

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

Кафедра двигунів
внутрішнього згоряння,
установок та технічної
експлуатації

«Допущений до захисту»
В.о. завідувача кафедри
Гогоренко О. А.


« ____ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

РОЗРАХУНОК СУДНОВОГО ДВИГУНА ТИПУ 12ЧН 26/32 (WARTSILA 12V26)

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Для здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Керівник роботи

О. А. Гогоренко

Здобувач освіти

С. І. Піняков

Миколаїв 2024

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

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

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

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

Пінякову Сергію Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розрахунок суднового двигуна типу 12ЧН 26/32 (Wartsila 12V26)*

2. Керівник роботи к.т.н., доцент Гогоренко О. А.,
(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 Потужність двигуна – 4080 кВт; частота обертання колінчатого валу – 1000 хв⁻¹; ступінь стиснення – 13,5; коефіцієнт надлишку повітря – 2,35; ступінь підвищення тиску в компресорі – 4,0

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Опис конструкції двигуна; моделювання робочого циклу; розрахунок та побудова індикаторної діаграми; кінематичний розрахунок КШМ; розрахунок і побудова діаграм динаміки; розрахунок відцентрового насоса; розрахунок і розробка принципів схем систем двигуна; організація охорони праці.

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

Поперечний переріз двигуна типу 12ЧН 26/32 (Wartsila 12V26);

Індикаторна діаграма та діаграми сил, що діють в КШМ;

Відцентровий насос;

Принципові схеми систем двигуна.

7. Консультанти розділів роботи

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

8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка

Здобувач освіти

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

/С. І. Піняков/

(прізвище та ініціали)

/О. А. Гогоренко/

(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	5
1 Опис конструкції двигуна типу 12ЧН 26/32.....	6
1.1 Технічні характеристики двигуна	6
1.2 Конструкція двигуна	8
1.3 Висновок по розділу.....	11
2 Моделювання робочого циклу двигуна типу 12ЧН 26/32.....	12
2.1 Вступ.....	12
2.2 Обґрунтування вибору основних параметрів робочого циклу двигуна	12
2.3 Розрахунок робочого циклу	15
2.4 Розрахунок та побудова теоретичної індикаторної діаграми.....	23
2.5 Висновок по розділу.....	25
3 Перевірочні розрахунки кінематики та динаміки двигуна типу 12ЧН 26/32.....	26
3.1 Кінематичний розрахунок КШМ.....	26
3.2 Розрахунок і побудова діаграм динаміки двигуна	29
3.9 Висновок по розділу.....	35
4 Розрахунок та конструювання відцентрового насосу	36
4.1 Вступ.....	36
4.2 Визначення початкових даних для розрахунків	36
4.3 Визначення основних розмірів робочого колеса	39
4.4 Розрахунок меридіанного перетину робочого колеса	50
4.5 Розрахунок середньої лінії лопаті робочого колеса в плані.....	53
4.6 Розрахунок спірального відвідного каналу.....	56
4.7 Оцінка допустимої висоти всмоктування насосу.....	64
4.8 Опис конструкції відцентрового насоса.....	65
4.9 Висновок по розділу.....	69

5 Розрахунок і розробка принципів схем систем двигуна.....	70
5.1 Паливна система.....	70
5.2 Масляна система	79
5.3 Система охолодження	85
5.4 Система повітропостачання і газовідводу	89
5.5 Висновок по розділу.....	93
6 Організація охорони праці в машинному відділенні судна	94
Висновки по роботі.....	105
Список використаної літератури	106

Вступ

Згідно завдання кафедри, тематикою кваліфікаційної роботи є розрахунок суднового двигуна типу 12ЧН 26/32 потужністю 4080 кВт при частоті обертів колінчатого валу 1000 хв^{-1} . В роботі розглянуто судновий двигун компанії Wartsila моделі 12V26.

Дана робота пов'язана з розглядом сучасного суднового високообертового чотирьохтактного двигуна, який використовується в якості допоміжного суднового двигуна. Широке поширення цих двигунів визначає актуальність докладного вивчення їх у ході розробки кваліфікаційної роботи бакалавра.

Для реалізації мети кваліфікаційної роботи виконується розрахунок робочого циклу, а параметри циклу використовуються в розрахунку циркуляційного відцентрового насосу системи охолодження двигуна. Розрахунок насоса виконаний в четвертому розділі кваліфікаційної роботи.

					КРБ.142.2227ст.07.ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Розділ 1

Опис конструкції двигуна типу 12ЧН 26/32

1.1 Технічна характеристика двигуна

Двигун марки 12V26 – чотиритактний, V-подібний, високообертовий двигун фірми WARTSILA, потужністю 4080 кВт. Двигун з газотурбінним наддувом, охолодженням наддувного повітря і безпосереднім упорскуванням палива. Згідно паспортних даних двигун має наступні характеристики. Номінальна частота обертання колінчатого валу становить 1000 хв^{-1} . Циліндрова потужність – 340 кВт. Маса двигуна – 3,035 т. Діаметр циліндра – 260 мм, хід поршня – 320 мм. Питома витрата палива при 100 % навантаження – $0,192 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$, при 70 % навантаження – $0,186 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$. Середній ефективний тиск 2,3 МПа. Максимальний тиск згоряння – 16 МПа. Тиск наддуву – 0,36 МПа. Витрата циліндрового масла – $0,7 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$.

Загальний вид двигуна типу 12ЧН 26/32 показаний на рис. 1.1, а поперечний перетин на рис. 1.2.



Рис. 1.1. Загальний вид двигуна типу 12ЧН 26/32

					КРБ.142.2227ст.07.01.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		6

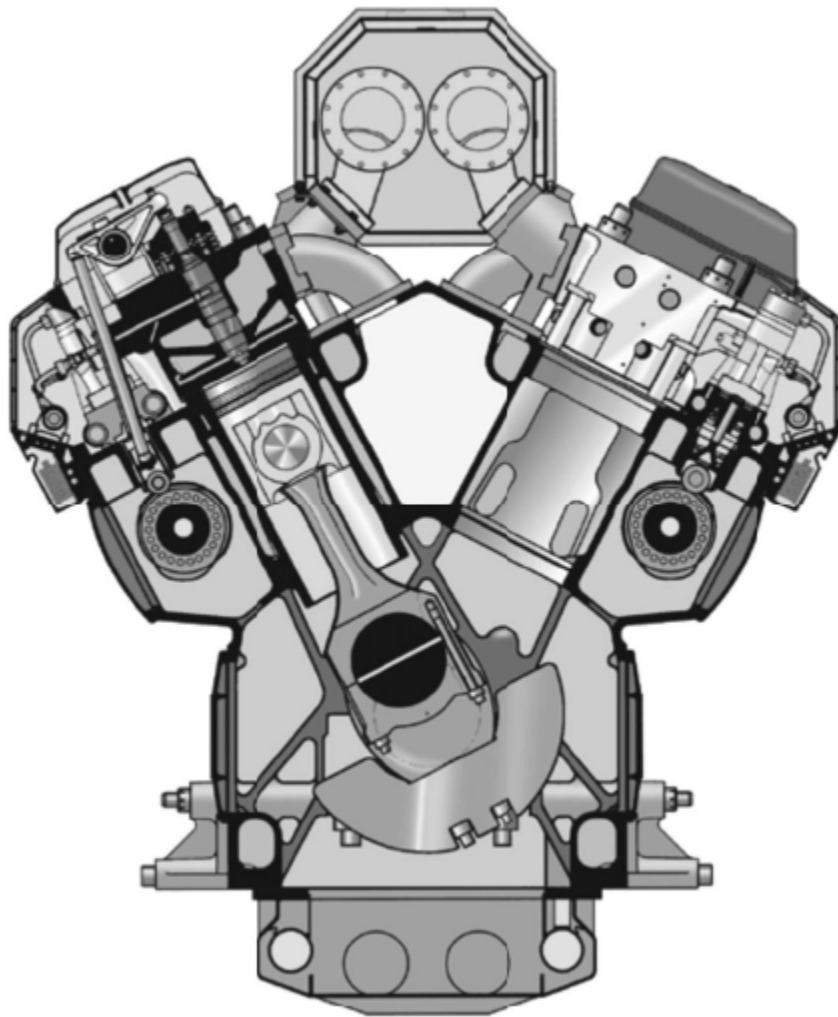


Рис. 1.2. Поперечний перетин двигуна типу 12ЧН 26/32

Навантажувальна характеристика двигуна представлена на рис. 1.3.

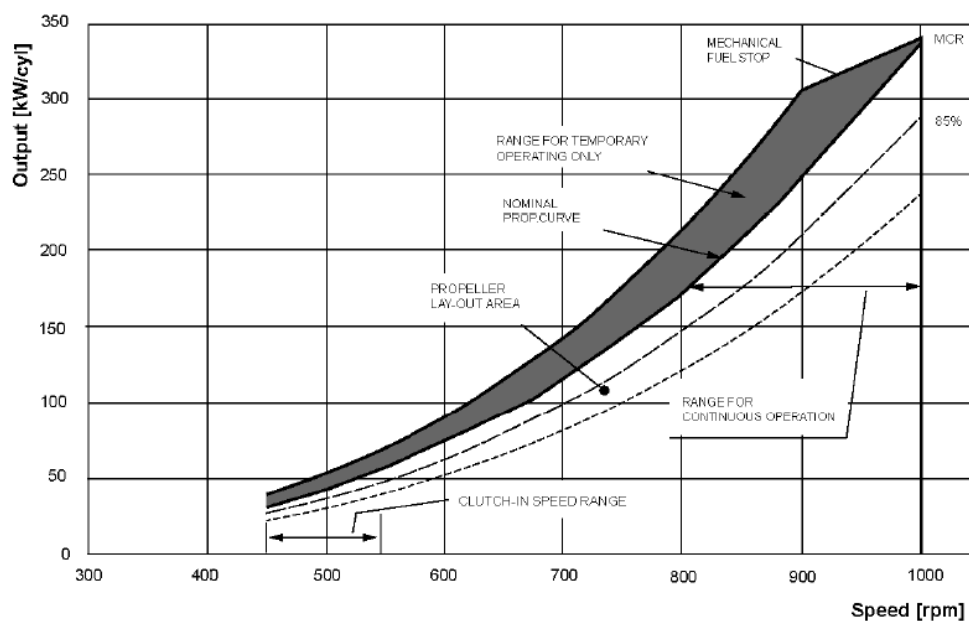


Рис. 1.3. Навантажувальна характеристика двигуна типу 12ЧН 26/32

Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.2227ст.07.01.ПЗ

Лист

7

1.2 Конструкція двигуна

Остов двигуна (рис. 1.4) представляє собою моноблок, об'єднуючий станину и блок циліндрів. Поєднання елементів конструкції, таких як підвісний колінчастий вал, невід'ємний повітряприймач, короткі відстані між циліндрами, і вибір матеріалу призвело до жорсткості двигуна. Підшипники розподільних валів є невід'ємною частиною блоку двигуна і приймають великі сили, викликані спрацюванням паливних насосів.

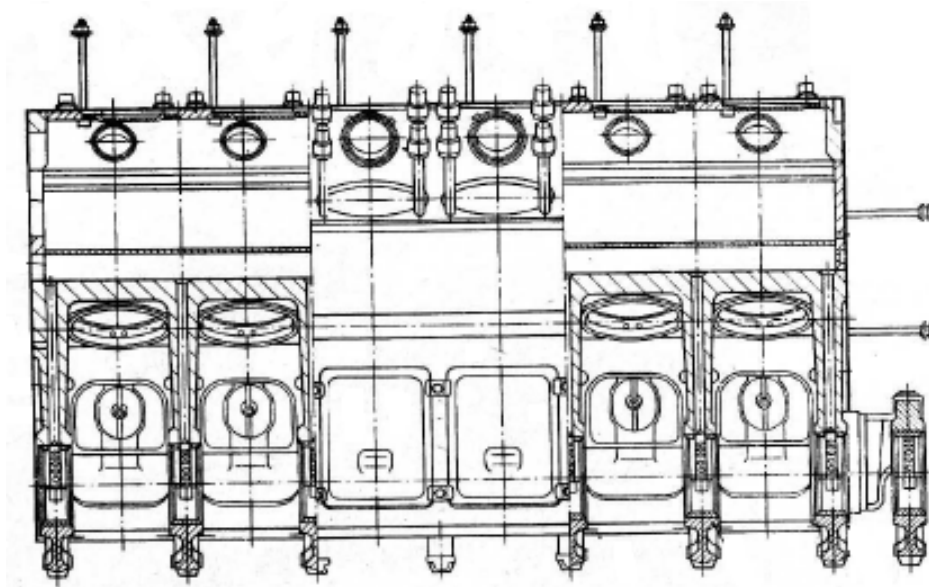


Рис. 1.4. Блок циліндрів двигуна Wartsilla 12V26

Циліндрова втулка (рис. 1.5) двигуна Wartsilla 12V26 виконана з чавунної відливки і встановлюється на блоці за допомогою фланця. У верхній частині маютьсвердлення, куди встановлюються трубки з ізоляцією або без. Розміщення охолоджувальних каналів, найменування або відсутності ізоляції трубок служать цілям підтримання температури втулки, при якій відсутня сірчиста корозія та одночасно не вище температури, при якій порушується режим змазки робочої поверхні.



Рис. 1.5. Циліндрова втулка двигуна Wartsilla 12V26

Циліндрова кришка (рис. 1.6). Використання чотирьох шпильок кришки циліндрів пропонує легкий доступ для обслуговування, вимагаючи менше місця. Жорсткість конструкції кришки циліндра забезпечує рівномірне ущільнення між кришкою циліндрів і втулкою. Сідло клапана не деформується завдяки жорсткості кришки. В кришці просвердлені водяні канали охолодження, щоб запобігти теплових навантажень.

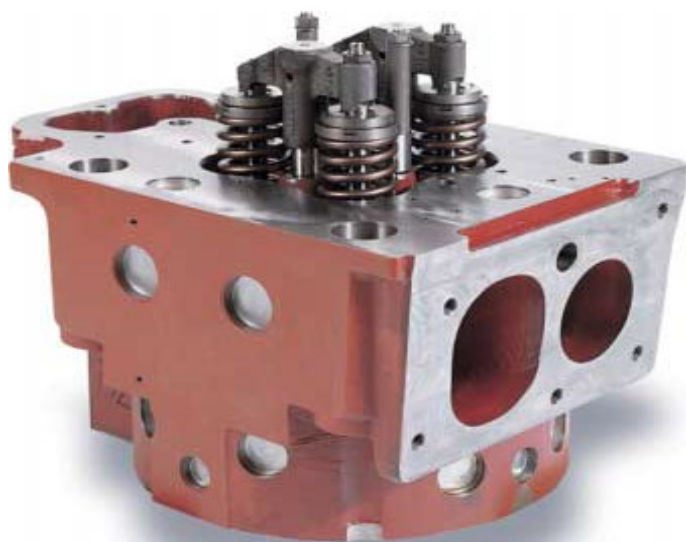


Рис. 1.6. Циліндрова кришка двигуна Wartsilla 12V26

Шатун (рис. 1.7) має мінімальну довжину і високу жорсткість. Він має центральний отвір, без пробок, для подачі масла на поршневий палець.



Рис. 1.7. Шатун двигуна Wartsilla 12V26

Поршень (рис. 1.8) складається з головки та тронка. Тронк поршня виготовлений з ливарного чавуну з бронзовим бандажем. Головка поршня виконана з високопробної сталі та має три кільцеві канавки, які покриті хромовим покриттям із двох сторін канавки. Верхнє поршневе кільце CPR типу (контролює підтримку тиску в камері згоряння), два інші кільця мають косі замки. Верхнє поршневе кільце ширше, ніж інші.



Рис. 1.8. Поршень двигуна Wartsilla 12V26

Колінчастий вал (рис. 1.9) напівсбірного типу, складається з кованих або литих сталевих колін. На задньому кінці колінчастого вала є упорний гребінь, для упорного підшипника. Кормовий фланець з'єднується з маховиком та проміжним валом за допомогою призонних болтів. У носовій частині двигуна під'єднується демпфер подовжніх коливань та фланець для відбору потужності на допоміжні механізми та на можливий валогенератор.



Рис. 1.9. Колінчастий вал двигуна Wartsilla 12V26

1.3 Висновок по розділу

У даному розділі було розглянуто опис конструкції двигуна Wartsilla 12V26 та наведено його технічні характеристики згідно паспортних даних.

					КРБ.142.2227ст.07.01.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		11

Розділ 2

Моделювання робочого циклу двигуна типу 12ЧН 26/32

2.1 Вступ

Основна мета обчислення робочого циклу полягає встановленні основних параметрів та показників роботи дизельного двигуна, які відображають його ефективність та економічність.

Розрахунки здійснюються зазвичай для номінального режиму роботи. Для змінних режимів розрахунок виконується за тією ж методикою, але вхідні дані вибираються з урахуванням конкретних умов режиму.

Розрахунковий цикл дизельного двигуна включає п'ять послідовних процесів: наповнення, стиску, згоряння палива, розширення та випуску. Розрахунок робочого циклу для модернізованого двигуна 12ЧН 26/32 виконується на комп'ютері з використанням методики, заснованої на методі теплового розрахунку, розробленому В. І. Гринівцем. Цей метод ґрунтується на загальновідомих принципах термодинаміки та термохімії, що дозволяє достатньо точно відобразити теплові процеси, що відбуваються у робочому циліндрі, і представляє собою інженерно-аналітичне дослідження..

2.2 Обґрунтування вибору основних параметрів робочого циклу двигуна

Температура навколишнього середовища T_0 . Приймаємо $T_0 = 313 \text{ K}$ (стандартні атмосферні умови).

Тиск навколишнього середовища p_0 . Приймаємо $p_0 = 0,103 \text{ МПа}$ (стандартні атмосферні умови).

Ступінь стиску ε . При призначенні ступеня стиску варто враховувати розміри циліндра і спосіб сумішоутворення. Приймаємо $\varepsilon = 13,5$.

Коефіцієнт надлишку повітря α . Цей коефіцієнт також залежить від розмірів циліндра та способу утворення паливної суміші. При його збільшенні зменшується питома витрата пального, але одночасно знижується

					КРБ.142.2227ст.07.02.ПЗ	Лист
						12
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

середній ефективний тиск і потужність двигуна. Тому цей параметр слід підбирати шляхом кількох розрахунків, з урахуванням досягнення оптимального балансу між заданою потужністю та максимальною економічністю. Вибір остаточного значення α робиться з вибором оптимального значення P_k . З урахуванням переліченого встановлюємо $\alpha = 2,35$.

Показник адіабаты повітря $k_b = 1,41$.

Механічний ККД турбіни $\eta_{t.m} = 0,97$.

Адіабатний ККД турбіни $\eta_{t.ad} = 0,78$.

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

Коефіцієнт використання теплоти в точці z (ξ_z), та в точці b (ξ_b). Ця величина змінюється в широких межах і залежить від ступеня досконалості двигуна. Найкраще ці величини призначати після аналізу теплового балансу двигунів, близьких до проектного.

Приймаємо $\xi_z = 0,92$; $\xi_b = 0,96$.

Ступінь підвищення тиску при згорянні λ . Приймаємо $\lambda = 1,34$.

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

Приймаємо $\Delta T_a = 5$ К.

Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми ζ . Величину цього коефіцієнту вибирають на підставі дослідних даних, звертають увагу на тип двигуна та особливості системи газообміну. Приймаємо $\zeta = 0,97$.

Механічний ККД двигуна η_m . Приймаємо $\eta_m = 0,88$.

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

Температура залишкових газів T_r . Приймаємо $T_r = 710$ К.

					КРБ.142.2227ст.07.02.ПЗ	Лист
						13
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Хімічний склад палива. Розрахунок проводиться на паливо середнього складу: $C = 0,866$ кг – кількість вуглецю; $H = 0,13$ кг – кількість водню;

$S = 0$ кг – кількість сірки; $O = 0,004$ кг – кількість кисню.

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

Нижча теплота згоряння палива. Приймаємо $Q_n = 42664,4$ (кДж/кг).

Частка ходу поршня втраченого на продувку φ_n . Приймаємо $\varphi_n = 0$.

Розрахунок робочого циклу виконано за допомогою персонального комп'ютера в програмі MathCAD і буде представлений далі у вигляді роздруківки.

					КРБ.142.2227ст.07.02.ПЗ	Лист
						14
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

2.3 Розрахунок робочого циклу

1.1 Ефективна потужність, кВт	$N'_e = 4080$
1.2. Частота обертання, хв ⁻¹	$n = 1000$
1.3 Тиск навколишнього середовища, МПа	$P_0 = 0.103$
1.4 Температура навколишнього середовища, К	$T_0 = 313$
1.5 Ступінь підвищення тиску в компресорі	$\Pi_k = 4$
1.6 Коефіцієнт продувки	$\phi_a = 1.25$
1.7 Коефіцієнт залишкових газів	$\gamma_r = 0.02$
1.8 Коефіцієнт використання теплоти в точці Z	$\xi_z = 0.92$
1.9 Коефіцієнт використання теплоти в точці b	$\xi_b = 0.96$
1.10 Ступінь стиску	$\epsilon_{\text{св}} = 13.5$
1.11 Ступінь підвищення тиску при згорянні	$\lambda = 1.34$
1.12 Підігрів заряду від стінок циліндра, К	$\Delta T_a = 5$
1.13 Доля ходу поршня втраченого на продувку	$\phi_n = 0$
1.14 Коефіцієнт скрулення індикаторної діаграми	$\zeta = 0.97$
1.15 Механічний ККД двигуна	$\eta_m = 0.88$
1.16 Адіабатний ККД компресора	$\eta_{k.ad} = 0.78$
1.17 Зниження тиску в повітроохолоджувачі, МПа	$\Delta P_{ox.} = 0.004$
1.18 ККД системи охолодження наддувного повітря	$\eta_o = 0.97$
1.19 Температура залишкових газів, К	$T_r = 710$
1.20 Масовий склад палива (кг/кг):	$C_{\text{св}} = 0.866$
	$H_{\text{св}} = 0.13$
	$S_{\text{св}} = 0$
	$O = 0.004$
1.21 Нижча теплота згорання палива, (кДж/кг)	$Q_H = 42664.4$
1.22 Кількість циліндрів	$i = 12$
1.23 Діаметр циліндру, м	$D_c = 0.26$
1.24 Хід поршня, м	$S_c = 0.32$
1.25 Коефіцієнт тактності	$z = 0.5$

1.26 Коефіцієнт надлишку повітря для згоряння $\alpha = 2.35$

1.27 Показник адіабаты для повітря $k_B = 1.41$

1.28 Механічний ККД турбіни $\eta_{t.m} = 0.97$

1.29 Адіабатний ККД турбіни $\eta_{t.ad} = 0.78$

2. Розрахунок процесу наповнення

2.1 Тиск наддуву, МПа

$$P_k = P_0 \cdot P_k \quad P_k = 0.412$$

2.1 Температура повітря за компресором, К

$$T_k = T_0 \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{0.286} - 1}{\eta_{k.ad}} \right] \quad T_k = 508.257$$

2.2 Температура повітря перед двигуном, К

$$T_s = T_k - \eta_o \cdot (T_k - T_0) \quad T_s = 318.858$$

2.3 Температура заряду до кінця процесу наповнення, К

$$T_a = \frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r} \quad T_a = 331.429$$

2.4 Тиск повітря перед двигуном, МПа

$$P_s = P_k - \Delta P_{ox.} \quad P_s = 0.408$$

2.5 Тиск заряду до кінця процесу наповнення, МПа

$$P_a = 0.97 \cdot P_s \quad P_a = 0.396$$

2.6 Коефіцієнт наповнення

$$\eta_H = \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \cdot \frac{P_a}{P_s} \cdot \frac{T_s}{T_a} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_r} \cdot (1 - \phi_n) \quad \eta_H = 0.988$$

3. Розрахунок процесу стиску

3.1 Середня мольна ізорна теплоємність повітря, кДж/(моль*К)

$$c'_v = 19.26 + 0.0025 \cdot T$$

3.2 Середня мольна ізорна теплоємність чистих продуктів згорання кДж/(моль*К)

$$c''_v = 20.47 + 0.0036 \cdot T$$

3.3 Теплоємність суміші повітря та залишкових газів на ході стиску кДж/(моль*К)

$$c''_{vc} = \frac{\gamma_r \cdot c''_v + [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - \gamma_r] \cdot c'_v}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r)} = a_{vc} - b_c \cdot T$$



$$b_c = 0.002509 \quad a_{vc} = 19.27$$

3.4 Середній показник політропи стиску



$$n_1 - 1 = \frac{8.13}{a_{vc} + b_c \cdot T_a \cdot (1 + \epsilon^{n_1 - 1})} \quad n_1 = 1.365$$

3.5 Тиск в кінці стиску, МПа

$$P_c = P_a \cdot \epsilon^{n_1} \quad P_c = 13.826$$

3.6 Температура в кінці стиску, К

$$T_c = T_a \cdot \epsilon^{n_1 - 1} \quad T_c = 857.701$$

4. Розрахунок процесу згоряння

4.1 Дійсна кількість повітря для згоряння, кмоль/кг

$$L = \frac{\alpha}{0.21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \quad L = 1.17$$

4.2 Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta_0 = 1 + \frac{8 \cdot H + O}{32 \cdot L} \quad \beta_0 = 1.0279$$

4.3 Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} \quad \beta = 1.0273$$

4.4 Доля палива, що згоріла в точці z

$$x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b} \quad x_z = 0.958$$

4.5 Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z

$$\beta_z = 1 + \left(\frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \cdot x_z \quad \beta_z = 1.026$$

4.6 Середня мольна ізохорна теплоємність в точці z, кДж/(моль*К)

$$c''_{vz} = \frac{(m \cdot x_z + \gamma_r) \cdot c''_v + [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - (x_z + \gamma_r)] \cdot c'_v}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + (m - 1) \cdot x_z} = a_{vz} + b_z \cdot T$$

де $\Delta M = \left(\frac{H}{4} + \frac{O}{32} \right) \quad \Delta M = 0.0326$

$$L_0 = 0.495 \quad \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}$$

$$m = 1 + \frac{\Delta M}{L_0} \quad m = 1.066$$

$$a_{vz} = 19.77225$$

$$b_z = 0.00297$$

4.7 Середня мольна ізохорна теплоємність в точці b, кДж/(моль*К)

$$c_{vb} = \frac{(m + \gamma_r) \cdot c''_v + (\alpha - 1) \cdot (1 + \gamma_r) \cdot c'_v}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + (m - 1)} = a_{vb} + b_b \cdot T$$

$$a_{vb} = 19.7935$$

$$b_b = 0.002985$$

4.8 Максимальна температура згоряння, К
- знаходимо з наступного рівняння:



$$\frac{\xi_z \cdot Q_H}{\alpha \cdot L_0} + [c'_v + 8.314 \cdot \lambda + \gamma_r \cdot (c''_v + 8.314 \cdot \lambda)] \cdot T_c = \beta_z \cdot (1 + \gamma_r) \cdot c''_{pz} \cdot T_z$$

$$\text{звідки: } T_z = 1782.146$$

4.9 Максимальний тиск згоряння, МПа

$$P_z = \lambda \cdot P_c$$

$$P_z = 18.527$$

5. Розрахунок процесу розширення

5.1 Ступінь попереднього розширення

$$\rho = \frac{\beta_z}{\lambda} \cdot \frac{T_z}{T_c}$$

$$\rho = 1.591$$

5.2 Ступінь послідуного розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}$$

$$\delta = 8.484$$

5.3 Середній показник політропи розширення та температура в кінці процесу розширення, К. (знаходимо зі слідуючої системи рівнянь, методом послідовних наближень):

$$n_2 = \frac{8.314 \cdot \left(\frac{\beta_z}{\beta} \cdot T_z - T_b \right)}{\frac{Q_H \cdot (\xi_b - \xi_z)}{L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta} + \frac{\beta_z}{\beta} \cdot (a_{vz} + b_z \cdot T_z) \cdot T_z - (a_{vb} + b_b \cdot T_b) \cdot T_b} + 1$$



$$T_b = T_z \cdot \frac{1}{\delta^{n_2-1}}$$

$$n_2 = 1.28$$

$$T_b = 978.588$$

5.4 Тиск в кінці процесу розширення, МПа

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}$$

$$P_b = 1.199$$

					КРБ.142.2227ст.07.02.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		19

6. Визначення індикаторних показників

6.1 Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа

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

$$P'_i = 2.812$$

6.2 Дійсний середній індикаторний тиск, МПа

$$P_i = P'_i \cdot \zeta \cdot (1 - \phi_n) \quad P_i = 2.727$$

6.3 Індикаторна питома витрата палива, кг/(кВт*г)

$$b_i = 433 \cdot \frac{P_s \cdot \eta_H}{\alpha \cdot L_0 \cdot T_s \cdot P_i} \quad b_i = 0.173$$

6.4 Індикаторний ККД

$$\eta_i = \frac{3600}{b_i \cdot Q_H} \quad \eta_i = 0.489$$

7. Визначення ефективних показників

7.1 Середній ефективний тиск, МПа

$$P_e = P_i \cdot \eta_m \quad P_e = 2.4$$

7.2 Ефективний ККД двигуна

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m \quad \eta_e = 0.43$$

7.3 Питома ефективна витрата палива, кг/(кВт*г)

$$b_e = \frac{b_i}{\eta_m} \quad b_e = 0.1961$$

7.4 Ефективна потужність двигуна

$$N_e = 13.1 \cdot D_c^2 \cdot S_c \cdot z \cdot P_e \cdot n \cdot i \quad N_e = 4080.761$$

7.5 Порівняння заданої і отриманої ефективної потужності двигуна

$$\Delta N = \frac{N_e - N'_e}{N_e} \quad \Delta N = 0.019 \cdot \%$$

Висновок: "Похибка не перевищує допустимі 2%"

					КРБ.142.2227ст.07.02.ПЗ	Лист
						20
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

8. Визначення дійсного P_k компресора на даном режимі роботи двигуна

8.1 Витрата повітря через компресор, кг/с

-Універсальна газова стала для повітря $\frac{Дж}{кг \cdot K}$

$$R = 287$$

$$G = \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \right) \cdot S_c \cdot \left(\frac{P_s \cdot 10^6}{R \cdot T_s} \right) \cdot \eta_H \cdot i \cdot z \cdot \left(\frac{n}{60} \right) \cdot \phi_a \quad G = 9.356$$

8.2 Витрата газів через турбіну, кг/с

$$G_t = G + b_e \cdot \frac{N_e}{3600} \quad G_t = 9.578$$

8.3 Тиск газу перед турбіною, МПа

$$P_r = 0.95 \cdot P_k \quad P_r = 0.391$$

8.4 Температура газу перед турбіною, К

$$T_t = T_b \cdot \left(\frac{P_r}{P_b} \right)^{\frac{n_2-1}{n_2}} \quad T_t = 765.816$$

8.5 Загальна кількість продуктів згоряння, кмоль

$$M_s = \left(\frac{C}{12} \right) + \left(\frac{H}{2} \right) + [0.21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0] + (0.79 \cdot \alpha \cdot L_0) \quad M_s = 1.196$$

8.6 Універсальна газова стала для відпрацьованих газів, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$

$$R_t = \frac{1}{\frac{C}{12 \cdot M_s \cdot 189} + \frac{H}{2 \cdot M_s \cdot 461.6} + \frac{0.21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0}{M_s \cdot 259.8} + \frac{0.79 \cdot \alpha \cdot L_0}{M_s \cdot 296.8}} \quad R_t = 287.677$$

8.7 Показник адіабати розширення газу в турбіні

$$k_t = \frac{(a_{vb} + b_b \cdot T_t) + 8.314}{a_{vb} + b_b \cdot T_t} \quad k_t = 1.377$$

8.8 Дійсний ступінь підвищення тиску в компресорі

$$\Pi_{\text{кд}} = \left[1 + \frac{\left(\frac{k_t}{k_t - 1} \right) \cdot R_t \cdot T_t \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(0.97 \cdot \frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{1}{k_t-1}}} \right] \cdot \eta_{\text{t.m}} \cdot \eta_{\text{t.ad}} \cdot G_t}{G \cdot R \cdot T_0 \cdot \left(\frac{k_B}{k_B - 1} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{k.ad}}}} \right]^{\frac{1}{0.286}}$$

$\Pi_{\text{кд}} = 4.014$

8.9 Порівняння заданого і отриманого ступеня підвищення тиску в компресорі

$$\Delta \Pi_k = \frac{\Pi_{\text{кд}} - \Pi_k}{\Pi_{\text{кд}}} \quad \Delta \Pi_k = 0.35 \cdot \%$$

Висновок: "Похибка не перевищує допустимі 2%"

2.4 Розрахунок та побудова теоретичної індикаторної діаграми

Ординати точок політропи стиснення та розширення обчислюють за наступними формулами:

– для процесу стиснення:

$$p = \frac{p_c}{(V/V_c)^{n_1}};$$

– для процесу розширення:

$$p = \frac{p_z \cdot \rho^{n_2}}{(V/V_c)^{n_2}};$$

де $V/V_c = \varepsilon_x$ – відношення об'ємів, яке представляє собою поточне значення ступеня стиснення

Дані для розрахунку та побудови теоретичної індикаторної діаграми

Показник політропи стиснення n_1	1,365
Показник політропи розширення n_2	1,28
Тиск кінця стиснення p_c , МПа	13,826
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	18,527
Ступінь попереднього розширення ρ	1,591
Ступінь стиснення ε	13,5

Таблиця 2.1

V/V_c	$p_{ст}$	$p_{розш}$
1,00	18,53	
1,00	13,83	18,53
1,59	7,34	18,53
2,19	4,75	12,33
2,78	3,42	9,06
3,38	2,63	7,07
3,97	2,10	5,74
4,57	1,74	4,80
5,16	1,47	4,11
5,76	1,27	3,57
6,35	1,11	3,15
6,95	0,98	2,81
7,55	0,88	2,53
8,14	0,79	2,29
8,74	0,72	2,09
9,33	0,66	1,92
9,93	0,60	1,78
10,52	0,56	1,65
11,12	0,52	1,54
11,71	0,48	1,44
12,31	0,45	1,35
12,90	0,42	1,27
13,50	0,40	1,20
13,50	0,40	0,40

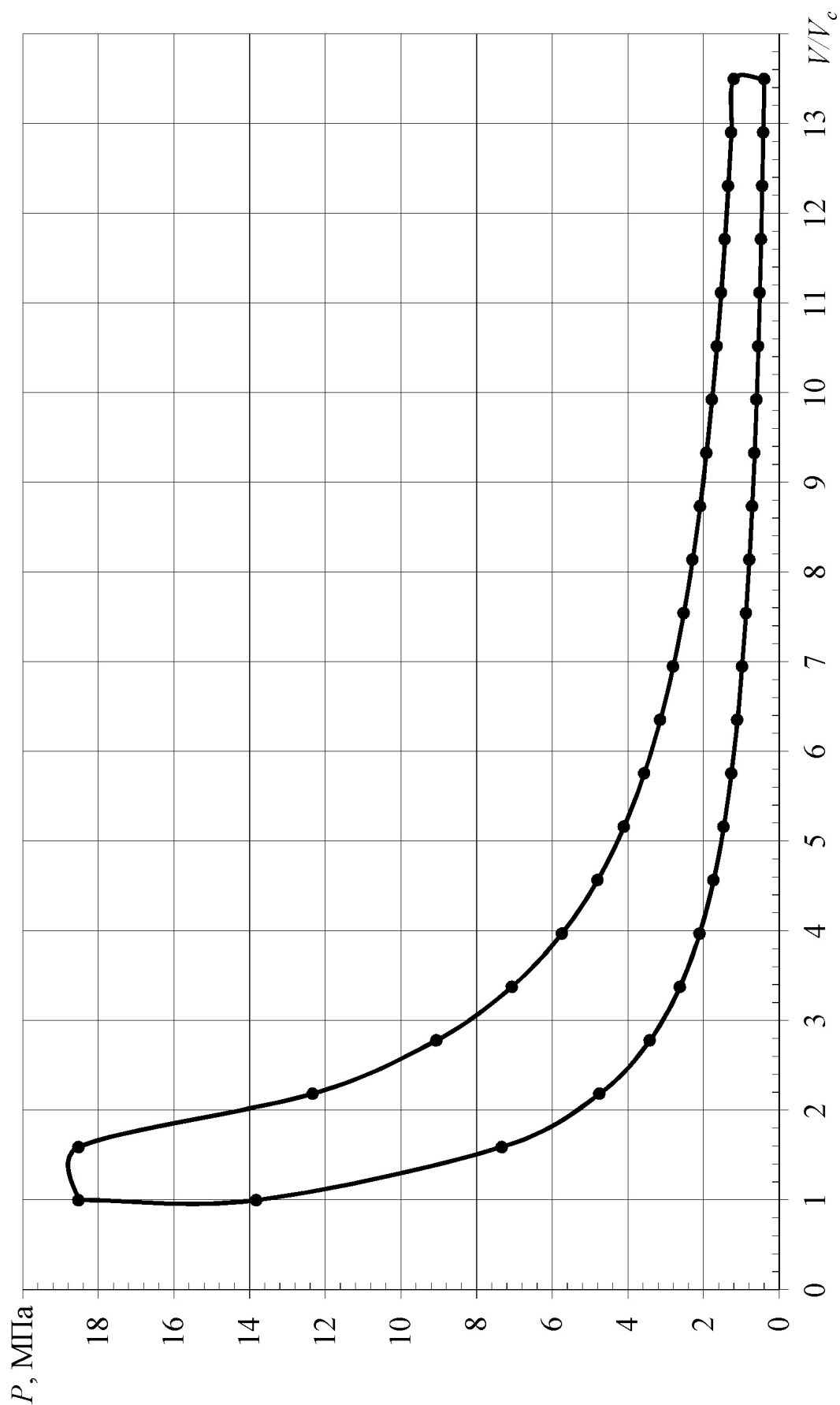


Рис. 2.1. Теоретична індикаторна діаграма двигуна типу 12ЧН 26/32

2.5 Висновок по розділу

В табл. 2.2 приведені основні параметри розглянутого двигуна типу 12ЧН 26/32, які отримані під час моделювання робочого циклу.

