття або штампування. Незалежно від обраного технологічного методу виготовлення заготовки та прийнятого матеріалу, процес старіння поршня двигуна внутрішнього згоряння є обов'язковим. Так, з багатьох існуючих матеріалів, саме чавун найбільш відповідає більшості з наведених вище вимог.

Відмінною особливістю хімічного складу марок чавунів, що використовують у світовому двигунобудуванні, є сумарний вміст вуглецю та кремнію (C+Si), який перевищує вміст у 45,5%. Вміст сірки (S) в таких чавунах намагаються максимально звести до мінімуму (не має бути більшим ніж 0,12%). У певних марках чавунів, які призначені здебільшого для тонкостінного лиття максимально складної форми деталі вміст фосфору (P) підвищують аж до рівня 0,70%. Однак варто відзначити, що значна кількість фосфідної евтектики при наявності високої концентрації у чавуні фосфору навряд чи є необхідним з точки зору забезпечення підвищення стійкості чавуну. Проте для здійснення процесу відливання тонкостінних поршнів ДВЗ потрібна саме рідинна текучість матеріалу, яку й забезпечує додавання такого елемента, як фосфор. Крім того, додавання до чавуну фосфору позитивно сприяє підвищенню зносостійкості тертьових поверхонь вже самого поршня. Таким чином, розумне та

					КРБ.142.4227ст.25.05.03.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		40

незначне збільшення вмісту у чавуні фосфору в поршневих чавунах є абсолютно виправданим. У табл. 3.1 подається хімічний склад поршневих чавунів.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад поршневих чавунів

Поршневий чавун	Вміст С, %		Mn, %	P, %	Ni, %	Si, %	S, %	V, %	Cr, %
	загальний								
Нелегований	3,1...3,3	0,8...1,0	0,3...0,7	–	0,3...0,7	0,8...1,0	–	–	–
Легований	3,1...3,3	0,7...1,0	0,3...0,7	0,7...1,2	0,3...0,7	0,7...1,0	0,1...0,2	0,25...0,5	0,1...0,2

Забезпечення підвищення твердості й зносостійкості поршнів двигунів внутрішнього згоряння, виготовлених з чавунна можна досягти за рахунок процесу легування чавуну хромом. При цьому під час процесу легування потрібно додати нікель, який у чавуні допомагає значно подрібнити структуру такого сплаву. Твердість у одиницях Брінелля H_B для чавунних поршнів двигунів внутрішнього згоряння повинна бути трохи нижчою за твердість втулок робочого циліндра дизеля десь на рівні 20...30 одиниць. При значному підвищеній твердості втулки робочого циліндра двигуна внутрішнього згоряння (більше ніж $H_B > 350$) поршні з чавуну проходять обов'язкову додаткову термічну обробку. Ця обробка включає нагрів до температур 820...860 °С, загартування (в масло) з обов'язковим подальшим відпуском за температурного рівня 350...400 °С та витримкою при цій температурі протягом двох годин. Після такої процедури відбувається охолодження поршня на відкритому повітрі. Цей технологічний процес термічної обробки забезпечує таким поршням твердість в межах 320 ... 400 одиниць за Брінелем. У табл. 3.2 наведено фізико-механічні властивості різних найбільш розповсюджених марок чавунів для ДВЗ.

Таблиця 3.2 – Фізико-механічні властивості різних найбільш розповсюджених марок чавунів для ДВЗ

Марка чавуну	Межа міцності при вигині, кг/мм ²	Межа міцності при розтягуванні, кг/мм ²	Стріла прогину у мм при відстані L між опорами		Межа міцності при стискуванні, кг/мм ²	Твердість за Брінелем
			600 мм	300 мм		
СЧ35-56	56	35	9	3	120	197...248
СЧ28-48	48	28	9	3	100	170...241
СЧ24-44	44	24	9	3	85	170...241

Поршні двигуна внутрішнього згоряння роблять з чавунів таких марок, як СЧ 24–44 та СЧ 28–48. За умов підвищення міцності поршневого чавуну важливим є модифікація яка має марку СЧ 35–56. У табл. 3.2 представлені її характеристики за нормальних температур. Однак зазначимо, що у реальному двигуні внутрішнього згоряння умови роботи їх поршнів характеризуються значно вищими значеннями температури деталей. Так, температура днища чавунного неохолоджуваного поршня двигуна внутрішнього згоряння може досягати аж – 400 ...430 °С. Тому при конструюванні та проектуванні поршнів двигунів внутрішнього згоряння потрібно обов'язково враховувати наявні зміни фізико-механічних властивостей матеріалу від температури самої деталі.

Зі зростанням значень температури твердість поршневого чавуну змінюється подібно до його міцнісних властивостей. Так, при незначних температурах, які складають десь 100...200 °С спостерігається мінімальне зниження твердості, потім зі зростанням до рівня 300...400 °С твердість матеріалу зростає до свого початкового рівня, а потім при піднятті температури до меж 400...450 °С відбувається досить стрімке падіння (дивися рис. 3.1). Для марок поршневого чавуну, близьких до складу СЧ 24–44 й СЧ28–48, межа їх задекларованої міцності майже не змінюється до значень температури нагріву у 400 °С, а потім зі зростанням температури також стрімко знижується (дивися рис. 3.2).