Таблиця 2.2. Основні параметри двигуна

№	Параметри двигуна	Проектований двигун
1.	Ефективна потужність, кВт	4080
2.	Частота обертання, колінчатого валу хв^{-1}	1000
3.	Ступінь стиску	13,5
4.	Тиск наддуву, кПа	412
5.	Коефіцієнт надлишку повітря	2,35
6.	Середній ефективний тиск, кПа	2400
7.	Ефективна витрата пального, $\text{кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$	0,196
8.	Механічний ККД	0,88
9.	Індикаторний ККД	0,489
10.	Ефективний ККП	0,430

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

Показник економічності двигуна (питома ефективна витрата пального) дорівнює $0,196 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$. Можна зробити висновок, що за цим параметром двигун типу 12ЧН 26/32 належить до машин з прогресивним показником економічності і має можливість конкурувати з іншими двигунами приблизно такої ж потужності і розмірності.

Розділ 3

Перевірочний розрахунок кінематики та динаміки двигуна типу 12ЧН 26/32

3.1 Кінематичний розрахунок КШМ

Кінематичний розрахунок кривошипно-шатунного механізму двигуна дозволяє визначити зміну шляху, швидкості, прискорення поршня в залежності від кута повороту кривошипа колінчастого валу.

Переміщення поршня визначається з виразу

$$S_{n\varphi} = R \cdot \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right],$$

де R – радіус кривошипа ($R = S_n / 2 = 0,32 / 2 = 0,16$), м;

λ – відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна, ($\lambda = R / l_{ш} = 0,25$), м.

Швидкість поршня – це похідна від шляху за часом. Отже, швидкість поршня дорівнює

$$C_{\varphi} = R \cdot \omega \cdot \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right),$$

де ω – кругова швидкість кривошипа ($\omega = \pi \cdot n / 30 = 104,67$), рад/с.

Прискорення поршня є першою похідною швидкості поршня по часу

$$j_{\varphi} = R \cdot \omega^2 \cdot (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi).$$

На основі наведених формул визначимо зміну шляху, швидкості, прискорення поршня для різних значень кута повороту колінчастого валу двигуна. Результати розрахунку зведені в табл. 3.1.

Графічне представлення переміщення, швидкості і прискорення поршня представлені на рис. 3.1 – 3.3.

					КРБ.142.2227ст.07.03.ПЗ	Лист
						26
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1. Результати кінематичного розрахунку

φ , град	$S_{n\varphi}$, м	C_{φ} , м/с	j_{φ} , м/с ²
0	0	0	2191,02
15	0,0068	5,3362	2072,59
30	0,0264	9,8913	1737,09
45	0,0569	13,2256	1239,43
60	0,0950	15,3228	657,31
75	0,1372	16,4152	74,17
90	0,1800	16,7467	-438,20
105	0,2201	16,4152	-833,16
120	0,2550	15,3228	-1095,51
135	0,2831	13,2256	-1239,43
150	0,3036	9,8913	-1298,88
165	0,3159	5,3362	-1313,60
180	0,3200	0	-1314,61
195	0,3159	-5,3362	-1313,60
210	0,3036	-9,8913	-1298,88
225	0,2831	-13,2256	-1239,43
240	0,2550	-15,3228	-1095,51
255	0,2201	-16,4152	-833,16
270	0,1800	-16,7467	-438,20
285	0,1372	-16,4152	74,17
300	0,0950	-15,3228	657,31
315	0,0569	-13,2256	1239,43
330	0,0264	-9,8913	1737,09
345	0,0068	-5,3362	2072,59
360	0	0	2191,02

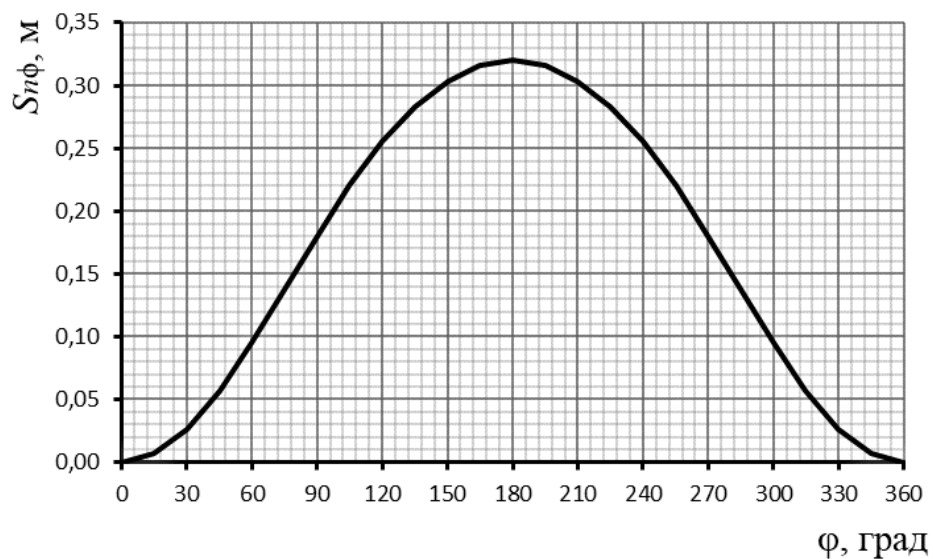


Рис. 3.1. Зміна переміщення поршня

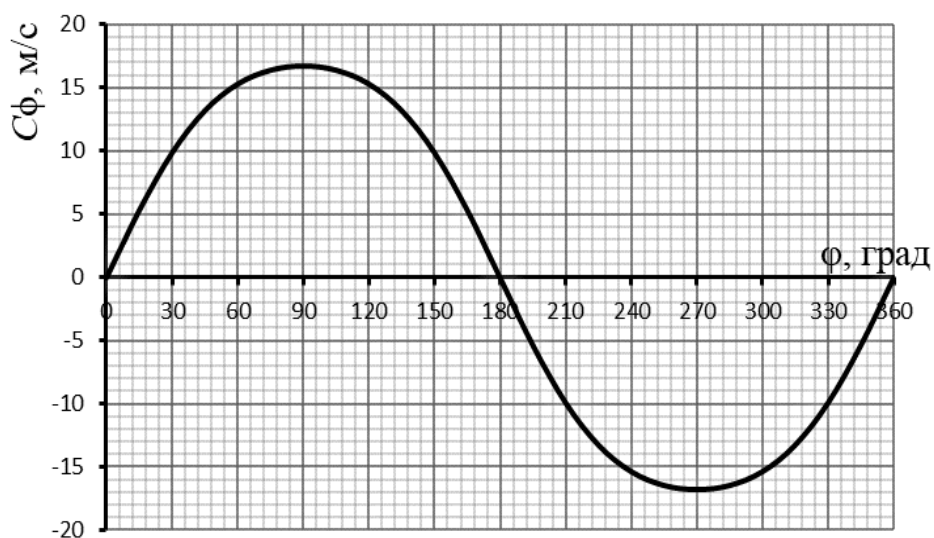


Рис. 3.2. Зміна швидкості поршня

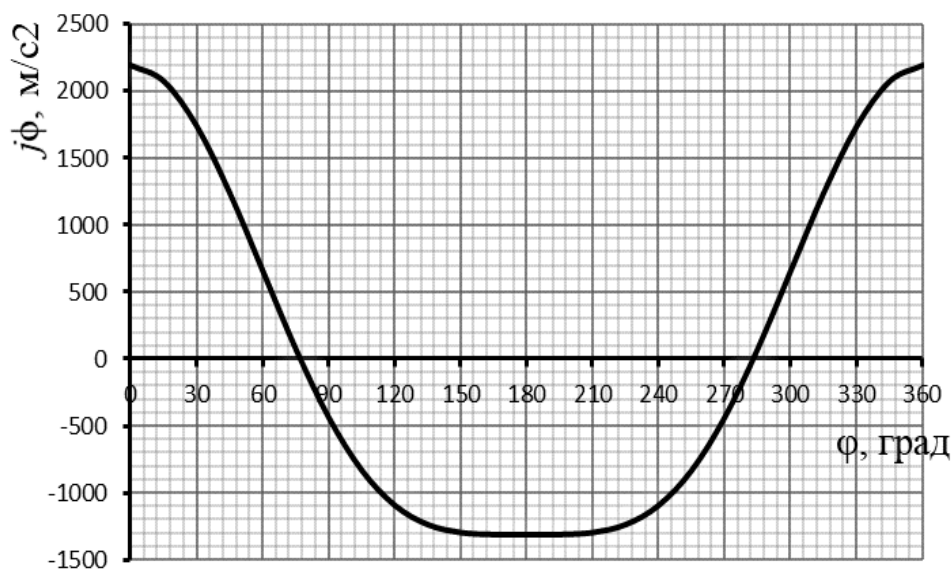


Рис. 3.3. Зміна прискорення поршня

Залежність ходу поршня від кута повороту колінчастого валу необхідна для визначення положення поршня в циліндрі, що важливо для оцінки поточного значення тиску на тактах стиску і розширення.

Значення швидкості поршня необхідно для розрахунку впускної системи. За середньої швидкості поршня визначають швидкість повітряного потоку в каналах впускної системи і втрати тиску в місцевих опорах, що необхідно для оцінки величини тиску свіжого заряду у кінці такту впуску.

Залежність прискорення поршня від кута повороту колінчастого валу необхідна для розрахунку сил інерції від поступально рухомих мас.

3.2 Розрахунок і побудова діаграм динаміки двигуна

При вивченні динамічних явищ у ДВЗ у першу чергу розглядають сили від тиску газів P_r і сили інерції P_j . Запишемо, що сумарна сила, що діє на поршень

$$P = P_r + P_j$$

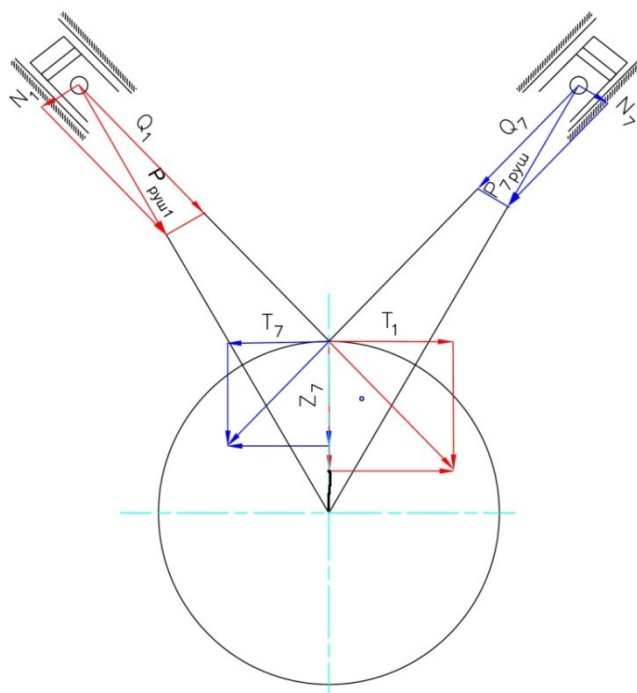


Рис. 3.4. Схема сил, що діють у кривошипно-шатунному механізмі

Припустимо, що сумарна сила P діє вниз на поршень, і лінія дії цієї сили збігається з віссю циліндра. Розкладемо цю силу на дві складові: S , яка діє вздовж осі шатуна, і N , яка діє перпендикулярно до осі циліндра. Бічна сила N притискає поршень до тієї чи іншої стінки циліндра:

$$N = P \cdot \operatorname{tg} \beta$$

Сила S діє по шатуні, чи розтягуючи стискаючи його, і передається на шатунну шийку кривошипа:

$$S = P \cdot (l / \cos \beta).$$

Перенести силу S по лінії її дії і допустивши, що вона прикладена до кривошипа, повторимо операцію розкладання. Направимо першу складову T перпендикулярно радіусу кривошипа, а другу R – по його радіусу.

Тоді тангенціальна складова:

$$T = P \cdot \sin(\varphi + \beta) / \cos \beta$$

відповідно нормальна:

$$R = P \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta.$$

Сила T створює крутний момент двигуна, який через колінчастий вал передається споживачу:

$$M_K = T_r = P_r \cdot \sin(\varphi + \beta) / \cos \beta,$$

У той же час опори двигуна сприймають перекидаючий момент

$$M_{\text{опр.}} = -N \cdot h,$$

де: $h = r \sin(\varphi + \beta) / \sin \beta$

Перекидаючий момент в точності дорівнює крутному моменту зі зворотним знаком:

$$M_{\text{опр.}} = -N \cdot h = -P \tan \beta r \sin(\varphi + \beta) / \sin \beta = -P_r \sin(\varphi + \beta) / \cos \beta = -M_K.$$

В результаті дії на опори двигуна перекидаючого моменту в них розвивається рівний йому і протилежний за знаком реактивний момент.

Напрямку сил і крутного моменту по годинній стрілці прийнято вважати додатніми. Зворотні ним – відмінними.

Для отримання кількісних значень сил, що діють у кривошипно-шатунному механізмі, використовують індикаторну діаграму. З її допомогою визначаємо силу тиску газів у будь-якому положенні кривошипа. Крім того, використовуються аналітичні залежності для визначення сил інерції. Силу інерції, яка діє на поршень, визначаємо на основі рівняння другого закону Ньютона:

$$P_j = -m_n j.$$

Величину j визначаємо з рівняння:

$$j = r\omega^2 \cdot (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi)$$

Як масу m_n оберемо масу всіх деталей, що разом з поршнем утворюють зворотно-поступальний рух. Сюди відносять поршень, кільця, поршневий палець, деталі, що охороняють поршневий палець від осьових переміщень. Маса цих деталей зосереджена на осі поршневого пальця.

Шатун здійснює складний плоский паралельний рух. Для спрощення аналізу деталі групи шатуна замінюють сукупністю мас, динамічно еквівалентних їм. Зазвичай, кількість мас, що заміщають систему, беруть рівною двом. Приводячи їх до осей поршневого пальця і шатунної шийки, вважають, що перша маса рухається разом з поршнем, а друга – разом з кривошипом.

Аналіз виконаних конструкцій ДВЗ показує, що на частку маси, що відноситься до вісі поршневого пальця, приходить 0,25...0,33 загальної маси деталей групи шатуна, а 0,75...0,67 приходить на частку маси, що робить обертальний рух разом із кривошипом. Таким чином, сила інерції деталей, що рухаються разом з поршнем:

$$P_j = - m_n r \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi),$$

де m_n – маса деталей групи поршня і частина маси деталей групи шатуна, віднесена до осі поршневого пальця.

Задача даного розділу є визначення сил, що діють у КШМ, а також побудова графіків зміни цих сил по куту повороту колінчастого валу.

Дані для розрахунку та побудови діаграм динаміки.

Кривошипно-шатунне відношення λ0,25.

Маса деталей, що рухаються зворотно-поступально m_n80,0 кг

Розрахунок динаміки зроблений на ПК в середовищі *Microsoft Office Excel*. Результати розрахунку представлені в табл. 3.2.

За даними табл. 3.2 були побудовані діаграми P_r , P_j , P_{dv} , N , T , Z , які представлені на рис. 3.5, 3.6.

Таблиця 3.2. Результати динамічного розрахунку

Φ	P_r	P_j	P_{dv}	N	Z	T
0	0,4080	-3,3031	-2,8951	0,0000	-2,8951	0,0000
15	0,4080	-3,1245	-2,7165	-0,1761	-2,5784	-0,8732
30	0,4080	-2,6188	-2,2108	-0,2785	-1,7753	-1,3466
45	0,4080	-1,8685	-1,4605	-0,2623	-0,8473	-1,2182
60	0,4080	-0,9909	-0,5829	-0,1293	-0,1795	-0,5695
75	0,4080	-0,1118	0,2962	0,0737	0,0055	0,3052
90	0,4080	0,6606	1,0686	0,2759	-0,2759	1,0686
105	0,4080	1,2560	1,6640	0,4141	-0,8307	1,5002
120	0,4080	1,6515	2,0595	0,4567	-1,4253	1,5552
135	0,4080	1,8685	2,2765	0,4089	-1,8989	1,3206
150	0,4080	1,9581	2,3661	0,2981	-2,1982	0,9249
165	0,4080	1,9803	2,3883	0,1549	-2,3470	0,4686
180	0,4080	1,9819	2,3899	0,0000	-2,3899	0,0000
195	0,4025	1,9803	2,3828	-0,1545	-2,3416	-0,4675
210	0,4232	1,9581	2,3814	-0,3000	-2,2123	-0,9309
225	0,4619	1,8685	2,3304	-0,4186	-1,9438	-1,3519
240	0,5263	1,6515	2,1778	-0,4830	-1,5072	-1,6446
255	0,5310	1,2560	1,7870	-0,4447	-0,8921	-1,6110
270	0,6046	0,6606	1,2652	-0,3267	-0,3267	-1,2652
285	0,8060	-0,1118	0,6942	-0,1728	0,0128	-0,7153
300	1,2665	-0,9909	0,2756	-0,0611	0,0849	-0,2692
315	2,3000	-1,8685	0,4315	-0,0775	0,2503	-0,3599
330	4,6492	-2,6188	2,0305	-0,2558	1,6305	-1,2368
345	9,8255	-3,1245	6,7010	-0,4345	6,3602	-2,1540
360	18,0270	-3,2830	14,7440	-0,3213	14,6599	-1,6051
375	18,5270	-3,1245	15,4025	0,9987	14,6191	4,9511
390	13,5401	-2,6188	10,9213	1,3760	8,7702	6,6523
405	7,5107	-1,8685	5,6422	1,0134	3,2731	4,7062
420	4,6171	-0,9909	3,6261	0,8042	1,1166	3,5424
435	3,1434	-0,1118	3,0316	0,7544	0,0559	3,1236
450	2,3325	0,6606	2,9931	0,7728	-0,7728	2,9931
465	1,8571	1,2560	3,1131	0,7747	-1,5540	2,8066
480	1,5665	1,6515	3,2181	0,7137	-2,2271	2,4301
495	1,3862	1,8685	3,2547	0,5846	-2,7148	1,8881
510	1,2770	1,9581	3,2352	0,4076	-3,0055	1,2646
525	1,2183	1,9803	3,1987	0,2074	-3,1434	0,6275
540	1,1998	1,9819	3,1817	0,0000	-3,1817	0,0000
555	0,3910	1,9803	2,3713	-0,1538	-2,3303	-0,4652
570	0,3910	1,9581	2,3491	-0,2960	-2,1824	-0,9183
585	0,3910	1,8685	2,2595	-0,4058	-1,8847	-1,3108
600	0,3910	1,6515	2,0425	-0,4530	-1,4136	-1,5424
615	0,3910	1,2560	1,6470	-0,4099	-0,8222	-1,4848
630	0,3910	0,6606	1,0516	-0,2715	-0,2715	-1,0516
645	0,3910	-0,1118	0,2792	-0,0695	0,0052	-0,2877
660	0,3910	-0,9909	-0,5999	0,1330	-0,1847	0,5861
675	0,3910	-1,8685	-1,4775	0,2654	-0,8571	1,2324

690	0,3910	-2,6188	-2,2278	0,2807	-1,7890	1,3569
705	0,3910	-3,1245	-2,7335	0,1772	-2,5945	0,8787
720	0,3910	-3,3031	-2,9121	0,0000	-2,9121	0,0000

					КРБ.142.2227ст.07.03.ПЗ	Лист
						33
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

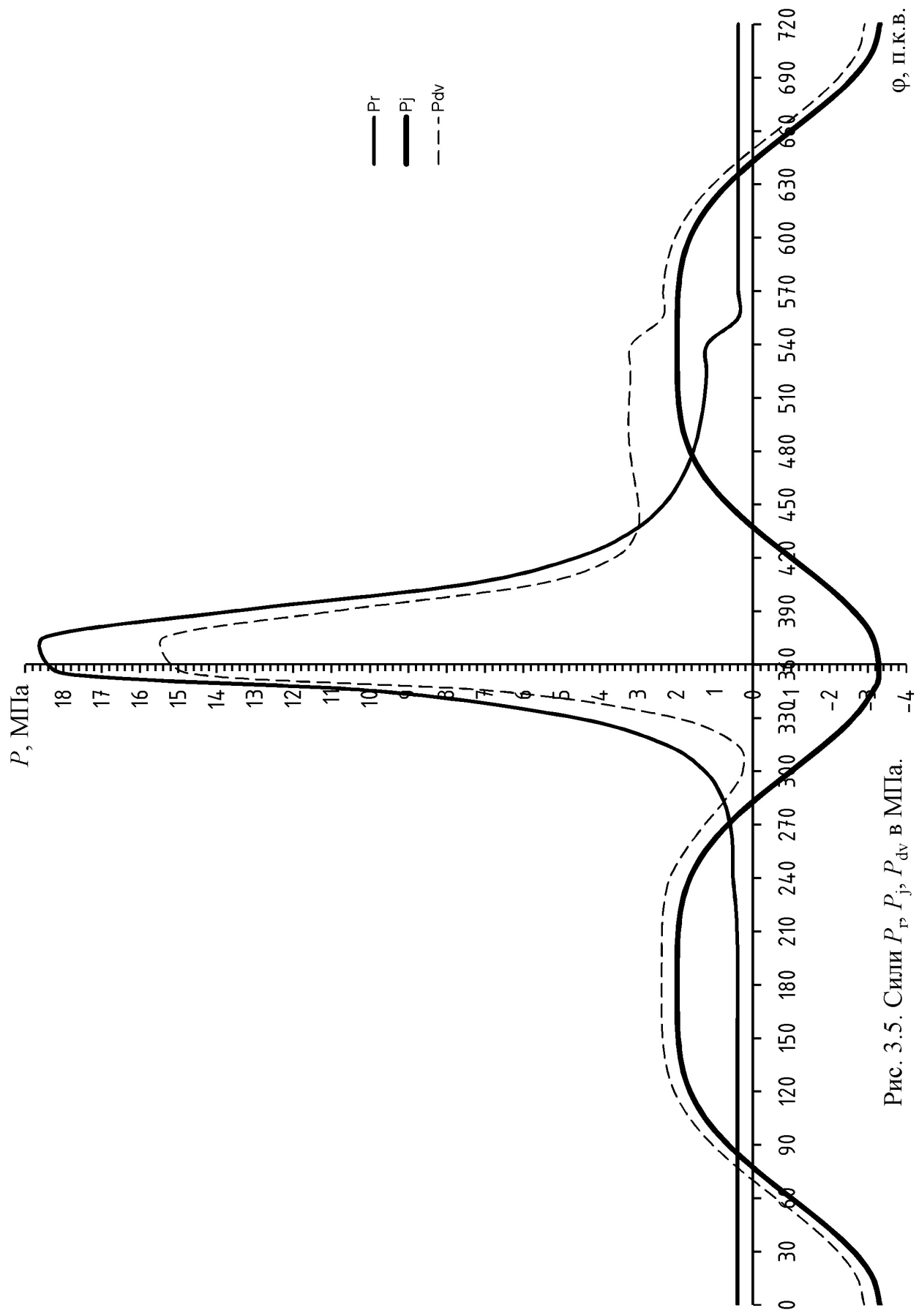


Рис. 3.5. Сили P_r , P_j , P_{dv} в МПа.

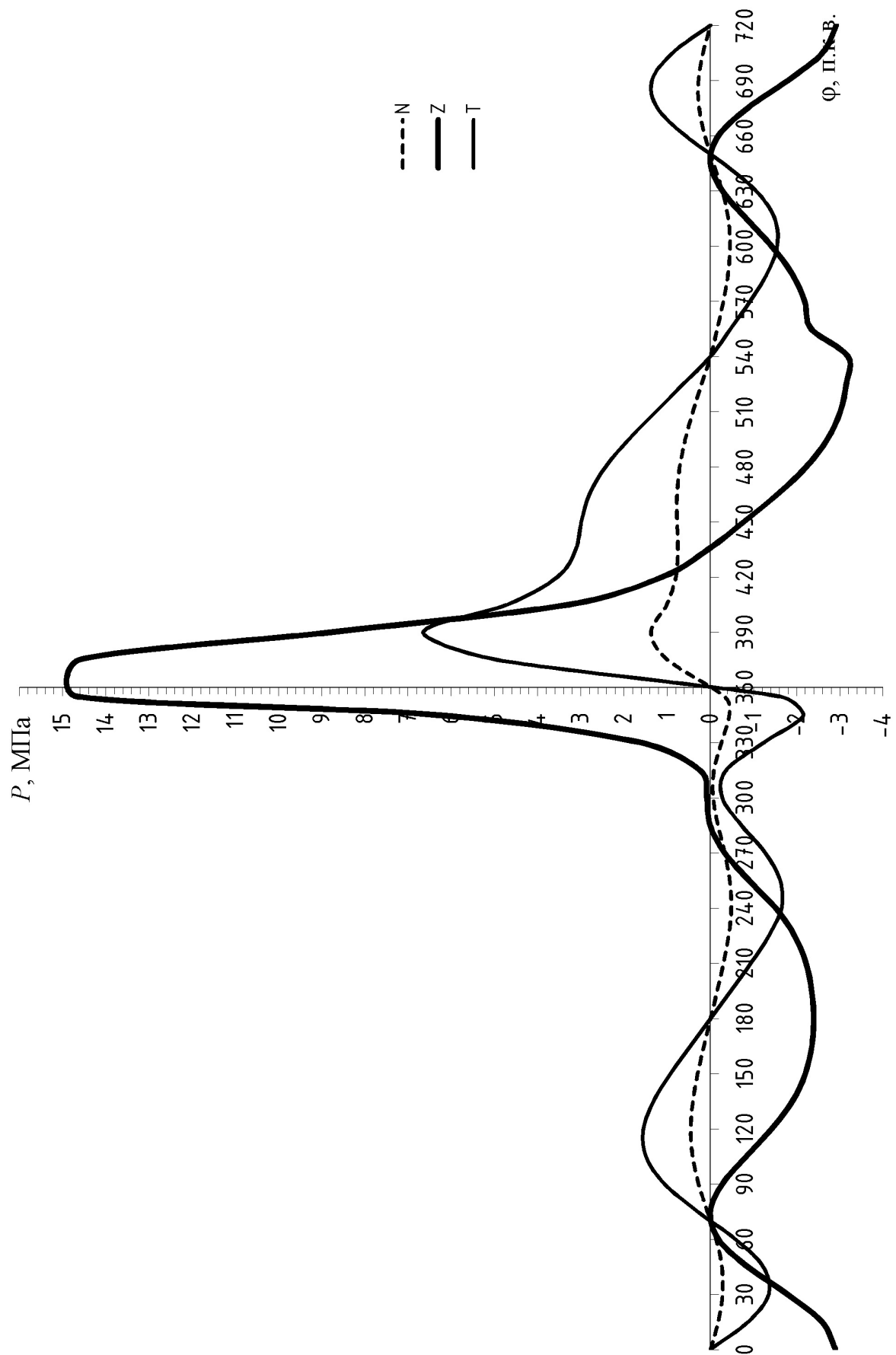


Рис. 3.6. Силы N, Z, T в МПа

3.3 Висновок по розділу

Аналіз результатів кінематичного розрахунку і динаміки КШМ дозволяє судити про неврівноваженість моменту другого порядку для двигуна Wartsila типу 12V26 (12ЧН 26/32). Для врівноваження цього моменту необхідно штучне введення додаткових рухомих мас. Врівноваження досягають противагами, що встановлюються на щоках колінчатого валу.

					КРБ.142.2227ст.07.03.ПЗ	Лист
						36
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Розділ 4

Розрахунок та конструювання відцентрового насосу

4.1 Вступ

Згідно з завданням проектується насос системи охолодження двигуна типу 12ЧН 26/32. Цілю є розрахунок теоретичних профілів основних елементів проточної частини насосу, до яких належить колесо та спіральний відвідний канал. На підставі цих елементів у проекті виконано розріз насосу з дотриманням розмірів та особливостей конструкції.

Всі розміри насосу знаходилися через використання наданої кафедрою комп'ютерної програми розрахунку ступеня насосу, яка реалізована в середовищі *Microsoft® Excel*. Всі розрахунки, з урахуванням машинізації обчислень, робилися до отримання оптимальних параметрів насосу, що проектується.

Таким чином, насос створений для забезпечення усіх заданих основних параметрів та на підставі конструкції, що придатна для його реалізації під задану функцію. Він може без обмежень працювати в системі охолодження.

4.2 Визначення початкових даних для розрахунків

Розрахунок розходу води виконуємо згідно з рівнянням теплового балансу

$$Q_w = G_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_1 - T_2), \text{ кВт},$$

З нього

$$G_w = \frac{Q_w \cdot 10^3}{C_{p_w} \cdot \Delta T} \text{ кг/с},$$

де Q_w – теплота, яка відводиться від двигуна охолоджуючою водою, кВт;

$C_{p_w} = 4190 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ – теплоємність води;

$\Delta T = T_2 - T_1$ – температурний перепад води на вході та виході з дизеля, К.

Перепад температур води на двигуні обирається в межах 10....15 К з урахуванням статистичних даних з розходів води по двигунах наближеної потужності та класу.

Кількість теплоти, яка надходить у воду (теплова потужність потоку теплоти, яка надходить у воду)

$$Q_w = \frac{0,98 \cdot Q_\Sigma - Q_\Gamma - N_e}{1,1}, \text{ кВт},$$

де Q_Σ – теплота згоряння введена у циліндр від згоряння палива, кВт;

Q_Γ – теплота випускних газів, кВт;

N_e – тефективна потужність двигуна, кВт;

Визначимо загальну кількість теплоти (теплову потужність циклу), що виділяється у циліндрі

$$Q_\Sigma = \frac{N_e}{\eta_e} = \frac{4080}{0,43} = 9488,4 \text{ кВт}.$$

Визначимо кількість теплоти, яка відходить з відхідними газами (теплову потужність потоку відхідних газів)

$$Q_\Gamma = G_t \cdot c_{p_\Gamma} \cdot (T_{3T} - T_o), \text{ Вт},$$

де G_t – витрата газів через турбіну, кг/с;

c_{p_Γ} – ізобарна теплоємність газів, Дж/(кг·К);

T_{3T} – температура газів за турбіною, К.

Ізобарна теплоємність газів обчислюється згідно з рівнянням Майера

$$c_{p_\Gamma} = \frac{k_t}{k_t - 1} \cdot R_t, \text{ Дж/(кг·К)},$$

де k_t – показник адіабати розширення газу в турбіні;

R_t – універсальна газова стала для відпрацьованих газів, Дж/(кг·К).

$$c_{p_\Gamma} = \frac{1,377}{1,377 - 1} \cdot 287,677 = 1050,7 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Температура газів за турбіною обчислюється на підставі виразу ККД турбіни

$$T_{3T} = T_t - \eta_{t.ad} \cdot (T_t - T_{3T}^{ad}), \text{ К},$$

де T_t – температура газу перед турбіною, К

$\eta_{t,ад}$ – адіабатний ККД турбіни.

$$T_{3T}^{ад} = T_t \cdot \left(\frac{1}{0,91 \cdot \frac{P_a}{P_o}} \right)^{\frac{k_t-1}{k_t}}, \text{ К}$$

Після підстановки

$$T_{3T}^{ад} = 765,816 \cdot \left(\frac{1}{0,91 \cdot \frac{0,396}{0,103}} \right)^{\frac{1,377-1}{1,377}} = 543,5 \text{ К.}$$

Тож

$$T_{3,T} = 765,816 - 0,78 \cdot (765,816 - 543,5) = 592,4 \text{ К.}$$

Таким чином кількість теплоти, яка відходить з відхідними газами

$$Q_T = 9,578 \cdot 1050,7 \cdot (592,4 - 313) = 2811,8 \text{ кВт}$$

Після підстановки

$$Q_W = \frac{0,98 \cdot 9488,4 - 2811,8 - 4080}{1,1} = 2188 \text{ кВт.}$$

Якщо задати перепад температури охолоджуючої рідини на виході та на вході в двигун на рівні 9 К, то згідно рівняння теплового балансу можна визначити продуктивність відцентрового насосу, який відведе тепло від двигуна та забезпечить заданий перепад температур води.

$$G = \frac{2188 \cdot 10^3}{4190 \cdot 9} = 58,0 \text{ кг/с, або } Q \approx 208,8 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Зробимо припущення, що необхідну витрату охолоджуючої рідини в системі охолодження будуть забезпечувати два однакові насоси, кожен з яких має витрату 100 м³/год.

Приймемо, що питома робота насоса повинна складати $L = 450$ Дж/кг.

При заданному набір вихідних даних визначаємо частоту обертання ротора n (кутової швидкості його обертання ω). Для цього спільно вирішуємо два рівняння: критичного кавітаційного запасу енергії насосу $\Delta l_{кр}$

$$\Delta l_{\text{кр}} = L(1,54 \frac{n_s}{C})^{\frac{4}{3}},$$

та рівняння для обчислення кутової швидкості ротора насоса

$$\omega = \frac{C \Delta l_{\text{кр}}^{\frac{3}{4}}}{298 \sqrt{Q}}.$$

Значення n_s спочатку визначаємо заздалегідь, а потім коригуємо відповідно до рекомендацій. Вибір і подальша корекція n_s визначає частоту обертання ротора. Вибір і можлива корекція параметра C вихідних даних впливає тільки на $\Delta l_{\text{кр}}$ і, відповідно, на висоту всмоктування насоса. Параметри n_s і ω зі зміною C залишаються постійними.

Тож приймаємо $n_s = 80$, а $C = 1200$.

Тоді

$$\Delta l_{\text{кр}} = 450 \cdot (1,54 \cdot \frac{80}{1200})^{\frac{4}{3}} = 21,6 \text{ Дж/кг}.$$

При відомих $\Delta l_{\text{кр}}$, Q , C обчислюємо частоту обертів ротору насоса ω

$$\omega = \frac{C \Delta l_{\text{кр}}^{\frac{3}{4}}}{298 \sqrt{Q}}, \quad \omega = \frac{1200 \cdot 21,6^{\frac{3}{4}}}{298 \cdot \sqrt{0,028}} = 242,4 \text{ с}^{-1},$$

де $Q = 0,028 \text{ м}^3/\text{с} = 100/3600$.

Частота обертання ротору

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi}, \quad n = \frac{30 \cdot 242,4}{3,14} = 2315,5 \text{ об/хв}.$$

Відкоригуємо значення n_s так, щоб частота обертання дорівнювала би $k \times 500$, де $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$. Для цього використовуємо процедуру «Підбір параметру».

Таким чином, для насоса остаточно обчислені наступні параметри:

$n_s = 86,3$; $C = 1200$; $\Delta l_{\text{кр}} = 23,96 \text{ Дж/кг}$; $\omega = 261,7 \text{ с}^{-1}$; $n = 2500 \text{ об/хв}$.

4.3 Визначення основних розмірів робочого колеса

Розрахунок робочого колеса насоса можна умовно розділити на дві частини: визначення вхідних і вихідних розмірів колеса.

					КРБ.142.2227ст.07.04.ПЗ	Лист
						39
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Вхідні параметри:

D_0 – діаметр входу в робоче колесо;

D_1 – діаметр середньої вихідної кромки лопаті робочого колеса;

Δ_1 – товщина лопаті на вході;

β_1 – кут установки лопаті на вході.

Вихідні параметри:

D_2 – зовнішній діаметр робочого колеса;

Δ_2 – товщина лопаті на виході з колеса;

β_2 – кут установки лопаті на виході.

Вищезазначені параметри визначаються з використанням рівнянь витрати рідини та основного рівняння лопатевих насосів (рівняння Ейлера).

Для визначення основних розмірів робочого колеса маємо наступні значення Q , L , ω , C , n_s .

Розрахунок слід розпочинати з визначення ККД насоса

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_o \cdot \eta_{м.в.н} \cdot \eta_{с.п},$$

де η_r – гідравлічний ККД. Значення η_r сучасних насосів залежить від n_s і дорівнює 0,85...0,95;

η_o – об'ємний ККД. Середнє значення $\eta_o = 0,9...0,98$;

$\eta_{м.в.н}$ – коефіцієнт, який враховує тертя дисків колеса о воду;

$\eta_{с.п}$ – коефіцієнт, який враховує втрати в сальниках та підшипниках.

Гідравлічний ККД знаходиться по $D_{1пр}$ спочатку в першому наближенні, а потім уточнюється з врахуванням зміни діаметрів.

$$\eta_r = 1 - \frac{0,42}{(\lg D_{1пр} - 0,172)^2},$$

де $D_{1пр} = k_{D_1} \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot Q_1}{30 \cdot \omega}}$ – приведений (середньоквадратичний) діаметр на вході в колесо в першому наближенні, мм.

Q_1 – розхід рідини через одне колесо, м³/с;

$k_{D_1} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_{Co}}}$ – коефіцієнт вхідного діаметру;

					КРБ.142.2227ст.07.04.ПЗ	Лист
						40
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

де $k_{Co} = 0,057$ – коефіцієнт, який залежить від C ; приймаємо з рис. 4.1.

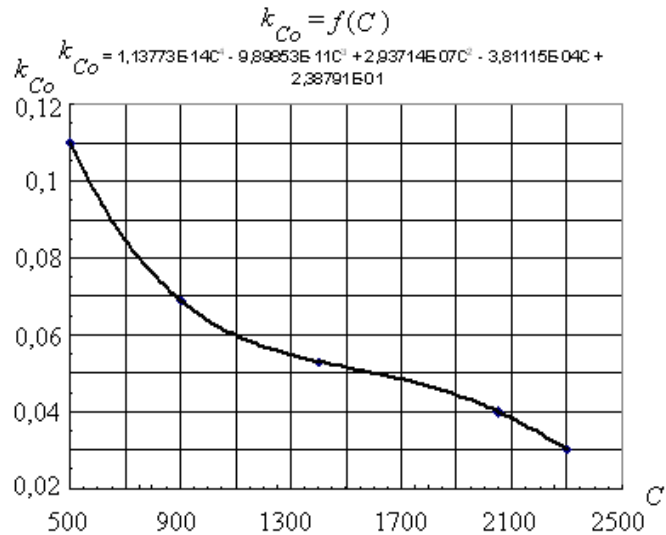


Рис. 4.1. Графік залежності $k_{Co} = f(C)$

Після підстановки

$$k_{D_1} = \frac{2}{\sqrt{3,14}} \cdot \frac{1}{\sqrt{0,057}} = 4,73.$$

Розхід рідини через одне колесо $Q_1 = \frac{Q}{z_n},$

де z_n – кількість потоків (коліс) в насосі, шт.; приймаємо $z_n = 1$.