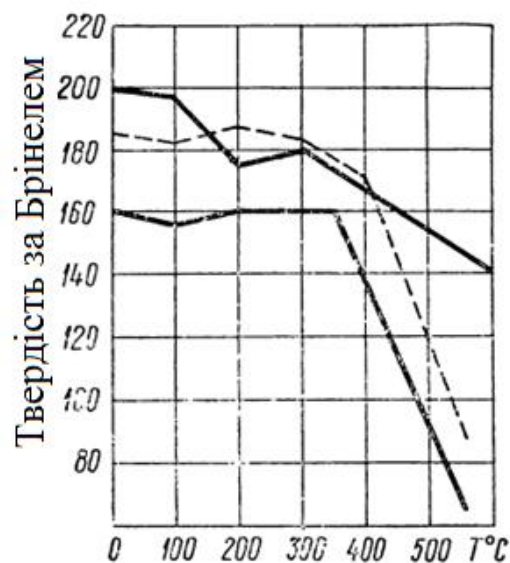


Рисунок 3.1 – Залежності впливу температури на значення твердості чавуну

Багато проведених досліджень механічних властивостей поршневого чавуну при різних значеннях температури зразків показали, що в діапазоні значень від нормальної температури матеріалу до 150 ...200 °С спостерігається певне зниження міцнісних характеристик чавуну десь на 10...15%.

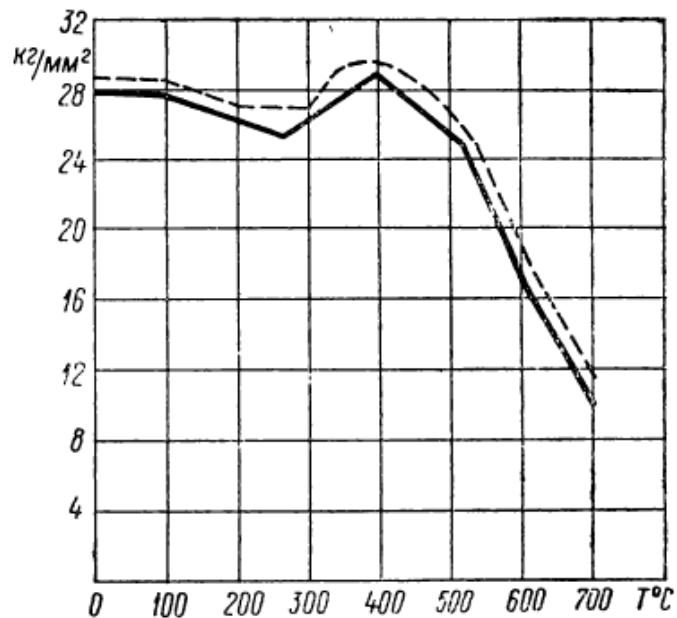


Рисунок 3.2 – Залежності впливу температури на значення межі міцності чавунів

Після цього при подальшому збільшенні температури і досягненні її рівня 300 °С міцнісні властивості поршневого чавуну досягають такого рівня, що відповідає властивостям при нормальній температурі. При подальшому зростанні температури механічні характеристики поршневого чавуну залишаються сталими, аж до досягнення температури значень у 400...430 °С. Після цього відбувається їх різке зниження. При температурах матеріалу, наближених до значення у 500 °С, вже наявні ознаки процесу криппа (повзучості).

У дизелях для виготовлення поршнів також прийнято застосовувати легкі сплави на основі алюмінію. Алюмінієві сплави з вмістом магнію, незважаючи на їх досить невелику питому вагу, практикою проектування та виготовлення поршнів не рекомендується їх застосовувати. Це пов'язано з схильністю таких сплавів до оплавлення країв деталі, а також з низькою межею пропорційності –1,5 ...2,0 кг/мм². Різноманітні алюмінієві сплави надають змогу виробляти поршні двигунів внутрішньо-

го згоряння з достатньо невеликою вагою. Крім того, варто відмітити, що завдяки низькому коефіцієнту теплопередачі від робочого тіла до поршня двигуна внутрішнього згоряння та дуже високій теплопровідності сплаву на базі алюмінію, температура таких поршнів дизелів з легких видів сплавів значно нижча, ніж у разі використання чавуну (дивися рис. 3.3).

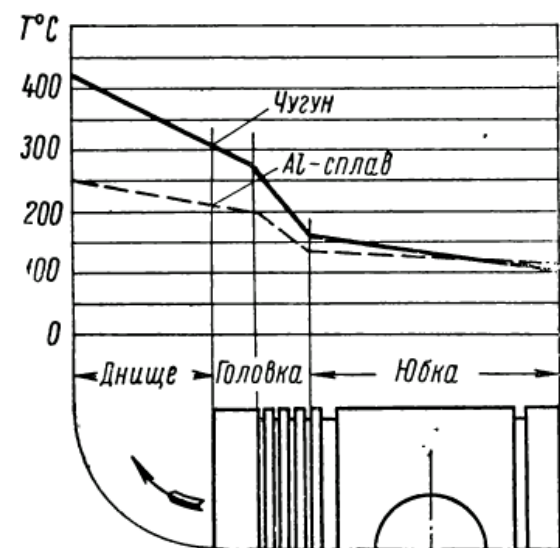


Рисунок 3.3 – Вигляд температурного поля поршнів зроблених з алюмінієвого сплаву й чавуну

Литі поршні сучасних двигунів внутрішнього згоряння робляться зі сплавів типу: «У», АЛ1 (табл. 3.3). Після виконання технологічного процесу загартування межа міцності легких сплавів цього класу зазвичай знаходиться у межах 26 ...32 кг/мм². Так верхнє значення межі відноситься до кокільного лиття сплаву.

Таблиця 3.3 – Властивості легких алюмінієвих сплавів

Марка алюмінієвого сплаву	Хімічний склад сплаву у % (Al – решта у цьому сплаві)					Фізико-механічні властивості алюмінієвого сплаву		
	Cu	Ni	Mg	Fe	Si	Межа міцності, кг/мм ²	Подовження δ_5 , %	Твердість за Брінелем
АЛ1	3,75...4,5	1,8...2,3	1,25...1,75	< 0,8	< 0,7	> 21	> 1,5	> 90
У	4	2	1,5	–	< 0,7	22...25	0,5...1,5	90...95

Температура нагріву для забезпечення технологічного процесу загартування алюмінієвого сплаву становить 500...550 °С. Охолодження матеріалу здійснюється у

воду, а необхідний при цьому відпуск відбувається при температурі 100...200 °С з подальшим охолодженням на свіжому повітрі.

Питома вага найбільш розповсюджених у двигунобудуванні сплавів алюмінію приблизно складає 2,8 кг/дм³. Значення теплопровідності для них коливається в межах 162,7 ...168,5 Вт/(м·К), а межа втоми матеріалу – 8,5...10 кг/мм². При цьому лінійний коефіцієнт розширення досягає значень у (20 ...25)·10⁻⁶. Також останнім часом у двигунобудуванні почали застосовувати такий сплав, як «Алюсіл» (дивися табл. 3.4) зі зниженим коефіцієнтом лінійного розширення.

Таблиця 3.4 – Властивості сплаву «Алюсіл»

Хімічний склад сплаву в % (Al – інше у сплаві)						Фізико-механічні властивості сплаву «Алюсіл»					
Cu	Si	Fe	Ni	Mn	Mg	Подовження δ ₅ , %	Межа міцності, кг/мм ²	Твердість за шкалою Брінеля	Питома вага, кг/дм ³	Коефіцієнт лінійного розширення	Теплопровідність λ, Вт/м·К
4,5	12	–	1,5	1,2	0,7	0,5...1,0	15...20	110...130	2,8	20·10 ⁻⁶	120...130
0,8	14	1	2,5	–	1	0,4...1,0	18...22	130	2,8	19·10 ⁻⁶	120...130

При підвищенні обертів двигуна внутрішнього згорання підвищуються усі вимоги до якості виготовлення та міцності поршнів. Ці вимоги є досяжними за рахунок застосування легких сплавів (дивися табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Основні алюмінієві поршневі сплави, які куються та штамнуються

Марка сплаву алюмінія	Хімічний склад сплаву в % (Al – інше у сплаві)							Фізико-механічні властивості сплавів алюмінію		
	Mg	Mn	Cu	Si	Ti	Ni	Fe	Межа міцності, кг/мм ²	Подовження δ ₅ , %	Твердість за Брінелем
Дюралюміній	0,5...0,8	0,5...0,8	4,5	≤ 0,7	–	следи	≤ 0,7	> 38	≥ 9	120... 130
АК2	0,4...0,8	≤ 0,2	3,5... 4,5	≤ 0,7	–	1,8...2,3	0,5...1,0	34... 36	3...5	90... 100
АК4	1,4...1,8	≤ 0,2	9... 2,5	0,5...1,2	0,5...0,12	1... 1,5	1,1...1,6	34... 38	2,5...4	90... 100

Поршні виготовлені зі сталі шляхом лиття здебільшого застосовуються у досить потужних двигунах внутрішнього згорання. На сьогодні широко застосовуються сталеві ковані голівки поршнів та спідницею виготовленою з алюмінієвого сплаву або чавуну.

При роботі двигуна внутрішнього згоряння поверхня його алюмінієвого поршня піддається процесу окиснення. При цьому кристали окису мають дуже високу твердість та виступають, як абразив для підвищення зношення самого поршня та відповідно і втулки робочого циліндру. Для нивілювання цього явища після механічної обробки поршні піддаються хромуванню. Міцна і досить гладка плівка, що утворюється після цього захищає поверхні від задирів та зменшує знос поверхні втулки циліндра. Також прийнято покривати поверхню чавунних та алюмінієвих поршнів двигунів внутрішнього згоряння шаром олова. Таке покриття сприяє кращому прироблянню поверхонь. Технологічно таке покриття виконується гальванічним способом, а шару олова становить при цьому приблизно 0,020 мм.

3.2. Аналіз умов роботи поршневого пальця та матеріалів, що застосовують для його виробництва

Поршневий палець трункового двигуна внутрішнього згоряння забезпечує шарнірне з'єднання шатуна з поршнем. На поршневий палець трункового двигуна внутрішнього згоряння діють високі механічні навантаження, а також теплові у наслідок віддачі тепла від самого поршня. Ці навантаження виникають від тиску газів та сили інерції рухомих части КШМ.

Поршневий палець має досить спрощену конструкцію яка по суті представляє з себе циліндричний порожнистий стрижень. Однак в залежності від умов його кріплення в бобиках наявності подачі масла для охолодження головки поршня та змащення бобишок його конструкція може трохи ускладнюватися наявністю відповідних свердлень (радіальних або навіть комбінація радіальних і поздовжніх свердлень для подачі змащувального масла)

Поверхня поршневого пальця трункового двигуна внутрішнього згоряння ретельно оброблюється шліфуванням, що позитивно сприяє підвищенню втомної міцності та зменшенню тертя сполучних поверхонь. У разі плаваючого пальця та наявності отворів у тілі пальця внутрішня порожнина герметизується за допомогою спеціальних трубок чи заглушок.

У всіх сучасних суднових двигуна внутрішнього згорання застосовують саме плаваючі поршневі пальці. Такі пальці під час роботи можуть вільно обертатися, як в бобишках так і у верхній головці шатуна. Таке кріплення пальця зменшує знос поверхонь, а також сприяє його рівномірності. Ще однією перевагою плаваючого пальця є його менша схильність до заїдання. Осьовий зсув у такому випадку фіксації пальця унеможлиблюється за рахунок встановлення стопорних кілець або грибоподібних заглушок.

Поршневий палець трункового двигуна внутрішнього згорання працює в складних умовах ударних навантажень. Відповідно до цього матеріал, з якого він виробляється, повинен володіти дуже високою в'язкістю, а також безперечно міцністю.

Робоча поверхня пальця трункового двигуна внутрішнього згорання піддається досить значним питомим навантаженням, які ще ускладнюються несприятливими чинниками його експлуатації. Так, при роботі пальця значний вплив на його працездатність мають: кут нахилу шатуна (який є досить незначним), ускладнене подавання змащувального масла, температурні умови (внаслідок теплопередачі від поршня).