Після підстановки $Q_1 = \frac{0,028}{1} = 0,028 \text{ м}^3/\text{с}.$

Таким чином

$$D_{\text{лм}} = 4,73 \cdot \sqrt[3]{\frac{3,14 \cdot 0,028}{30 \cdot 261,7}} = 0,1056 \text{ м}.$$

Приведений діаметр в другому наближенні обчислюється після остаточного визначення $d_{\text{ст}}$ і D_1 за формулою

$$D_{\text{лпр}}^{**} = \sqrt{0,5 \cdot (d_{\text{ст}}^2 + D_1^2)},$$

де D_1 – діаметр середини вхідної кромки лопаті робочого колеса, м.

$d_{\text{ст}} = (1,2 \dots 1,8) \cdot d_{\text{в}}$ – діаметр маточини робочого колеса, м;

де $d_{\text{в}}$ – діаметр вала ротора насосу, м.

Зазвичай діаметр вала ротору насоса визначають при конструктивній проробці схеми насосу з врахуванням критичної частоти обертів. Орієнтовно

$d_{\text{вс}}$ визначаємо спрощеним розрахунком на скручування з заздалегідь заниженими допустимими напруженнями

$$d_{\text{в}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_{\text{к}}}{\pi \cdot [\tau_{\text{кр}}]}},$$

де $M_{\text{к}}$ – крутний момент на валу ротора насоса, Н·м;

$[\tau_{\text{кр}}] = (300 \dots 500) \cdot 10^5$ Па – допустиме напруження на скручування для вала круглого перетину виготовленого зі сталі. Приймаємо $[\tau_{\text{кр}}] = 300 \cdot 10^5$ Па.

Розрахунок ступеня насоса вимагає вдаватися до ряду наближень, ітерацій. Завдяки машинним розрахункам необхідна кількість таких ітерацій не має великого значення. Надалі в роботі перші наближення розрахункових параметрів не приводяться, а вказуються лише їх остаточні значення.

Крутний момент на валу ротора насоса обчислюється за формулою

$$M_{\text{к}} = \frac{N_{\text{в}}}{\omega},$$

де $N_{\text{в}}$ – потужність на привід вала ротора насоса, Вт.

$$N_{\text{в}} = \frac{\rho \cdot Q \cdot L}{\eta}, \quad N_{\text{в}} = \frac{1000 \cdot 0,028 \cdot 450}{0,707} = 17695 \text{ Вт.}$$

Після підстановки

$$M_{\text{к}} = \frac{17695}{261,7} = 67,62 \text{ Н·м.}$$

Таким чином

$$d_{\text{в}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 67,62}{3,14 \cdot 300 \cdot 10^5}} = 0,0226 \text{ м.}$$

Діаметр маточини робочого колеса

$$d_{\text{ст}} = 1,2 \cdot 0,0226 \approx 0,027 \text{ м.}$$

Діаметр середини вхідної кромки лопаті робочого колеса для насосів з $n_{\text{s}} = 80 \dots 120$ згідно з [2] знаходиться у межах $D_1 = (0,9 \dots 1,0) \cdot D_0$,

де D_0 – діаметр входу в робоче колесо, м.

Діаметр входу в робоче колесо обчислюється за формулою:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{р}}}{\pi \cdot c_0} + d_{\text{ст}}^2},$$

					КРБ.142.2227ст.07.04.ПЗ	Лист
						42
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

де Q_p – розрахунковий розхід через робоче колесо насоса з врахуванням об’ємних втрат рідини через ущільнення, м³/с;

c_o – швидкість рідини в кільцевому прийомному отворі робочого колеса, м/с. Ця швидкість повинна знаходитися в межах 2...6 м/с.

Розхід рідини через робоче колесо насоса з урахуванням додаткових паразитних течій обчислюється за формулою

$$Q_p = \frac{Q_1}{\eta_o}, \quad Q_p = \frac{0,028}{0,967} = 0,0287 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Швидкість рідини в кільцевому прийомному отворі робочого колеса згідно з теорією подібності

$$c_o = k_{c_o} \cdot \left(\frac{30}{\pi}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{Q_1 \cdot \omega^2}, \quad c_o = 0,057 \cdot \left(\frac{30}{3,14}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{0,028 \cdot 261,7^2} = 3,19 \text{ м/с}.$$

Згідно з такою швидкістю

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0287}{3,14 \cdot 3,19} + 0,027^2} = 0,1105 \text{ м}.$$

Приймаємо $D_0 = 0,1105$ м і $D_1 = 0,10$ м.

Тож приведений діаметр в другому наближенні

$$D_{1\text{пр}}^{**} = \sqrt{0,5 \cdot (0,027^2 + 0,10^2)} = 0,0733 \text{ м}.$$

Значення гідравлічного ККД

$$\eta_r = 1 - \frac{0,42}{(\lg 73,3 - 0,172)^2} = 0,854.$$

Об’ємний ККД обчислюється за формулою

$$\eta_o = \frac{1}{1 + \frac{0,68}{\sqrt[3]{n_s^2}}}, \quad \eta_o = \frac{1}{1 + \frac{0,68}{\sqrt[3]{86,3^2}}} = 0,967.$$

Коефіцієнт, який враховує тертя дисків колеса об воду, розраховується за формулою

$$\eta_{\text{мвн}} = \frac{1}{1 + \frac{820}{n_s^2}}, \quad \eta_{\text{мвн}} = \frac{1}{1 + \frac{820}{86,3^2}} = 0,901.$$

Коефіцієнт, який враховує втрати в сальниках та підшипниках, лежить в межах 0,95...0,98 [3]; приймаємо $\eta_{\text{сп}} = 0,95$.

Результуюче значення ККД насоса дорівнюватиме

$$\eta = 0,854 \cdot 0,967 \cdot 0,901 \cdot 0,95 = 0,707.$$

Кут установки лопаті на вході визначається за формулою $\beta_1 = \beta_{10} + \delta$, де β_{10} – кут безударного входу, град; δ – кут атаки, град.

Значення кута δ знаходиться в межах від 0 до 15° [1]. Враховуючи особливості застосування насосу, що проектується, в нашому випадку доцільно прийняти δ як величину, яка доповнює кут β_1 до цілого числа градусів. Введення кута атаки міняє конфігурацію вхідного трикутника, перетворюючи його в косокутний трикутник.

Кут безударного входу визначається за формулою

$$\beta_{10} = \arctg \frac{c_{1m}}{u_1},$$

де c_{1m} – меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини на вході в робоче колесо, м/с;

$$u_1 = \frac{\omega \cdot D_1}{2} \text{ – колова швидкість потоку рідини на діаметрі } D_1, \text{ м/с.}$$

$$u_1 = \frac{261,7 \cdot 0,1}{2} = 13,09 \text{ м/с.}$$

Меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини на вході обчислюється як

$$c_{1m} = c'_{1m} \cdot k_1,$$

де $c'_{1m} = c_o = 3,19 \text{ м/с}$ – швидкість рідини в районі повороту протока в робочому колесі;

$$k_1 = \frac{1}{1 - \frac{z \cdot \Delta S_1}{\pi \cdot D_1}} \text{ – коефіцієнт захаращення каналу колеса лопатями на вході,}$$

де $\Delta S_1 = \frac{\Delta_1}{\sin \beta_1}$ – перетин лопаті на вході, нормальний до радіуса, м (рис. 1.);

Δ_1 – товщина лопаті на вході, м. Зазвичай $\Delta_1 = 1 \dots 4$ мм [1], обирається за умови жорсткості та стійкості матеріалу, але так, щоб забезпечити умову $1,1 \leq k_1 \leq 1,25$; приймаємо $\Delta_1 = 1$ мм.

z – число лопатей робочого колеса насосу.

Оптимальна кількість лопатей робочого колеса обчислюється за формулою

$$z = k \cdot \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \cdot \sin \frac{\beta_1 + \beta_2}{2},$$

де $k = 6,5$ для литих коліс з відносно великою товщиною лопаті і $k = 8$ для робочих коліс з лопатями з листового матеріалу; приймаємо $k = 6,5$.

Попереднє значення зовнішнього діаметру робочого колеса визначається згідно з теорією подібності за формулою

$$D_2^* = \frac{D_0}{0,002 \cdot n_s + 0,276}, \quad D_2^* = \frac{0,1105}{0,002 \cdot 86,3 + 0,276} = 0,2464 \text{ м}$$

Виходячи із забезпечення мінімальних втрат, попереднє значення величини кута β_2 повинно бути обране з табл. 4.1 (орієнтовно).

Таблиця 4.1. Залежність β_2 від n_s

n_s	від 40 до 100	до 100	до 200
β_2 , град	30...36	25...30	20...22

Приймаємо в першому наближенні $\beta_2 = 31^\circ$

$$z = 6,5 \cdot \frac{0,2128 + 0,10}{0,2128 - 0,10} \cdot \sin \frac{16 + 31}{2} = 7,19$$

Розраховане значення кількості лопатей робочого колеса є орієнтовним і може бути зміненим в певному діапазоні значень. Тож для відцентрових насосів загального призначення кількість лопатей робочого колеса лежить в межах 6...12. Для отримання більш стабільної характеристики більш доцільно мати $z = 6 \dots 8$ [2]; приймаємо $z = 12$.

Після підстановки

$$\Delta S_1 = \frac{0,001}{\sin 16^\circ} = 0,0037 \text{ м.}$$

Таким чином

$$k_1 = \frac{1}{1 - \frac{12 \cdot 0,0037}{3,14 \cdot 0,10}} = 1,165.$$

Значення коефіцієнту захаращення k_1 повинно знаходитися в межах 1,1...1,25. Умова виконується. Таким чином

$$c_{1m} = 3,19 \cdot 1,165 = 3,72 \text{ м/с.}$$

Тож

$$\beta_{10} = \arctg \frac{3,72}{13,09} = 15,87^\circ.$$

Значення кута атаки обираємо таким, щоб доповнити кут β_1 до цілого числа градусів. Приймаємо $\delta = 0,13^\circ$

$$\beta_1 = 15,87 + 0,13 = 16^\circ.$$

Зовнішній діаметр робочого колеса у другому наближенні визначається за формулою:

$$D_2 = \frac{2}{\omega} \cdot \left[\frac{c_{2m}}{2 \cdot \tg \beta_2} + \sqrt{\left(\frac{c_{2m}}{2 \cdot \tg \beta_2} \right)^2 + L_\infty} \right],$$

де L_∞ – питома робота колеса з нескінченним числом лопатей, Дж/кг.

$$L_\infty = (1 + p) \cdot L_T,$$

де L_T – теоретична питома робота колеса, Дж/кг.

$$L_T = \frac{L}{\eta_r}, \quad L_T = \frac{450}{0,854} = 526,94 \text{ Дж/кг.}$$

$$p = 2 \cdot \frac{\psi}{z} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2} - \text{поправка на скінчену кількість лопатей робочого коле-}$$

са. Зазвичай лежить в межах 0,2...0,4 [1],

де $\psi = k_3 + 0,6 \cdot \sin \beta_2$ – коефіцієнт, яким оцінюється форма лопаті і якість її поверхні литих робочих коліс.

k_3 – коефіцієнт який лежить в межах 0,55...0,65 [1]; приймаємо $k_3 = 0,6$.

Тож

$$\psi = 0,6 + 0,6 \cdot \sin 31^\circ = 0,910.$$

Тоді

					КРБ.142.2227ст.07.04.ПЗ	Лист
						46
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

$$p = 2 \cdot \frac{0,910}{12} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{0,10}{0,2128} \right)^2} = 0,1947.$$

Після підстановки

$$L_{\infty} = (1 + 0,1947) \cdot 526,94 = 629,54 \text{ Дж/кг.}$$

Тож зовнішній діаметр робочого колеса у другому наближенні

$$D_2 = \frac{2}{261,7} \cdot \left[\frac{3,2}{2 \cdot \operatorname{tg} 31^\circ} + \sqrt{\left(\frac{3,2}{2 \cdot \operatorname{tg} 31^\circ} \right)^2 + 629,54} \right] = 0,2128 \text{ м.}$$

Ширина маточини робочого колеса B_k (рис. 1) визначається з співвідношення $B_k = (0,2 \dots 0,4) \cdot D_2$,

$$B_k = 0,21 \cdot 0,2128 = 0,044 \text{ м.}$$

Відносні швидкості потоку рідини при вході на лопать робочого колеса обчислюється за формулами

$$w_1 = \frac{c_{1m}}{\sin \beta_1}, \quad w_1 = \frac{3,72}{\sin 16^\circ} = 13,51 \text{ м/с;}$$

$$w_{10} = \frac{c_{1m}}{\sin \beta_{10}}, \quad w_{10} = \frac{3,72}{\sin 15,87^\circ} = 13,61 \text{ м/с.}$$

Після визначення необхідних швидкостей потоку рідини, будуємо трикутники швидкостей на вході в робоче колесо насосу.

Колова швидкість потоку рідини на діаметрі D_2 визначається як

$$u_2 = \frac{\omega \cdot D_2}{2}, \quad u_2 = \frac{261,7 \cdot 0,2128}{2} = 27,85 \text{ м/с.}$$

Меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини на виході з робочого колеса визначається з співвідношення

$$c_{2m} = (0,75 \dots 1,1) \cdot c_{1m}, \quad c_{2m} = 0,86 \cdot 3,72 = 3,2 \text{ м/с.}$$

Визначення меридіанної складової абсолютної швидкості потоку рідини на виході з робочого колеса з врахуванням коефіцієнта захаращення каналу колеса лопатями

$$c'_{2m} = \frac{c_{2m}}{k_2},$$

де $k_2 = \frac{1}{1 - \frac{z \cdot \Delta S_2}{\pi \cdot D_2}}$ – коефіцієнт захаращення каналу колеса лопатями.

$\Delta S_2 = \frac{\Delta_2}{\sin \beta_2}$ – перетин лопаті на виході, нормальний до радіуса, м (рис. 1).

де $\Delta_2 = 1 \dots 3$ мм – товщина лопаті на виході, м; приймаємо $\Delta_2 = 1$ мм.

Після підстановки

$$\Delta S_2 = \frac{0,001}{\sin 31^\circ} = 0,002 \text{ м.}$$

Тож

$$k_2 = \frac{1}{1 - \frac{12 \cdot 0,002}{3,14 \cdot 0,2128}} = 1,040.$$

Тоді

$$c'_{2m} = \frac{3,2}{1,040} = 3,08 \text{ м/с.}$$

Проекція абсолютної швидкості потоку рідини на окружну на виході з робочого колеса при скінченному числі лопатей визначається за формулою

$$c_{2u} = \frac{526,94}{27,85} = 18,93 \text{ м/с.}$$

Визначення проекції абсолютної швидкості потоку рідини на окружну на виході з робочого колеса при нескінченному числі лопатей

$$c_{2u\infty} = \frac{L_T \cdot (1 + p)}{u_2}, \quad c_{2u\infty} = \frac{526,94 \cdot (1 + 0,1947)}{27,85} = 22,61 \text{ м/с.}$$

Відносна швидкість потоку рідини на виході з робочого колеса обчислюється за формулою

$$w_2 = \sqrt{c_{2m}^2 + (u_2 - c_{2u})^2}, \quad w_2 = \sqrt{3,2^2 + (27,85 - 18,93)^2} = 9,48 \text{ м/с.}$$

Оптимальне співвідношення відносних швидкостей потоку рідини в робочому колесі зі скінченим числом лопатей $(w_1/w_2)_{\text{opt}}$ знаходиться з графіка (рис. 4.2) або з виразу

$$(w_1/w_2)_{\text{opt}} = 3,166 \cdot 10^{-11} \cdot n_s^6 - 1,812 \cdot 10^{-08} \cdot n_s^6 + 4,228 \cdot 10^{-06} \cdot n_s^4 - 5,150 \cdot 10^{-04} \cdot n_s^3 + 3,464 \cdot 10^{-02} \cdot n_s^2 + 1,231 \cdot n_s + 19,82$$

Згідно з графіком оптимальне співвідношення відносних швидкостей буде дорівнювати 1,424.

Дійсне співвідношення відносних швидкостей потоку рідини в робочому колесі

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{13,51}{9,48} = 1,426.$$

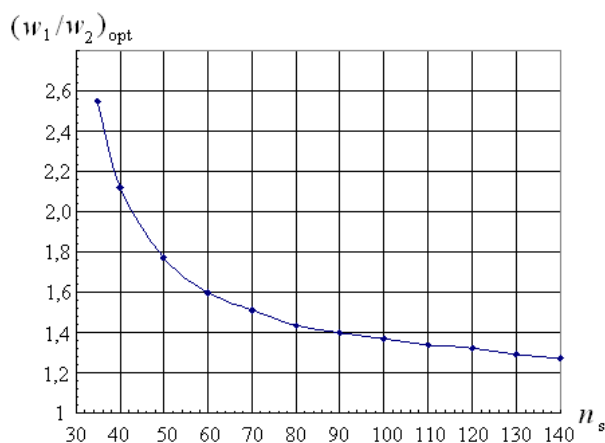


Рис. 4.2. Залежність $(w_1/w_2)_{opt}$ від n_s

Дійсне співвідношення (w_1/w_2) задовольняє оптимальному значенню при $\beta_2 = 31^\circ$. Розрахункове значення кута β_2 встановлене після ряду послідовних наближень. Відповідно значення всіх параметрів і кутів приводиться в даному прикладі в останньому наближенні.

Відносна швидкість потоку рідини на виході з робочого колеса при нескінченній кількості лопатей обчислюється за формулою

$$w_{2\infty} = \frac{c_{2m}}{\sin \beta_2}, \quad w_{2\infty} = \frac{3,2}{\sin 31^\circ} = 6,22 \text{ м/с.}$$

Після визначення колової швидкості u_2 і проєкцій абсолютної швидкості c_{2m} , c_{2u} , $c_{2u\infty}$ можуть бути побудовані трикутники швидкостей на виході з робочого колеса насоса для $z = \infty$ і $z \neq \infty$. Креслення трикутників приведено далі.

В результаті визначення основних параметрів робочого колеса насосу були встановлені наступні конструктивні числові значення, за якими можлива ескізна проробка робочого колеса:

Діаметр входу в робоче колесо $D_0 = 110,5$ мм

Діаметр середньої вихідної кромки лопаті робочого колеса $D_1 = 100,0$ мм

Товщина лопаті на вході в колесо $\Delta_1 = 1$ мм

Кут установки лопаті на вході $\beta_1 = 16^\circ$

Зовнішній діаметр робочого колеса $D_2 = 212,8$ мм

Товщина лопаті на виході з колеса $\Delta_2 = 1$ мм

Кут установки лопаті на виході $\beta_2 = 31^\circ$

4.4 Розрахунок меридіанного перетину робочого колеса

Побудова меридіанного перетину робочого колеса (рис. 4.3) виконується наступним чином. На лінії, яка перпендикулярна вісі робочого колеса, відкладаємо точки, які відповідають значенням радіусів $R_1, \dots, R_i, \dots, R_2$. Через ці точки ці точки проводимо відрізки, на яких відкладаємо значення ширини каналу відповідно $b_1, \dots, b_i, \dots, b_2$. Потім на відрізках шириною b_i , як на діаметрах, будуємо кола. Проводимо лінії, паралельні вісі робочого колеса і які відповідають діаметрам $D_0, d_{ст}, d_в$. Після чого будуємо бокові стінки каналу, які огинають кола з діаметрами b_i .