Виходячи з таких важких та несприятливих умов роботи, матеріал пальця трункового двигуна внутрішнього згорання повинен забезпечувати високі механічні властивості, одночасно бути пружним та мати тверду поверхню.

Для малообертових тихохідних двигунів внутрішнього згорання зазвичай застосовують маловуглецеву сталь в якій вміст сірки та фосфору є досить низьким. Вміст вуглецю при цьому складає десь від 0,08 до 0,2 %.

Для високообертових швидкохідних двигунів внутрішнього згорання з питомими тисками на поверхню пальця понад 18,0 МПа та напруженнями близько 120,0 МПа (а у деяких випадках й багато вище) практикою проектування та експлуатації рекомендується використовувати леговану високоякісну сталь. Необхідна твердість поверхонь досягається шляхом технології цементації з подальшим загартуванням. Для пальців невеликих двигунів на практиці широко застосовують ціанування та азотування зовнішніх поверхонь.

Поршневі пальці трункових двигунів внутрішнього згорання виконують з вуглецевої сталі марки 15 або таких легованих сталей як, наприклад 12ХН3А та

					КРБ.142.4227ст.25.05.03.ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

15ХМА. На однаковому рівні з маркою сталі 12Х3А прийнято використовувати для виготовлення пальців й сталь марки Е-5, яка за своїм хімічним складом є дуже близькою (дивися табл. 3.6). При потребі отримати дуже високі значення поверхневої міцності та твердості застосовують сталь марки 38ХМЮА з азотуванням поверхонь.

Таблиця 3.6 – Властивості сталі 12Х3А

Марка сталі	Межа міцності, кг/мм ²	Межа текучості, кг/мм ²	Межа текучості, кг/мм ²	Межа міцності, кг/мм ²	Подовження δ_5 , %	Ударна в'язкість, кгм/см ²
12ХН3А	95	70	70	95	11	9

Після реалізації процесу цементації та загартування твердість поверхні пальця виготовленого зі сталі марки 38ХМЮА може скласти 58...62 одиниць за шкалою Роквелла R_c . Глибина цементованого шару залежить від діаметру пальця та може становити від 0,5 мм і аж до 2 мм.

3.3. Розрахунок поршня та пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20)

Розрахунок поршня та пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20) здійснено програмі створеній в середовищі програмування Math CAD. Результати розрахунків допоміжного двигуна Wartsila на міцність представлені в табл. 3.7, а також табл. 3.8. Розрахункова схема поршня суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20) та його пальця представлена на рис. 3.4 і 3.5 відповідно.

Таблиця 3.7 – Вихідні дані для розрахунку поршня і пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20)

№ з.п.	Параметр	Розмірність	Значення
1	Діаметр циліндра	D_c , м	0,200
2	Максимальний тиск згоряння	P_z , МПа	18,587
3	Частота обертання	n , хв ⁻¹	1000
4	Середній індикаторний тиск	P_i , МПа	2,7280
5	Максимальна величина нормальної сили	N_{max} , МПа	1,98033

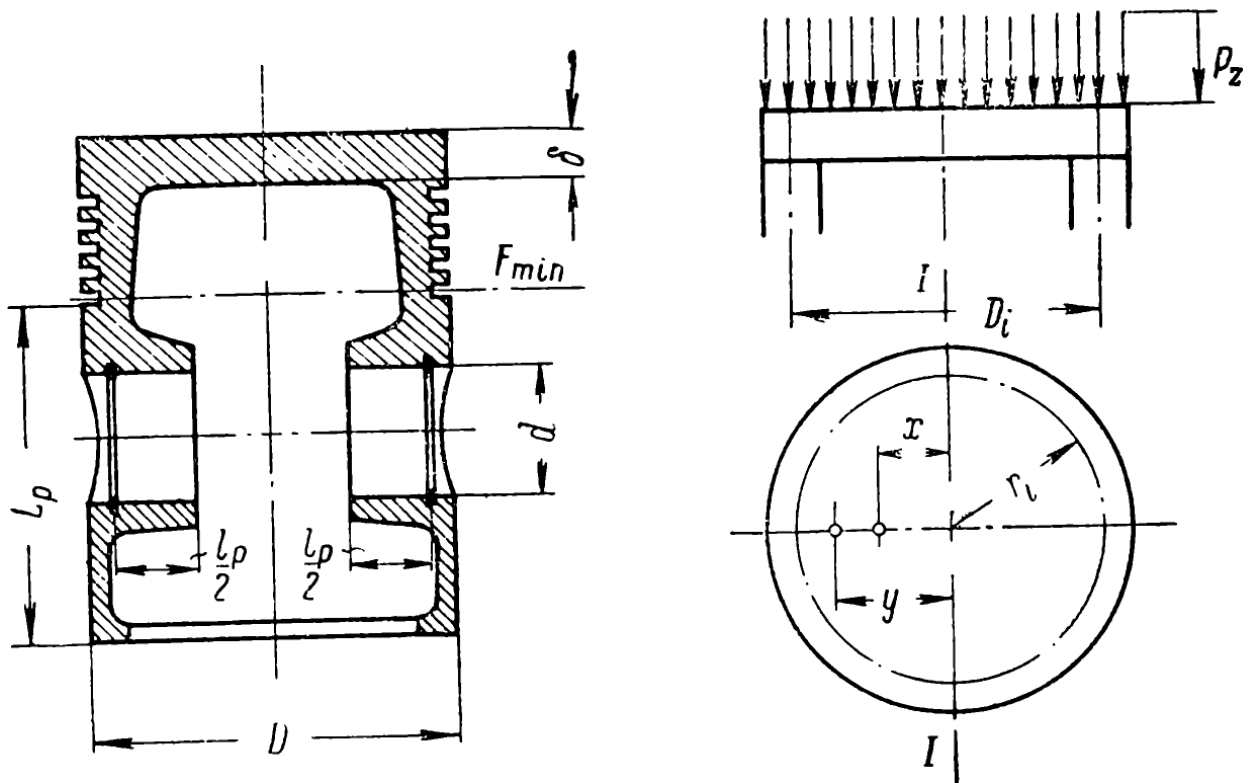


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема поршня суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20)

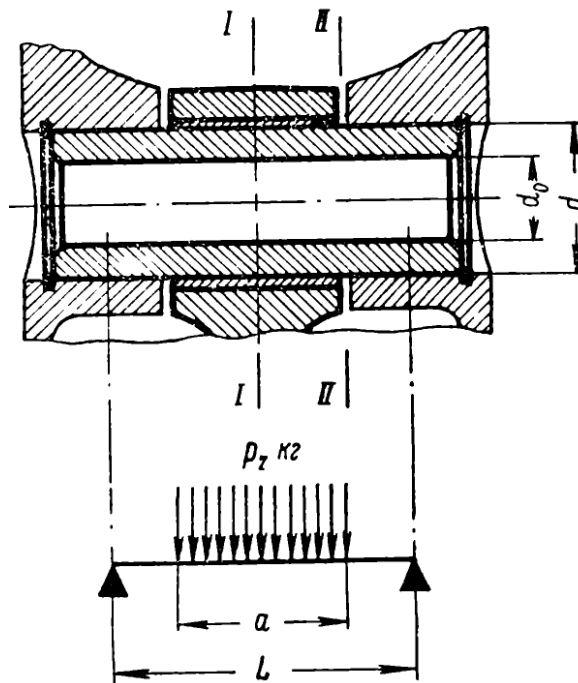


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20)

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4227см.25.05.03.ПЗ

Аркуш

49

Таблиця 3.8 – Результати розрахунку поршня і пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20)

№ з/п	Найменування	Розмірність	Формула для розрахунку	Значення
Основні конструктивні параметри				
1	Товщина днища поршня	δ , м	—	0,015
2	Висота поршня	H , м	—	0,266
3	Відстань від днища поршня до осі під поршне-вий палець	h_1 , м	—	0,136
4	Висота юбки поршня	l_y , м	—	0,201
5	Відстань до першої кільцевої канавки	l_1 , м	—	0,032
6	Діаметр головки поршня	d_g , м	—	0,199
7	Діаметр юбки поршня	d_y , м	—	0,200
8	Відстань між торцями бобишок	b , м	—	0,045
9	Товщина стінки голівки поршня	S , м	—	0,026
10	Висота перемичок	h_n , м	—	0,010
11	Діаметр поршневого пальця	d_p , м	—	0,108
12	Внутрішній діаметр пальця	d_{p}^0 , м	—	0,030
13	Довжина пальця	l_p , м	—	0,184
14	Глибина проточки під кільця: – компресійні – маслосеюмні	t_1 , м t_2 , м	—	0,010 0,014
15	Висота проточки під кільця: – компресійні – маслосеюмні	h_{kk} , м h_{km} , м	—	0,006 0,010
16	Діаметр масляних каналів	d_m , м	—	0,008
17	Кількість масляних каналів	n_m	—	10
18	Довжина підшипника верхньої голівки шатуна	a , м	—	0,070
Розрахунок на міцність поршня				
1	Мінімальна площа стінок голівки поршня	m^2	$F_{\min} := \left[\left[\frac{\pi \cdot \left[(d_g - t_2 \cdot 2)^2 - (d_g - t_2 \cdot 2 - 2 \cdot S)^2 \right]}{4} \right] - S \cdot d_m \cdot n_m \right]$	0,0098
2	Напруга стиску. Допустима напруга стиску для сталі 80МПа.	МПа	$\sigma_c := \frac{P_z \cdot \left(\pi \cdot \frac{D^2}{4} \right)}{F_{\min}}$	59,805
3	Найбільший тиск на юбку поршня. Допустимий питомий тиск на юбку поршня, для чавуну 0,6 МПа.	МПа	$P_y := \frac{N \cdot \left[\pi \cdot \frac{(D \cdot 1000)^2}{4} \right]}{l_y \cdot D \cdot 1000000}$	0,547

4	Тиск на опорну поверхню в бобищі	МПа	$P_b := \frac{P_z \cdot \left(\pi \cdot \frac{D^2}{4} \right)}{d_p \cdot (l_p - b)}$	38,897
5	Напруга від згинання	МПа	$\sigma_u := P_z \cdot \frac{3}{16} \cdot \left[\frac{(d_g - S \cdot 2)}{(h_n + \delta) \cdot 2} \right]^2$	30,123
6	Теплове навантаження		$q := (71000 + 310 \cdot n) P_i$	1039368
7	Температурні напруги в днищі	МПа	$\sigma_t := q \cdot \delta \cdot a$	311,81
8	Сумарне навантаження в днищі	МПа	$\sigma_\Sigma := \sigma_u + \sigma_t$	341,934
Розрахунок поршневого пальця на міцність				
1	Відстань між серединами опор пальця	м	$L_u := b + \frac{(l_p - b)}{2}$	0,115
2	Згинаючий момент відносно небезпечного перетину I-I	Н·м	$M_u := \frac{P_z \cdot \left[\frac{\pi \cdot (D \cdot 1000)^2}{4} \right]}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{a}{4} \right)$	11605,566
3	Момент опору перетину пальця I-I	мм ³	$W_u := 0.1 \cdot \frac{d^3 - d_o^3}{d}$	1141,4
4	Напруга згинання. Допустимі напруги згинання для пальців з вуглецевої сталі 120 МПа	МПа	$\sigma_{uw} := \frac{M_u}{W}$	10,1678
5	Площа перетину поршневого пальця	м ²	$F_u := \frac{\pi \cdot (d^2 - d_o^2)}{4}$	$8,454 \cdot 10^3$
6	Напруга зрізу. Допустимі напруги зрізу 50...60 МПа.	МПа	$\sigma_{sp} := \frac{P_z \cdot \left[\frac{\pi \cdot (D \cdot 1000)^2}{4} \right]}{2 \cdot F}$	34,535
7	Модуль пружності для вуглецевої сталі	МПа	Обираємо з довідкової літератури	$2,0 \cdot 10^5$
8	Лінійне збільшення діаметру поршня	м	$\Delta d := \frac{0.09 \cdot P_z}{E \cdot l_p} \cdot \left(\frac{1 + \frac{d_o}{d}}{1 - \frac{d_o}{d}} \right)^3 \cdot \left[1.5 - 15 \cdot \left(\frac{d_o}{d} - 0.4 \right)^3 \right]$	0,00038
9	Відносна деформація пальця	мм/мм	$\delta_w := \frac{\Delta d \cdot 1000}{d}$	0,00356