Таблиця 4.2. Розрахунок меридіанного перетину робочого колеса

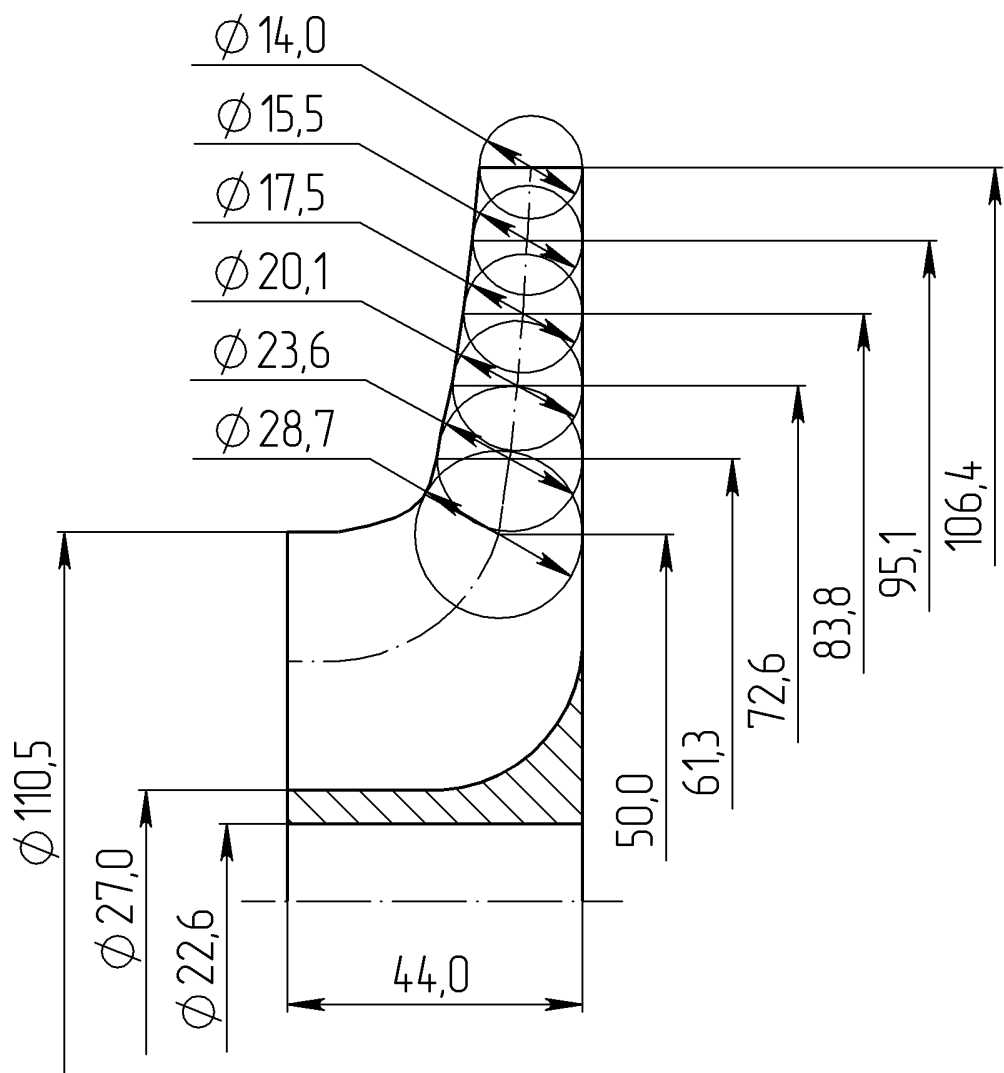
Параметр та одиниці виміру	Найменування параметру, розрахункова формула	Значення	Примітка
D_1 , м	Діаметр середньої вихідної кромки лопаті робочого колеса	0,100	
D_2 , м	Зовнішній діаметр робочого колеса	0,2128	
i	Кількість ділянок розбивки	5	
ΔR , м	Крок по радіусу	0,01128	
b_i , м	Ширина каналу робочого колеса на різних діаметрах: $b_i = \frac{Q_p}{\pi \cdot D_i \cdot c_{im}}$	0,0287	1
		0,02358	а
		0,02005	б
		0,01748	в
		0,01551	г
		0,01397	2
c'_{1m} , м/с	Меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини в районі повороту в робочому колесі	3,19	1
c'_{2m} , м/с	Меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини на виході з робочого колеса з врахуванням коефіцієнта захарщення каналу	3,08	2

Параметр та одиниці виміру	Найменування параметру, розрахункова формула	Значення	Примітка
	колеса лопатями		
c'_{im} , м/с	Меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини на різних діаметрах: $c'_{im} = k \cdot R_1 + b$	3,168	а
		3,146	б
		3,124	в
		3,102	г
k	Коефіцієнт лінійного рівняння: $k = \frac{c'_{2m} - c'_{1m}}{R_2 - R_1}$	-1,9504	
b	Коефіцієнт лінійного рівняння: $b = c'_{1m} - k \cdot R_1$	3,28752	

В результаті розрахунку меридіанного перетину робочого колеса була отримана таблиця результатів (табл. 4.3), за даними якої можлива його ескізна проробка.

Таблиця 4.3. Результати розрахунку меридіанного перетину робочого колеса

Радіуси, м	R_1	a	$б$	$в$	$г$	R_2
	0,0500	0,0613	0,0726	0,0838	0,0951	0,1064
Ширини каналів, м	0,0287	0,0236	0,0201	0,0175	0,0155	0,0140
	b_1	a	$б$	$в$	$г$	b_2



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Меридіанний перетин робочого колеса			Лист.	Масса	Масштаб	
Разраб.											
Проверил											
Н. контр.								Лист		Листов	
Утв.								НУК им. адм. Макарова			

4.5 Розрахунок середньої лінії лопаті робочого колеса в плані

Побудова середньої лінії лопаті в плані виконується по координатах точок, які лежать на цій лінії. Положення цих точок визначається в циліндричній системі координат $R - \varphi$. Розрахунок проводиться в табличній формі. Таблиця розрахунків 4.4 та таблиця результатів розрахунку 4.5 представлена як копія відповідної форми, що представлена в розрахунковій програмі на окремому листі. За таблицею результатів будуються точки на плані робочого колеса. Через ці точки проводиться лекальна крива і визначається вид середньої лінії лопаті робочого колеса в плані.

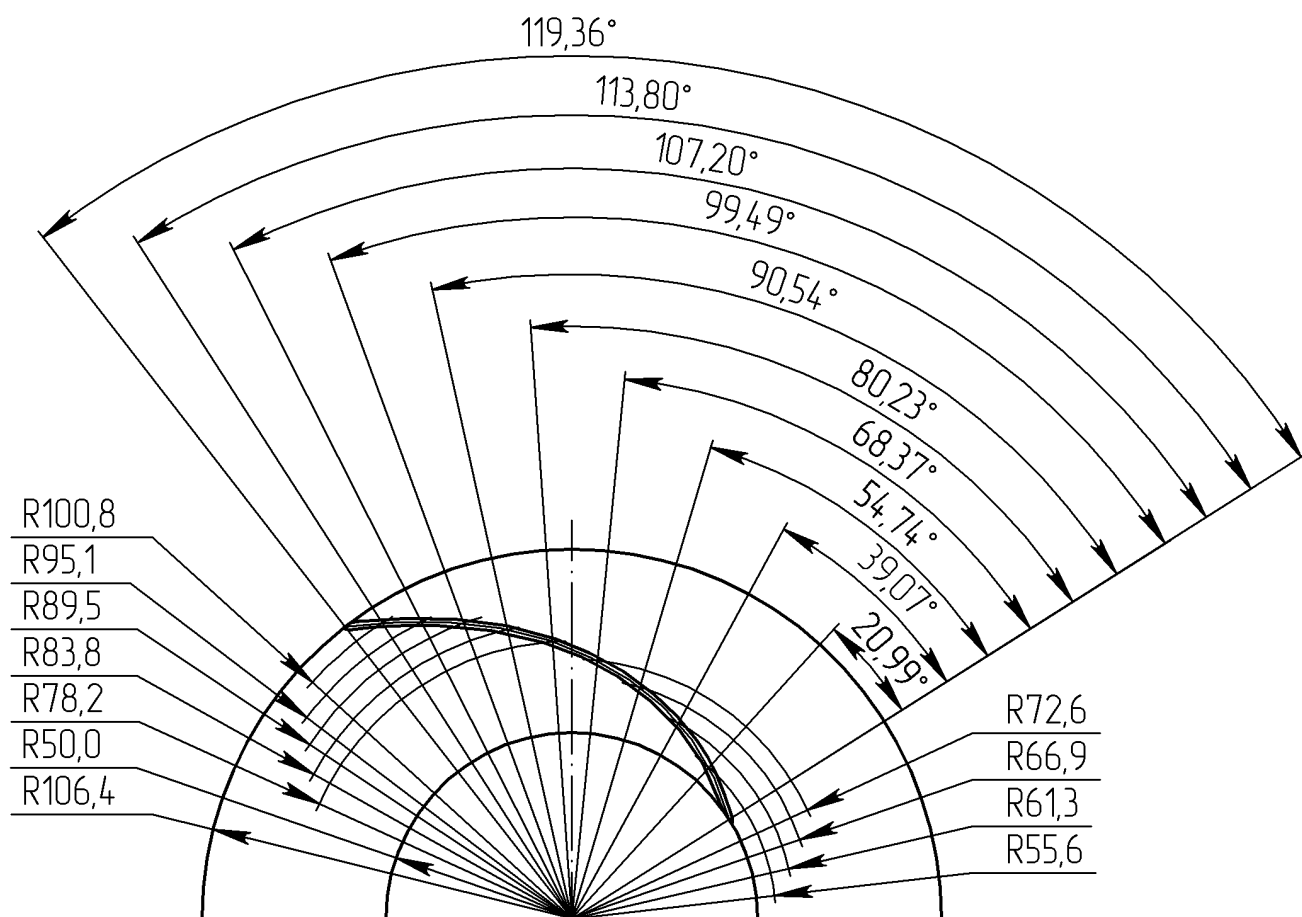
Таблиця 4.4. Розрахунок середньої лінії лопаті робочого колеса в плані

Параметр та одиниці виміру	Найменування параметру, розрахункова формула	Значення	Примітка
D_1 , м	Діаметр середньої вихідної кромки лопаті робочого колеса	0,1	
D_2 , м	Зовнішній діаметр робочого колеса	0,2128	
i	Кількість ділянок розбивки	10	
ΔR , м	Крок по радіусу	0,00564	
R_1 , м	Радіус середньої вихідної кромки лопаті робочого колеса	0,0500	1
R_i , м	Проміжні значення радіусів: $R_i = R_1 + i \cdot \Delta R$	0,0556	a
		0,0613	б
		0,0669	в
		0,0726	г
		0,0782	д
		0,0838	e
		0,0895	ж
		0,0951	з
		0,1008	и
R_2 , м	Зовнішній радіус робочого колеса	0,1064	2
k	Коефіцієнт лінійного рівняння для визначення c_{im} : $k = \frac{c_{2m} - c_{1m}}{R_2 - R_1}$	-9,2199	
b	Коефіцієнт лінійного рівняння для визначення c_{im} : $b = c_{1m} - k \cdot R_1$	4,18099	
c_{1m} , м/с	Меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини на вході в робоче колесо	3,72	1
c_{im} , м/с	Проміжні значення меридіанної складової абсолютної швидкості потоку рідини в робочому колесі в різних радіусах:	3,668	a
		3,616	б
		3,564	в

Параметр та одиниці виміру	Найменування параметру, розрахункова формула	Значення	Примітка
	$c_{im} = k \cdot R_i + b$	3,512	<i>г</i>
		3,46	<i>д</i>
		3,408	<i>е</i>
		3,356	<i>ж</i>
		3,304	<i>з</i>
		3,252	<i>и</i>
c_{2m} , м/с	Меридіанна складова абсолютної швидкості потоку рідини на виході з робочого колеса	3,2	2
k	Коефіцієнт лінійного рівняння для визначення w_i : $k = \frac{w_{2\infty} - w_1}{R_2 - R_1}$	-129,26	
b	Коефіцієнт лінійного рівняння для визначення w_i : $b = w_1 - k \cdot R_1$	19,9728	
w_1 , м/с	Відносна швидкість потоку рідини при вході на лопатку робочого колеса	13,51	1
w_i , м/с	Проміжні значення відносної швидкості потоку рідини в робочому колесі на різних радіусах: $w_i = k \cdot R_i + b$	12,781	<i>а</i>
		12,052	<i>б</i>
		11,323	<i>в</i>
		10,594	<i>г</i>
		9,865	<i>д</i>
		9,136	<i>е</i>
		8,407	<i>ж</i>
		7,678	<i>з</i>
		6,949	<i>и</i>
$w_{2\infty}$, м/с	Відносна швидкість потоку рідини на виході з робочого колеса при нескінченній кількості лопатей	6,22	2

Таблиця 4.5. Результати розрахунку середньої лінії лопаті робочого колеса в плані

№ точки	$\beta_i = \arcsin \frac{c_{im}}{w_{1\infty}}$	$B_i = \frac{1}{R_i \cdot \tan \beta_i}$	$\frac{B_i + B_{i+1}}{2}$		$\Delta \varphi_i = \frac{180}{\pi} \times \frac{B_i + B_{i+1}}{2} \cdot \Delta R$	$\varphi_i = \frac{180}{\pi} \cdot \sum_1^i \Delta \varphi_i$	R_i , м
1	15,99	69,83	64,91		0	0	0,0500
<i>а</i>	16,69	59,99			20,99	20,99	0,0556
<i>б</i>	17,47	51,88	48,47	55,94	18,09	39,07	0,0613
<i>в</i>	18,36	45,06			15,67	54,74	0,0669
<i>г</i>	19,37	39,22	36,68	42,14	13,63	68,37	0,0726
<i>д</i>	20,54	34,14			11,86	80,23	0,0782
<i>е</i>	21,91	29,67	27,67	31,91	10,32	90,54	0,0838
<i>ж</i>	23,54	25,67			8,95	99,49	0,0895
<i>з</i>	25,50	22,05	20,40	23,86	7,71	107,20	0,0951
<i>и</i>	27,92	18,74			6,59	113,80	0,1008
2	30,98	15,67		17,20	5,56	119,36	0,1064



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лопать рабочего колеса в плане				Лист.	Масса	Масштаб		
Разраб.													
Проверил													
Н. контр.									Лист			Листов	
Утв.									НУК им. адм. Макарова				

На кресленні перетину лопаті робочого колеса у плані крім середньої лінії зображується й тіло лопаті. Для цього на середній лінії відкладаються товщини лопаті на вході, виході та в середині. Для довгих лопатей профіль перетину звичайно відповідає пластині з постійною товщиною. Для відносно коротких лопатей можуть застосовуватися стандартні гідродинамічні профілі з відповідних довідників.

4.6 Розрахунок спірального відвідного каналу

Відвідний канал охоплює робоче колесо по зовнішньому периметру і призначений для прийняття рідини від робочого колеса та спрямування її до напірного патрубку (дифузору) і далі в напірну магістраль. Відвідні канали не беруть участі у створенні напору, а перетворюють частину швидкісного напору в статичний напір насосу.

При профілюванні задано спосіб, відповідно до якого

$$R \cdot c_u = R_2 \cdot c_{2u} = const.$$

Розхід рідини через елементарну площадку поперечного перетину відводу знаходиться за формулою

$$dQ = c_{ui} \cdot b_i \cdot dR$$

Спіральний відвід являє собою криволінійний дифузорний канал, який зазвичай закінчується дифузором з прямою віссю (прямовісним дифузором). Форма поперечних перетинів спірального відводу, відповідно до обраного закону зміни швидкості води за радіусом, може бути лише трапецієподібною. Така форма поперечного перетину каналу дозволяє реалізувати закон постійності моменту швидкості рідини $R \cdot c_u = const$ по всій площі кожного перетину що, в свою чергу, забезпечує мінімальне радіальне навантаження на колесо. Спіральний відвід трапецієвидного перетину забезпечує менші втрати за рахунок зменшення вихроутворення під час надходження потоку з колеса в канал. Нахил бічних стінок поперечного перетину каналу зазвичай приймається однаковим

для всіх перетинів. Кут сходження (розкриття) стінок $\alpha = 30...40^\circ$ [1]; приймаємо $\alpha = 30^\circ$.

Розрахунок відвідного каналу виконується по восьми перетинах, відданих на 45° один від одного.

Для розрахунку перетинів і побудови теоретичного креслення спірального відводу необхідно прийняти значення початкового радіусу R_3 , ширини приросту радіусу ΔR і кут сходження (розкриття) стінок α .

Приріст радіусу і кут сходження стінок приймається на основі приведених вище рекомендацій.

Початковий радіус спіралі R_3 приймаємо за умови, що нерівномірність поля швидкостей потоку за колесом, викликана кінцевим числом лопатей колеса, встигає вирівнятися до надходження в спіральний канал.

$$R_3 = (1,03...1,05) \cdot R_2,$$

де $R_2 = \frac{D_2}{2}$ – радіус робочого колеса, м

$$R_2 = \frac{0,2128}{2} = 0,1064 \text{ м.}$$

Тоді

$$R_3 = 1,03 \cdot 0,1064 \approx 0,10 \text{ м.}$$

Приріст радіусу

$$\Delta R = 0,05 \cdot 0,10 = 0,005 \text{ м.}$$

Ширину вхідного перетину спірального каналу b_3 приймаємо за умови, що вона повинна бути більше ширини робочого колеса на виході b_2 на товщину переднього і заднього дисків і має забезпечити достатні зазори між робочим колесом і внутрішніми стінками корпусу. Відносно широкі зазори дозволяють частково використовувати енергію дискового тертя і створити певні зручності під час зборки насосу.

$$b_3 = b_2 + (0,02...0,05) \cdot D_2, \quad b_3 = 0,0140 + 0,02 \cdot 0,2128 = 0,018 \text{ м.}$$

Товщина язика $\Delta Я$ приймається з конструктивних і технологічних міркувань. Для спірального відводу зазвичай $\Delta Я$ лежить в межах 1...10 мм; приймаємо $\Delta Я = 0,001$ м.

З урахуванням цієї товщини визначається мінімальна і максимальна ширина останнього перетину і радіус початкового перетину відводу $R_я$.

$$R_я = R_3 + \Delta Я, \quad R_я = 0,10 + 0,001 = 0,101 \text{ м.}$$

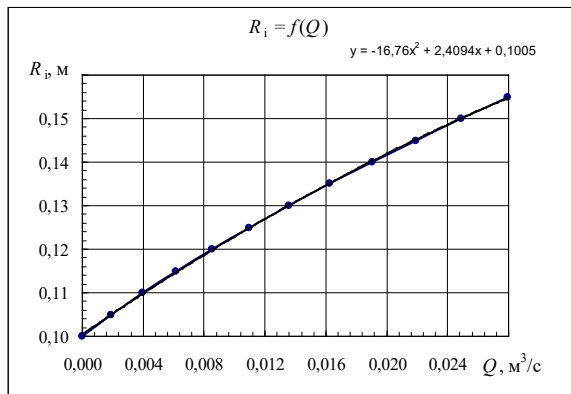


Рис. 4.6. Залежність внутрішнього радіусу спіральної поверхні відводу від розходу

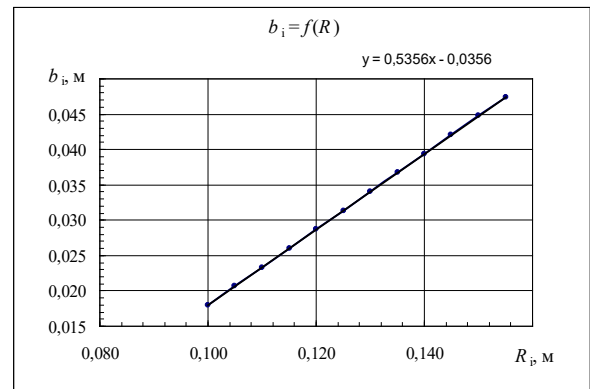


Рис. 4.7. Залежність максимальної ширини трапецієвидного каналу від радіусу спіральної поверхні відводу

Необхідні конструктивні значення спіральної поверхні відводу для побудови графіків на рис. 4.6 і 4.7 приведені в табл. 4.10, яка є вибіркою результатів розрахунків обчислених в табличній формі (табл. 4.8, 4.9).

Таблиця 4.8. Проміжні значення радіусів і ширин каналу на цих радіусах

Параметр та одиниці виміру	Найменування параметру, розрахункова формула	Значення	Примітка
$R_i, \text{ м}$	Проміжні значення радіусів: $R_i = R_3 + \Delta R \cdot i$, де i – номер ділянки.	0,100	R_3
		0,105	a
		0,110	b
		0,115	v
		0,120	z
		0,125	d
		0,130	e
		0,135	$ж$
		0,140	$з$
		0,145	$и$
		0,150	$к$
		0,155	$л$
		0,160	$м$

Параметр та одиниці виміру	Найменування параметру, розрахункова формула	Значення	Примітка
		0,165	<i>n</i>
		0,170	<i>o</i>
		0,175	<i>p</i>
		0,180	<i>p</i>
Продовж. табл. 6 $b_i, \text{ м}$	Проміжні максимальні значення ширин перетинів відвідного каналу на різних радіусах: $b_i = b_3 + 2 \cdot (R_i - R_3) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$	0,018	b_3
		0,021	<i>a</i>
		0,023	<i>б</i>
		0,026	<i>в</i>
		0,029	<i>г</i>
		0,031	<i>д</i>
		0,034	<i>e</i>
		0,037	<i>ж</i>
		0,039	<i>з</i>
		0,042	<i>и</i>
		0,045	<i>к</i>
		0,047	<i>л</i>
		0,050	<i>м</i>
		0,053	<i>н</i>
		0,055	<i>o</i>
		0,058	<i>p</i>
		0,061	<i>p</i>

Таблиця 4.9. Розрахунок розходу рідини через перетини каналу відводу

Перетини	$B_1 = \frac{b_1}{R_1}$	$\frac{B_1 + B_{i+1}}{2}$		$\Delta Q = \frac{L_r}{\omega} \cdot \frac{B_1 + B_{i+1}}{2} \cdot \Delta R, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_\Sigma = \sum_{i=1}^i \Delta Q, \text{ м}^3/\text{с}$
B_3	0,18	0,1885		0,0000	0,0000
<i>a</i>	0,19693			0,0019	0,0019
<i>б</i>	0,21233	0,2194	0,2046	0,0021	0,0040
<i>в</i>	0,22638			0,0022	0,0062
<i>г</i>	0,23927	0,2452	0,2328	0,0023	0,0085
<i>д</i>	0,25112			0,0025	0,0110
<i>e</i>	0,26206	0,2671	0,2566	0,0026	0,0136
<i>ж</i>	0,2722			0,0027	0,0163
<i>з</i>	0,2816	0,2860	0,2769	0,0028	0,0190
<i>и</i>	0,29036			0,0029	0,0219
<i>к</i>	0,29854	0,3024	0,2945	0,0030	0,0249
<i>л</i>	0,30619			0,0030	0,0279
<i>м</i>	0,31336	0,3167	0,3098	0,0031	0,0310
<i>н</i>	0,32009			0,0032	0,0342
<i>o</i>	0,32643	0,3294	0,3294	0,0033	0,0376
<i>p</i>	0,33241			0,0033	0,0409
<i>p</i>	0,33805		0,3352	0,0034	0,0442

В табл. 4.9 відмічаємо строку зі значенням розходу рідини через спіральний відвід, яке не перевищує більше ніж на 10 % від заданого в завданні значення розходу. В нашому випадку табличне значення $Q = 0,0279 \text{ м}^3/\text{с}$ перевищує заданий $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$ менше, ніж на 0,2 %. Тож його відмічаємо як граничне. Результати розрахунків значень розходів, радіусів і ширин з табл. 4.8 і 4.9 переносяться в табл. 4.10 до виділеного значення Q .

Таблиця 4.10. Результати розрахунку

Перетини	Q , $\text{м}^3/\text{с}$	R_i , м	b_i , м
0	0,0000	0,100	0,0180
a	0,0019	0,105	0,0207
б	0,0040	0,110	0,0234
в	0,0062	0,115	0,0260
г	0,0085	0,120	0,0287
д	0,0110	0,125	0,0314
е	0,0136	0,130	0,0341
ж	0,0163	0,135	0,0367
з	0,0190	0,140	0,0394
и	0,0219	0,145	0,0421
к	0,0249	0,150	0,0448
л	0,0279	0,155	0,0475

Таблиця 4.11. Розміри поперечних перетинів відводу для різних кутів обхвату

φ_i	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
R_φ , мм	101	109	117	124	131	137	144	149	155
b_φ , мм	18,2	22,6	26,8	30,8	34,5	38,0	41,3	44,4	47,3
h_φ , мм	1	9	17	24	31	38	44	50	55

За даними табл. 4.11 будуються контури перетинів спірального відводу в масштабі для вибраних кутів обхвату φ (далі приведений ескіз).

При проектуванні перетинів відвідного каналу гострі кути профілю перетину, особливо в верхній його частині, округлюються відповідно до рекомендацій [1], коли площі f_a і f_b рівні між собою (див. ескіз).

Далі контури поперечних перетинів відводу розміщуються (накладаються) по радіусу R_2 , проведених під вибраними кутами обхвату φ_i (на ескізі ці радіуси проведені через 90°), після чого через точки перетину осьових лі-

ній цих перетинів з лініями максимальної ширини перетинів проводиться плавна крива, яка утворює внутрішню поверхню перетину спірального відводу, перпендикулярного вісі обертання робочого колеса насосу.

Для завершення побудови внутрішнього контуру спірального відводу в плані необхідно мати конструктивні параметри профілю відвідного дифузора. Дифузор слугує для сполучення спірального каналу з відвідним трубопроводом. Для його побудови необхідно знати діаметр або радіус початкового перетину дифузора ρ_{360} , радіус кінцевого перетину $R_{тр}$ і його довжину L_d .

Початковий перетин дифузора формується за допомогою пластичної деформації перетину каналу після останнього перетину відводу (на куті обхвату 360°) від форми трапеції до форми круга, рівновеликого за площею. Радіус цього круга визначається за формулою

$$\rho_{360} = \sqrt{\frac{(R_{\max} - R_3) \cdot (b_{\max} + b_3)}{2 \cdot \pi}},$$

Данні максимальних і мінімальних значень R і b беремо з табл. 4.11.

$$\rho_{360} = \sqrt{\frac{(0,155 - 0,10) \cdot (0,0475 + 0,018)}{2 \cdot 3,14}} = 0,0230 \text{ м.}$$

Кінцевий перетин розраховується з умови забезпечення необхідної швидкості рідини на виході з насосу $c_{тр}$. Згідно з [1] швидкості рідини на виході з насосу повинна бути в межах $2 \dots 5$ м/с.

Приймаємо $c_{тр} = 4$ м/с.

Радіус кінцевого перетину дифузору визначається за формулою

$$R_{тр} = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot c_{тр}}}, \quad R_{тр} = \sqrt{\frac{0,028}{3,14 \cdot 4}} = 0,0470 \text{ м.}$$

Кут розкриття дифузора σ приймається згідно рекомендації [1] $8 \dots 12$ градусів, щоб забезпечити безвідривну течію рідини; приймаємо $\sigma = 12^\circ$.

Довжина визначається по куту розкриття і розмірам початкового і кінцевого перетинів за формулою

$$L_d = \frac{R_{тр} - \rho_{360}}{\operatorname{tg} \frac{\sigma}{2}}, \quad L_d = \frac{0,0470 - 0,0230}{\operatorname{tg} \frac{12}{2}} = 0,229 \text{ м.}$$

Рекомендується, щоб довжина дифузора не перевищувала 1,5 максимального діаметру відводу. В даному випадку він рівний 310 мм, а довжина дифузора 229 мм. Умова виконана.

На підставі розрахунків перетинів відводу і дифузора виконується остаточна побудова внутрішнього контуру спірального відводу в плані. Загальний вигляд цього контуру представлений кресленням.

					КРБ.142.2227ст.07.04.ПЗ	Лист
						62
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

4.7 Оцінка допустимої висоти всмоктування насосу

На основі початкових даних визначався коефіцієнт C , який використовується для обчислення вхідних розмірів проточної частини та визначення конфігурації робочих органів насоса. Коефіцієнт C входить до емпіричних залежностей для визначення ряду розрахункових величин. Методика розрахунку з використанням емпіричних залежностей містить ряд неминучих округлень і поправок, які можуть спричинити розбіжності між кінцевими результатами та початковими прогнозами.

Так, допустима висота всмоктування рідини, яку дійсно забезпечує конструкція спроектованого насоса, тепер повинна визначатися на основі отриманих конкретних параметрів за формулою

$$H_{\text{всд}} = \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{p_a - p_n}{\rho} - A \Delta l_{\text{кр}} - l_{\text{тп}} \right),$$

$A = 1,1 \dots 1,3$ – коефіцієнт запасу [1]; приймаємо $A = 1,2$.

Критичний кавітаційний запас енергії насосу $\Delta l_{\text{кр}}$ обчислюємо за новою формулою

$$\Delta l_{\text{кр}} = \lambda_{\text{ш}} \cdot \frac{(\omega \cdot D_1)^2}{8} + \frac{c_{10}^2}{2} \cdot (\lambda_{\text{ш}} + \lambda_1),$$

Коефіцієнт $\lambda_{\text{ш}}$ знаходимо за формулою

$$\lambda_{\text{ш}} = 1,2 \cdot \frac{c_{10}}{u_1} + (0,07 + 0,42 \cdot \frac{c_{10}}{u_1}) \cdot \left(\frac{\Delta_1}{\Delta} - 0,615 \right),$$

де $\frac{\Delta_1}{\Delta} = 0,15 \dots 0,9$ – відношення товщини лопаті робочого колеса на вході до

її найбільшої товщини. Приймаємо $\frac{\Delta_1}{\Delta} = 0,15$.

$$\lambda_{\text{ш}} = 1,2 \cdot \frac{3,72}{13,09} + (0,07 + 0,42 \cdot \frac{3,72}{13,09}) \cdot (0,15 - 0,615) = 0,26,$$

$\lambda_1 = 1,0 \dots 1,2$ [1]; приймаємо $\lambda_1 = 1,2$.

$$\Delta l_{\text{кр}} = 0,26 \cdot \frac{(261,7 \cdot 0,10)^2}{8} + \frac{3,72^2}{2} \cdot (0,26 + 1,2) = 32,36 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

За отриманим значенням $\Delta l_{\text{кр}}$ визначаємо дійсну висоту всмоктування, на якій може працювати спроектований насос

$$H_{всд} = \frac{1}{9,8} \cdot \left(\frac{100000 - 4241}{999,13} - 1,2 \cdot 32,36 - 4 \right) = 5,41 \text{ м.}$$

Оскільки дійсна висота всмоктування не менше заданої, розрахунок можна вважати завершеним.

4.8 Опис конструкції відцентрового насоса

Даний насос можна класифікувати за наступними ознаками:

- за принципом підведення енергії потоку рідини – динамічний або лопатевий;
- по вигляду робочих органів і по особливості робочого процесу – відцентровий;
- по числу ступіней (послідовно включених коліс) – одноступінчатий;
- за призначенням – циркуляційний насос для системи побутового водопостачання – прісної побутової води;
- по роду приводу – автономний електронасос;
- по розташуванню колеса щодо опор – консольний.

Насос складається з системи рухомих (ротор в зборі) і нерухомих елементів (корпусні деталі).

Ротор складається з робочого колеса, яке закріплене на валу за допомогою шпонки та гайки-обтічника.

Колесо закритого типу, виготовлене з бронзи литвом. 12 робочих лопатей колеса загнутих назад відповідно до розрахунку..

На валу встановлена бронзова втулка, яка запобігає витиранню ротора об сальник. Вал виготовлений у вигляді ряду співвісних циліндрів різного діаметру, на яких кріпляться колесо, підшипники і захисна втулка. На стороні валу, протилежній колесу, виконано шпонковий паз, який призначений для фіксації муфти, що сполучає насос з приводом.

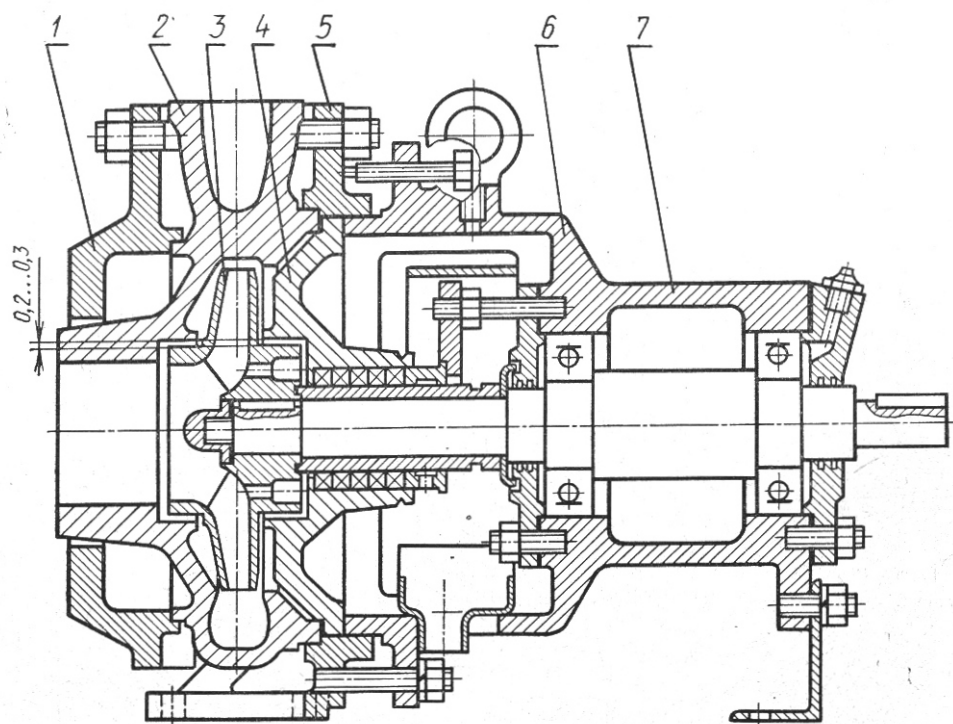


Рис. 4.8. Відцентровий насос системи охолодження

Нерухомі елементи насоса включають корпус, який об'єднує ключові компоненти насоса: вхідний патрубок, спіральний відвід і камеру, де розташовується робоче колесо. На вхідному патрубку розміщений приєднувальний фланець для з'єднання всмоктуючого трубопроводу, а на кінці спірального відводу – фланець для з'єднання з нагнітальним трубопроводом. З боку переднього диска колеса в корпусі сформовано щілинне ущільнення, що складається з ущільнюючого кільця, яке охоплює з мінімальним зазором циліндровий виступ переднього покривного диска колеса. У корпусі насоса реалізовані отвори в стінці вхідного патрубку і в стінці спірального відводу. Ці отвори закриті пробками і можуть використовуватися для зливу води з насоса, для випуску повітря під час запуску перед роботою і для приєднання манометрів для вимірювання тиску. Корпус насоса з боку заднього диска колеса закритий кришкою корпусу, що утворює разом з ним камеру, в якій обертається робоче колесо. Ця камера забезпечує утримання робочого середовища та ефективне функціонування насоса. Через центр круглої кришки проходить канал для валу ротора, в якому також розміщується сальникове ущільнення.

Це ущільнення дозволяє запобігти витоку рідини з камери, де обертається робоче колесо. З боку колеса в отвір кришки вставлена упорна кришка сальника, яка забезпечує правильне позиціонування та фіксацію сальника для ефективного ущільнення.

Сальникове ущільнення складається з сальникового набивки 5, розділеною на дві частини водорозподільним кільцем. До цього кільця через отвір в стінці каналу кришки корпусу, виконаного для розміщення ущільнення і під прохід валу, підводиться вода з порожнини відводу по свердленню в ребрі кришки. Сальникова набивка підтискається. Кришка сальникового ущільнення виконана з двох частин, що забезпечує її розбирання і витягання з ліхтаря без розбирання насоса при поточному ремонті сальникового ущільнення.

Кришка корпусу насоса притискається до корпусу ліхтарем насоса. Ліхтар виконує функцію проміжкової частини, що з'єднує корпус насоса з корпусом підшипникових опор. В ліхтарі наявне бічне вікно, яке забезпечує доступ до сальникового ущільнення. Це вікно також використовується для видалення води, яка може протікати назовні через сальник під час роботи насоса.

У корпусі підшипників розташовані два підшипники. Підшипник з боку колеса закріплений у корпусі і також на валу насоса, що забезпечує підтримку і обертання валу в процесі роботи насоса. Підшипник з протилежного боку затиснений на валу, але може переміщатися уздовж осі розточки корпусу для компенсації теплового подовження валу. Підшипники змащуються рідким маслом, яке заливається через отвір у верхній частині корпусу підшипників. Для запобігання витіканню масла в кришках встановлені фетрові кільця. Для запобігання попаданню води в підшипники з боку колеса встановлений відбійник.

При роботі насосу рідина поступає в колесо через всмоктуючий патрубок, а виходить з нього через щілину між двома дисками на зовнішньому діаметрі колеса. Рідина, яка вилітає з диска, збирається спіралевидним відводом, який охоплює колесо по периметру. З відводу рідина поступає в нагні-

					КРБ.142.2227ст.07.04.ПЗ	Лист
						67
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

тальний патрубок, звідки прямує до споживача. Для того, щоб насос почав працювати, його колесо і всмоктуючий канал повинні бути повністю заповнені водою. При обертанні колеса вода, яка знаходиться в міжлопатевих каналах, буде залучена лопатками в окружний рух. Відцентрова сила, яка виникає при цьому, переміщатиме частинки по радіусу при одночасному обертальному русі. У зв'язку з видаленням порцій рідини через міжлопатеві канали колеса, у вхідній частині колеса формується область зниженого тиску. До цієї області потрапляють нові порції рідини зі всмоктуючого патрубку, де тиск вищий, ніж у вхідній області колеса. Цей процес відбувається постійно. Порції рідини, які потрапляють в колесо під дією цього механізму, отримують кінетичну енергію від руху робочих лопаток. Це призводить до збільшення їх абсолютної швидкості, оскільки рідина перетягується через лопаті й збільшується її енергія. У відносному русі по каналах колеса ці порції переміщуються від менших поперечних перетинів каналів до більших, що викликає зменшення відносної швидкості руху порцій при одночасному збільшенні їх абсолютної швидкості. Порції рідини, які вилітають з колеса, продовжують уповільнювати свою швидкість, вже в абсолютному русі, із-за переміщення по каналу, перетин якого розширюється у напрямку руху потоку рідини. Уповільнення швидкості течії, відповідно до законів гідромеханіки, супроводжується зростанням тиску рідини або перетворенням кінетичної енергії в потенційну. В результаті на виході з насоса споживач отримує потік із заданим надмірним тиском і порівняно низькою швидкістю, прийнятною для використання в системах, де застосовуються такі насоси.