3.4. Висновки до розділу

У третьому розділі бакалаврської роботи здійснено аналіз особливостей роботи поршнів та поршневих пальців трункових двигунів внутрішнього згорання. Також у розділі було розглянуто основні матеріали, які застосовують у сучасному двигунобудуванні для виготовлення поршнів та пальців форсованих ДВЗ.

Виконано розрахунок поршня та поршневого пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20), в результаті чого встановлено, що усі діючі напруги для даної конструкції поршня та пальця знаходяться у своїх допустимих межах. Визначено, що допустиме значення сумарних навантажень на днище поршня двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20), яке складається з суми напружень від згинання та температурних напружень (341,934 МПа), не перевищує допустимих значень. Також, було визначено, що відносна деформація поршневого пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20) становить 0,003560 мм/мм, що цілком задовольняє вимогам забезпечення безвідмовної та надійної роботи вузла «шатун–поршень» (допустиме значення 0,02 мм/мм).

					КРБ.142.4227ст.25.05.03.ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДВЗ

4.1. Базові правила безпечного обслуговування суднових ДВЗ

Обслуговувати суднові механізми та дизелі можуть лише особи, які досягли 18 років, визнані придатними для роботи на судні медичними комісіями, пройшли спеціальне навчання та мають відповідні дипломи або свідоцтва, що дозволяють виконувати обов'язки за певною посадою. Особиста відповідальність за запобігання нещасним випадкам на борту судна, своєчасне розслідування таких випадків, ведення їх обліку, розробку заходів для їх запобігання та організацію максимально безпечних методів роботи покладається на капітана-механіка.

Особи, які мають доступ до обслуговування механізмів, проходять відповідний інструктаж на робочому місці щодо безпечних і якісних методів роботи. Допуск до робочих місць осіб, які не пройшли спеціальний інструктаж з безпечної експлуатації суднових механізмів та протипожежного захисту судна, заборонено.

Сучасні дизельні двигуни розроблені та встановлені в машинному відділенні судна з урахуванням максимальної безпеки для їх експлуатації та обслуговування. Проте це зовсім не звільняє обслуговуючий персонал від необхідності чітко знати та дотримуватися всіх вимог безпеки при експлуатації суднової енергетичної установки. Усі відповідні інструкції з охорони праці й протипожежного захисту повинні бути розміщені в машинному відділенні на самому видному місці. Капітани-механіки (або механіки) зобов'язані мати інструкції з ремонту та обслуговування кожного механізму, які містять вказівки для обслуговуючого персоналу в усіх можливих виробничих ситуаціях, включаючи випадки нещасних випадків.

Для більшої зручності обслуговування та ремонту суднової енергетичної установки в машинному приміщенні повинні бути достатньо широкі проходи та майданчики, які ні в якому разі не можна захащувати сторонніми та зайвими предметами. Слані, трапи, майданчики та решітки мають бути в належному технічному стані та підтримуватися в чистоті. Інструменти, необхідні для роботи, по-

					<i>КРБ.142.4227см.25.05.04.ПЗ</i>	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		53

винні завжди бути справними й зберігатися в спеціально відведених місцях. У машинному приміщенні суворо забороняється зберігати зайві предмети та інвентар, які не використовуються під час обслуговування та ремонту суднової енергетичної установки.

Не дозволяється залишати інструменти, пристосування та інші зайві або непотрібні предмети в проходах, трапах, на решітках і дизелі. Використання несправних або невипробуваних вантажопідйомних механізмів, таких як талі, домкрати та інші пристрої, суворо заборонено. Освітленість усіх робочих місць на судні повинна чітко відповідати всім вимогам чинних Санітарних правил і норм України для суден внутрішнього (річкового) плавання. У випадку виходу з ладу основних (головних) джерел освітлення на судні та в приміщеннях машинного відділення, переносні світильники слід підключати лише до джерел низької напруги, а саме – не більше 12 В.

Обертальні та рухомі деталі слід закривати кожухами. Огородження та кожухи, які були зняті з механізмів для огляду та ремонту, необхідно завжди встановлювати на місце після завершення цих робіт. Запуск і експлуатація суднової енергетичної установки без встановлених кожухів та огорожень забороняється.

Деталі, які піддаються сильному нагріванню, слід покривати ізоляцією. Будь-які дефекти в ізоляції потрібно усувати негайно, щоб уникнути опіків. Температура усіх зовнішніх ізольованих від тепла поверхонь не повинна перевищувати значення у 60 °С. Для певних важкоізольованих нагрітих частин допускається підвищена температура їх поверхні, якщо ці частини обладнані огороженнями, які захищають обслуговуючий персонал від можливих опіків.

Необхідно також забезпечити належний стан ізоляції електричних кабелів, електрообладнання та проводів, щоб уникнути іскріння та особливо короткого замикання.

Контрольно-вимірювальні прилади та датчики, встановлені на різних елементах суднової енергетичної установки, повинні бути запломбованими та мати маркуванням, що вказує на дату їх перевірки в лабораторіях Державного інституту України зі стандартів.

					<i>КРБ.142.4227ст.25.05.04.ПЗ</i>	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У машинному приміщенні судна необхідно розмістити комплект пожежного обладнання (ящики з піском, вогнегасники, лопати, багри, ломы, відра) у видимому та доступному для підходу місці. Зберігати легкозаймисті й вибухові речовини, а також обтиральний матеріал, просочені паливом й маслом, у машинному приміщенні заборонено.

Базові заходи безпеки під час експлуатації дизельних двигунів. До несення вахти в машинному відділенні судна допускаються лише члени екіпажу, які одягнені у справний та застебнутий спецодяг. Вхід сторонніх осіб у машинне відділення судна без дозволу вахтового начальника заборонено. Підготовка судових дизелів до запуску і їх обслуговування під час усі роботи мають виконуватися відповідно до інструкцій виробників. Для забезпечення безпеки судової енергетичної установки та обслуговуючого персоналу під час підготовки двигуна до запуску необхідно впевнитися, що двигун готовий до запуску, зміни режиму роботи, зупинки та реверсування відповідно до вказівок органів управління.

Некерований двигун чи той, що неправильно виконує команди, може призвести до серйозних аварій і тяжких нещасних випадків. Підготовку дизеля до запуску здійснюють під наглядом вахтового начальника чи старшого по вахті в машинному відділенні, а після ремонту – капітана-механіка судна.

Перед запуском дизеля необхідно перевірити, чи немає сторонніх предметів на самому двигуні та в лінії його валопроводу, а також прибрати інструменти і пристосування на свої місця. Слід перевірити справність запобіжних пристроїв на картерних люках, кришках робочих циліндрів, насосах й трубопроводах. Оглядаються кріплення кожухів та огорожень рухомих частин установки. Важелі вимкнення гальмівного та валоповоротного пристроїв знімають й укладають на свої місця. Щоб уникнути випадкового запуску дизеля з рубки судна до завершення підготовки, вимикають ДУ. Також потрібно переконатися, що поблизу дизеля і за кормою немає людей у небезпечних зонах.

Перед запуском дизеля старший по вахті дає команду персоналу в машинному приміщенні – «Відійти від дизеля».

Під час роботи дизеля забороняється:

					КРБ.142.4227ст.25.05.04.ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- встановлювати та регулював відповідні зазори у впускних і випускних клапанах системи ГРМ;
- вручну підкачувати паливо в циліндри;
- відкривати люки картера;
- підтягувати різні різьбові з'єднання;
- регулювати та затягувати паливні форсунки й запобіжні клапани;
- визначати на дотик місця можливого витоку робочої рідини (або газу) в системах високого тиску;
- перевантажувати головний дизель чи його окремі робочі циліндри понад встановлені норми;
- допускати експлуатацію дизеля на критичних частотах обертання валу;
- перебувати навпроти відчинених індикаторних кранів.

Під час зупинки дизельного двигуна для виконання огляду чи ремонту необхідно відключити привід дистанційного управління від місцевого поста. Для цього слід закрити запірний клапан на пусковій повітряній магістралі або знеструмити пускову систему при запуску стартером. Далі потрібно увімкнути валоповоротний чи гальмівний пристрій, відкрити усі індикаторні крани й на ручці керування повісити плакат: «Увага!!! Не вмикати – працюють люди!!!».

Перед початком технічного обслуговування чи ремонту дизеля капітан-механік (або механік) проводить спеціальний роз'яснювальний інструктаж для осіб, які будуть виконувати ці роботи. Робочі місця для технічного обслуговування повинні бути добре освітлені та оснащені необхідними пристосуваннями, прокладками, інструментами для деталей та іншими предметами, що потрібні для виконання обслуговування.

Перед початком розборки механізму необхідно переконатися, що він відключений від джерела живлення (електрики або стисненого повітря). Механізми, вузли, обладнання та різні деталі вагою понад 50 кг слід піднімати й переміщати лише за допомогою надійних та справних вантажопідйомних засобів, дотримуючись встановлених норм вантажопідйомності. Частини, механізми та обладнання, що можуть впасти після від'єднання, потрібно надійно застропити до завершення

розбирання. Демонтовані чи підготовлені для складання усі деталі механізмів слід розміщувати на бортових і перегородкових поверхнях у стійкому положенні, щоб уникнути їх накочування під час струсу. Під час здійснення роботи на верхніх майданчиках машинних приміщень необхідно вжити заходів для запобігання падінню інструментів. Використання несправного інструменту заборонено. Доступ до відповідних робочих місць та механізмів, що ремонтуються, повинен бути вільним. При виконанні робіт, пов'язаних з виділенням накопиченого пилу чи шкідливих газів, обов'язково використовуйте засоби індивідуального захисту, такі як респіратори, протигази та окуляри.

Щоб запобігти нещасним випадкам під час технічного обслуговування та ремонту дизелів, колінчастий вал слід провертати лише за допомогою спеціального пристрою або валоповоротного механізму. Відкривати кришки картерних люків двигуна можна лише через 10...20 хвилин після зупинки самого дизеля. Для перевірки необхідного збігу болтових отворів при з'єднанні фланців трубопроводів (або валопроводів) необхідно застосовувати спеціальні оправки-ломики. Використання пальців для перевірки збігу отворів заборонено.

Відкривати клінкети, вентиля, клапани та крани забороняється за допомогою ключів з подовженими ручками, труб або інших предметів. Також заборонено виконувати будь-які роботи в паливних й масляних цистернах, де можуть бути присутні небезпечні для здоров'я людини гази; ремонтувати балони, трубопроводи та арматуру під тиском; залишати без нагляду увімкнені ліхтарі, лампи або запалені свічки, а також використовувати відкритий вогонь під час здійснення перевірки місць, де можливе скупчення вибухонебезпечних газів.

4.2. Розрахунок штучного освітлення машинного приміщення судна

Основною метою розрахунку штучного освітлення в машинному приміщенні є визначення необхідної кількості освітлювальних приладів (ламп), які забезпечать відповідний рівень освітлення, що відповідає санітарно-гігієнічним нормам.

Для оцінки рівномірності освітлення на умовно горизонтальній робочій поверхні будь-якого приміщення використовується стандартний надійний метод.

					КРБ.142.4227см.25.05.04.ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Цей метод базується на визначенні світлового потоку з обов'язковим урахуванням відбиття світла від стін і стелі. Усі розрахунки представлені у табличній формі – таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунок штучного освітлення машинного приміщення судна

№ з/п	Найменування	Розмірність	Формула для розрахунку	Значення
1.	Довжина суднового машинного приміщення	$A, \text{м}$	–	32,5
2.	Ширина суднового машинного приміщення	$B, \text{м}$	–	29,0
3.	Площа приміщення суднового машинного приміщення	$S, \text{м}^2$	$S = A \cdot B$	942,5
4.	Коефіцієнт запасу освітленості	k	–	1,5
5.	Мінімальна нормована санітарно-гігієнічна освітленість	$E_n, \text{лк}$	–	50,0
6.	Коефіцієнт мінімальної (допустимої) освітленості	z	$z = E_{\text{сер}}/E_{\text{min}}$	1,2
7.	Висота кріплення джерела світла (світильника)	$H_p, \text{м}$	–	5,7
8.	Коефіцієнтів відбиття від стелі приміщення	$\rho_{\text{стеля}}, \%$	–	30,0
9.	Коефіцієнтів відбиття від стін приміщення	$\rho_{\text{стіна}}, \%$	–	10,0
10.	Показник приміщення	i	$i = \frac{S}{H_p \cdot (A + B)}$	2,688
11.	Коефіцієнт використання світлового потоку	η	–	0,72
12.	Необхідний світловий потік	$\sum \Phi_l, \text{лм}$	$\sum \Phi_l = E_n \cdot S \cdot z \cdot \frac{k}{\eta}$	117812,5
13.	Світловий потік ДРЛ	$\Phi_{\text{л}}, \text{лм}$	–	18210
14.	Кількість ламп (округлюємо до ближчого більшого значення)	$N, \text{шт.}$	$N = \frac{\sum \Phi_l}{\Phi_{\text{л}}}$	7

4.3. Висновки до розділу

У цьому розділі детально розглянуто основні правила безпечного обслуговування суднових дизелів екіпажем, а також проведено розрахунок необхідного штучного освітлення в машинному приміщенні судна. Згідно з отриманими даними, для дотримання санітарно-гігієнічних норм освітленості, відповідно до встановлених рекомендацій, у машинному приміщенні зазначеного розміру слід встановити сім ламп типу ДРЛ, кожна з яких має світловий потік 18210 лм.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна бакалаврська робота – «*Розрахунок допоміжного суднового двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20)*» має усі необхідні елементи, зазначені в завданні на кваліфікаційну роботу, а також які рекомендуються кафедрою ДВЗ, У та ТЕ, включаючи креслення результатів роботи.

У роботі розглянуто загальну будову допоміжного суднового двигуна 4ЧН 20/28 (Wartsila 4L20), виконано розрахунок його робочого циклу, а також визначено ефективні показники. За результатами теплового розрахунку побудовано теоретичні індикаторні діаграми у $p - V/V_c$, $T - V/V_c$ та $T - S$ координатах, а також, виконано розрахунок кінематики і динаміки. За результатами кінематичного та динамічного розрахунків було побудовано діаграми кінематики (переміщення, швидкості та прискорення поршня від кута п.к.в.), а також відповідні графіки зміни сил, діючих на елементи КШМ.

Здійснено аналіз особливостей роботи поршнів та поршневих пальців трункових двигунів внутрішнього згоряння, а також розглянуто основні матеріали, які застосовують у сучасному двигунобудуванні для виготовлення поршнів та пальців форсованих ДВЗ. Виконано розрахунок поршня та поршневого пальця суднового допоміжного двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20). Визначено, що допустиме значення сумарних навантажень на днище поршня двигуна Wartsila типу 4ЧН 20/28 (4L20), яке складається з суми напружень від згинання та температурних напружень, не перевищує допустимих значень. Також, було визначено, що відносна деформація поршневого пальця становить 0,003560 мм/мм, що цілком задовольняє вимогам забезпечення безвідмовної та надійної роботи вузла «шатун–поршень».

Детально розглянуто основні правила безпечного обслуговування суднових дизелів екіпажем, а також проведено розрахунок необхідного штучного освітлення в машинному приміщенні судна.

					КРБ.142.4227ст.25.03.00.ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Наливайко В. С. Характеристики двигунів внутрішнього згоряння та споживачів [текст] / В. С. Наливайко, С. Г. Ткаченко, В. Г. Хоменко – Миколаїв: НУК, 2011. – 95 с.
2. Тимошевський Б.Г. Основи технічної експлуатації судових двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. / Б.Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов, А. Ю. Проскурін. – Миколаїв : видавець Торубара В.В., 2024. – 302 с.
3. Марченко А. П., Рязанцев М. К., Шеховцов А. Ф. Двигуни внутрішнього згоряння : серія підручників у 6 т. Т. 1. Розробка конструкції форсованих двигунів наземних транспортних машин / ред. проф. А. П. Марченко та засл. діяча науки України проф. А. Ф. Шеховцова. Харків : Прапор, 2004. – 384 с.
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. Mollenhauer, K. Hanbbook of diesel engines / K. Mollenhauer, H. Tschoeke. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 634 p.
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. 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.

					КРБ.142.4227см.25.03.00.ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		