У даному насосі внутрішні витоки пов'язані тільки з паразитними токами в передньому щільному ущільненні.

Оскільки тиск за заднім диском колеса поблизу валу ротора знижений, сальникове ущільнення не може прокачуватися водою з цієї області. Нормальна робота сальникового ущільнення у такому разі забезпечується подачею до сальника води через спеціальний канал в корпусі, що підводить воду з відводу, в якому тиск близький до максимального у водяному тракті насоса. Во-

					КРБ.142.2227ст.07.04.ПЗ	Лист
						68
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

да підводиться приблизно в середню частину ущільнення, де встановлене водорозподільне кільце, яке запобігає запиранню сальниковою набивкою водопротікаючого каналу. При цьому частина води що подається, йтиме в насос, а частина буде виходити назовні через отвір у втулці. При нормальній роботі сальникового ущільнення вода буде капати зовні тільки при працюючому насосі, в кількості 5...10 крапель за хвилину.

4.9 Висновок по розділу

Результати розрахунку підтвердили можливість застосування паралельного включення двох однакових насосів, що дасть нам змогу досягти потрібної витрати охолоджуючої рідини через систему охолодження двигуна типу 12ЧН 26/32. На підставі розрахунку визначені основні конструктивні розміри насосу з можливими відхиленнями, які несуттєві для проведення компоновочного конструювання.

Спроекований відцентровий насос має розхід рідини $Q = 100 \text{ м}^3/\text{год}$, яку спроможний всмоктувати з висоти 5,4 м. ККД насосу $\eta = 0,707$ (що допустиме для таких насосів). Насос має привод від двигуна і споживає 17,7 кВт енергії при 2500 об/хв. На виході з насосу рідина має швидкість 4,0 м/с.

Розділ 5

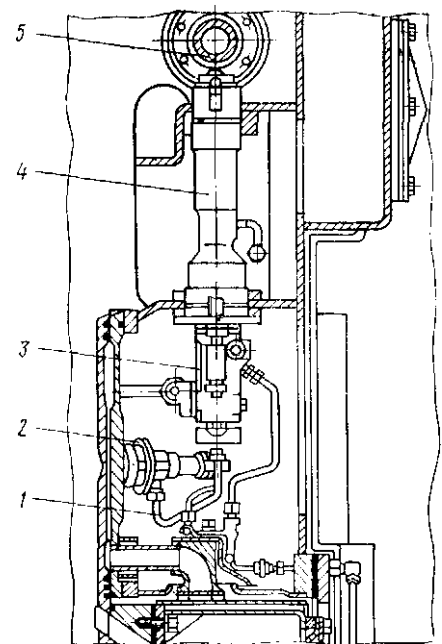
Розрахунок і розробка принципів схем систем двигуна

5.1 Паливна система

Система паливоподачі повинна виконувати чотири функції: дробити паливо на дрібні частинки, дозувати (вимірювати і змінювати кількість палива що подається), забезпечувати певний закон зміни кількості палива в період подачі, забезпечувати впорскування палива в період, коли поршень знаходиться поблизу ВМТ. Залежно від особливостей підсистем і елементів системи, що забезпечують виконання перелічених функцій, а також від принципової схеми об'єднання цих частин воедино, паливні системи класифікують за багатьма ознаками.

Кожен циліндр (рис. 5.1) обслуговується двома паливними насосами 3. Паливний насос нагнітає паливо по трубці високого тиску 1 в форсунку 2.

Паливо, що просочилося через зазори в розпилювачі форсунки, стікає по трубках у зливний колектор і через систему труб відводиться в паливний бак.



5.1.1 Класифікація системи паливоподачі

За принципом дії система безпосереднього впорскування. У системах безпосереднього впорскування підвищення тиску палива і його подача проводяться періодично, під час нагнітального ходу насоса.

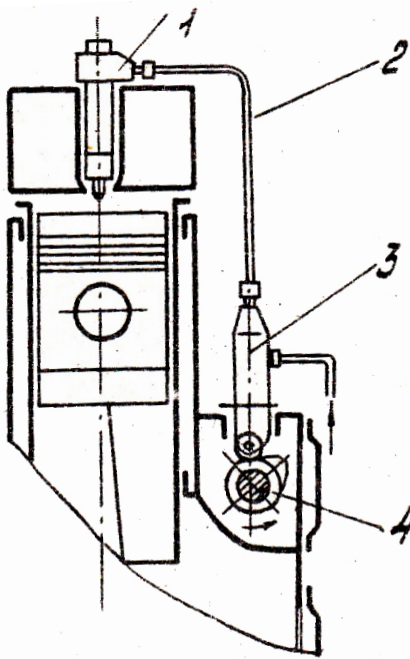


Рис. 5.2. Схема системи безпосереднього уприскування палива

На рис. 5.2 наведена схема системи паливоподачі безпосереднього вприскування. Паливо в циліндр подається через форсунку 1, встановлену в спеціальний отвір в кришці циліндра.

Призначення форсунки – роздібнити паливо на дрібні частинки і розсіяти їх рівномірно в камері згоряння. До форсунки паливо підводиться по трубці високого тиску 2 від насоса високого тиску 3 (рис. 5.2).

Паливний насос високого тиску (ПНВТ) призначений для подачі порції палива до форсунки при тиску в декілька разів більшому, ніж тиск у циліндрі і для зміни при необхідності кількості палива. Робота ПНВТ відбувається під дією паливної кулачної шайби 4, що обертається завдяки крутному моменту. Паливна кулачна шайба забезпечує роботу ПНВТ таким чином, щоб подача палива в циліндр відбувалася в потрібний період часу і за певним законом.

5.1.2 Особливості компонування на двигуні системи паливоподачі:

- з автономним паливопідкачувальним насосом;
- з навішаними паливними фільтрами;
- з індивідуальними ПНВТ;
- з двома форсунками на кожному циліндрі двигуна.

Паливопідкачувальний насос призначений для подачі палива при тиску 0,4 МПа через фільтри до ПНВТ, розташовується поза двигуном і має самостійний електричний привід.

Паливні фільтри знаходяться безпосередньо на двигуні.

Системи паливоподачі безпосереднього впорскування з індивідуальними ПНВТ характеризуються наявністю на кожному циліндрі двох насосів високого тиску.

Паливопідкачувальний насос через фільтри подає паливо в загальний колектор, з якого воно надходить в ПНВТ. Кожен ПНВТ приводиться в рух своєї кулачної шайбою, розташованою на загальному розподільчому валу, що має крім шайб кулачні шайби, які керують відкриттям і закриттям робочих клапанів.

5.1.2 ПНВТ

Паливні насоси плунжерного типу з постійною величиною ходу плунжера. Регулювання подачі насосом палива здійснюється положенням відсічної кромки плунжера в кінці ходу нагнітання.

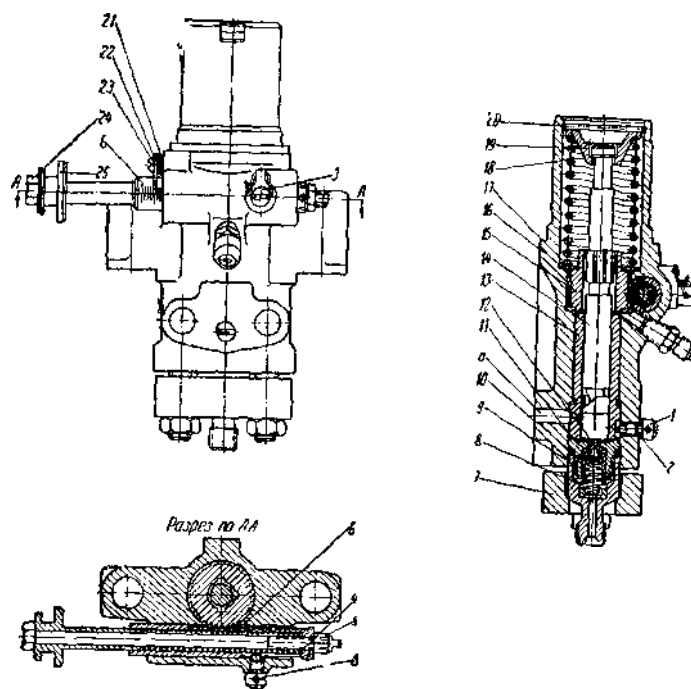


Рис. 5.3. Паливний насос:

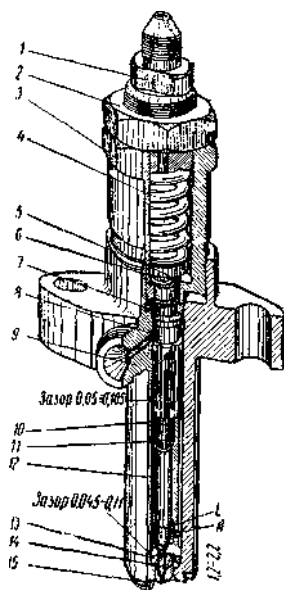
1 - стопорний гвинт гільзи плунжера; 2 - прокладка; 3 - стопорний гвинт рейки; 4 - пружина; 5 - гайка; 6 - регулювальна рейка; 7 - фланець; 8 - пружина клапана; 9 - натискний штуцер; 10 - прокладка клапана; 11 - сидло клапана; 12 - нагнітальний клапан; 13 - гільза поршень; 14 - плунжер; 15 - шестерня плунжера; 16 - корпус насоса; 17 - кільце пружини; 18 - пружина плунжера; 19 -

тарілка пружини; 20 - стопорне кільце; 21 - прокладка; 22 - стрілка; 23 - гвинт; 24 - регулювальний болт рейки; 25 - поводкова втулка рейки

Насоси встановлюються на дизелі у вертикальному положенні з напрямком нагнітання вниз. У зв'язку з цим загальноприйняті поняття верхньої та нижньої мертвих точок для цих насосів замінюються протилежними.

5.1.3 Форсунки

На дизелі встановлені форсунки закритого типу (рис. 5.5).



Основні деталі форсунки: розпилювач, сопловий наконечник, штовхач, щілинний фільтр, пружина, стакан пружини монтуються в сталевому корпусі 9. Розпилювач складається з корпусу 12, голки 11 і обмежувачі підйому голки 10.

Голка і корпус є прецизійної парою; деталі пари ретельно притираються між собою за циліндричної поверхні

Рис. 5.5. Форсунка: 1 - пробка; 2 - контргайка 3 - стакан пружини; 4 - пружина форсунки; 5 - тарілка пружини; 6 - штовхач; 7 - кільце; 8 - щілинний фільтр 9 - корпус форсунки; 10 - обмежувач підйому голки 11 - голка розпилювача; 12 - корпус розпилювача; 13 - сопловий наконечник; 14 і 15 - прокладки ущільнення.

Заміна однієї з деталей у цій парі не допускається. Деталі розпилювача виготовляються з високоякісних сталей: корпус розпилювача із сталі 18X2H4BA (ГОСТ 4543-57), голка - із сталі Р18 (ГОСТ 5952-51).

Корпус розпилювача установлюється в розточці корпусу форсунки з малим діаметральним зазором (0,045...0,110 мм), щоб виключити можливість його перекосу і деформації.

Пружина 4 форсунки (див. рис. 5.5) зтягнута на постійний початковий тиск впорскування палива 210 кг/см^2 , що забезпечує якісне розпилювання палива при подачі в циліндр. Сферичні поверхні штовхача 6 і тарілки 5 забезпечують співвісність деталей, усуваючи поява бічних зусиль на голку розпилювача. Величина зтягування пружини форсунки строго контролюється при виготовленні форсунки і в умовах експлуатації.

Щілинний фільтр 8, що представляє собою сталевий циліндричний стрижень, встановлений в корпусі форсунки з зазором $0,05 \dots 0,105 \text{ мм}$. Паливо може надходити до розпилювача тільки через зазор між фільтром і корпусом форсунки, а частинки механічних домішок великі за величиною, ніж зазор, затримуються фільтром. Чисте паливо проходить у порожнину А форсунки (див. рис. 5.5) і під його тиском на поверхню голки долається зусилля зтягування пружини і голка підводиться. Впорскування палива відбувається через три отвори розміром $0,56 \text{ мм}$ в сопловому наконечнику 13. Для нормальної роботи форсунки сопловий наконечник повинен виступати над торцем її корпусу на $1,2 \dots 2,2 \text{ мм}$. Величина підйому голки розпилювача встановлюється в межах $0,4 \dots 0,5 \text{ мм}$, регулюється товщиною обмежувача 10.

Стик між форсункою і камерою згоряння циліндра ущільнюється мідним кільцем (прокладкою 15).

Форсунки розраховані на тривалий строк служби, однак у профілактичних цілях необхідно перевіряти їх роботу на стенді через $6 \dots 8 \text{ тис. км}$ пробігу тепловоза.

Форсунки взаємозамінні, тобто можуть бути встановлені на будь-який циліндр дизеля. Тим не менше для стабільної роботи дизеля форсунки мають клейма, що визначають їх положення на кожному циліндрі. Рекомендується після зняття та перевірки форсунок встановлювати їх на свої місця.

5.1.4 Паливопідкачуючий насос

Паливопідкачуючий насос служить для підйому палива з бака, подолання втрат тиску в фільтрах і подачі палива до паливних насосів дизеля під тиском, що гарантує надійне заповнення їх надплунжерного простору, а та-

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		74

кож для забезпечення циркуляції палива в системі. Паливopідкачуючі насоси дизеля типу Д80 представляють собою швидкохідні шестеренні насоси з внутрішнім зачепленням.

Паливopідкачуючий насос такого типу (рис. 5.6) складається з чавунного корпусу 9 і кришки 10, що має серпоподібний виступ С. В кришку запресована вісь 11, на якій вільно обертається ведена (мала) шестерня 1. Ця шестерня входить у зачеплення із внутрішнім зубчастим вінцем 12, складає одне ціле з ведучим валиком 3, який з'єднаний з електродвигуном. Зовнішня циліндрична поверхня зубчастого вінця пришліфована в розточці корпусу, а вершини зубів нижньої поверхні серповидного виступу з кришкою.

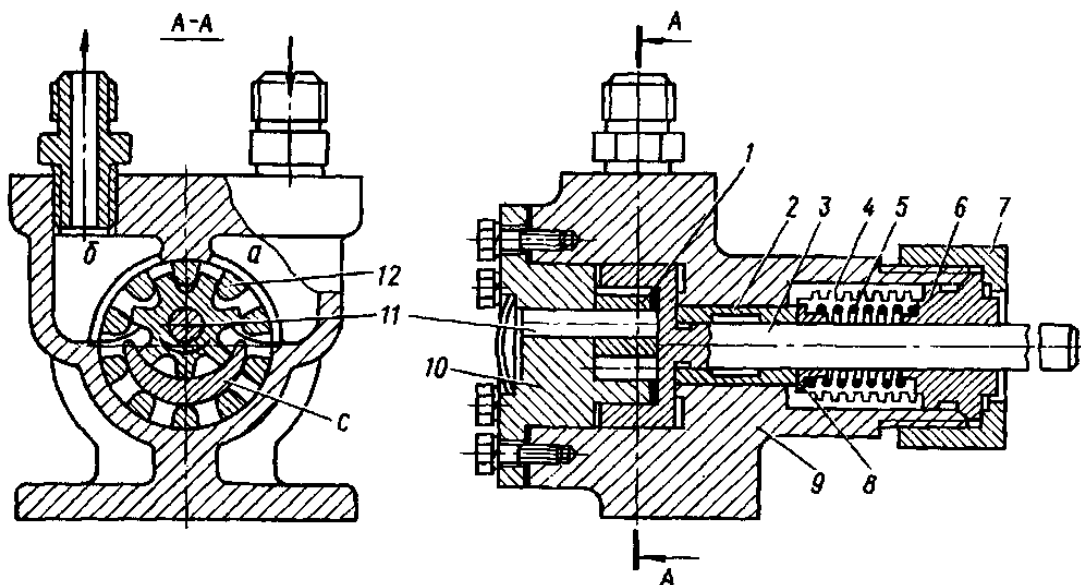


Рис. 5.6. Паливopідкачуючий насос

Паливо через штуцер надходить у порожнину а, заповнює западини між зубцями і при обертанні шестерень за годинниковою стрілкою, як показано на рис. 5.6, двома потоками: один між зубами малої шестерні 1 і верхньою поверхнею серповидного виступу з, інший – між нижньою поверхнею виступу з і циліндричною поверхнею розточення корпусу 9 надходить у порожнину б, а звідти – в нагнітальну магістраль паливної системи.

При випробуваннях насоса допускається просочування палива по ущільненню валика не більше однієї краплі в хвилину.

5.1.5 Паливні фільтри

Паливні фільтри служать для постійного очищення палива, необхідні для надійної експлуатації дизеля на тепловозі. В паливну систему дизеля зазвичай включають не менше трьох-чотирьох паливних фільтрів. Відповідно за призначенням їх можна розділити на фільтри попередньої, грубої і тонкої очистки.

Фільтри попередньої очистки розташовувані в горловинах паливних баків, затримують лише дуже великі частинки. Призначення цих фільтрів (сіток) – виключити можливість засмічення паливопроводів.

Фільтри грубого очищення затримують частинки розмірами крупніше 50...100 мкм. Фільтри тонкого очищення повинні надійно затримувати частинки розмірами більше 4...5 мкм.

Всі паливні фільтри, що застосовуються на тепловозних дизелях, складаються з двох основних частин: корпусу і фільтруючих елементів. Незалежно від конструкції фільтруючі елементи повинні мати мінімальний гідравлічний опір, бути компактними, простими, не вимагати складного догляду і служити досить довго. Природно, що матеріал фільтруючих елементів повинен бути недорогим.

Фільтри грубого очищення в паливній системі двигуна складаються з двох циліндричних корпусів, сполучених між собою загальною кришкою з триходовим краном. В кожному з корпусів розміщений фільтруючий елемент. В залежності від положення рукоятки крана можлива робота фільтра з паралельним включенням обох елементів або на будь-якому (правому або лівому) одному елементі. Нормальним режимом є робота на обох елементах (при вертикальному положенні рукоятки крана). Робота на одному елементі допускається лише при несправності іншого.

Проволочно-щілинні фільтруючі елементи фільтрів грубої очистки (рис. 5.7). Робочий елемент фільтра являє собою гофрований каркас циліндричної форми, на який намотаний щільно (виток до витка) в один шар латунний дріт трапецеїдального профілю. Зазори між витками дроту, розмір яких

складає 0,09 мм, і утворюють фільтруючу поверхню. Для збільшення площі цієї поверхні кожен елемент має два фільтруючих циліндра 2 і 4, зовнішній і внутрішній. Працюють вони паралельно, пропускаючи паливо з порожнини Б, утвореної ковпаком 3, і простором між циліндрами у внутрішню порожнину очищеного палива А, звідки паливо відводиться по каналу в центральному стрижні.

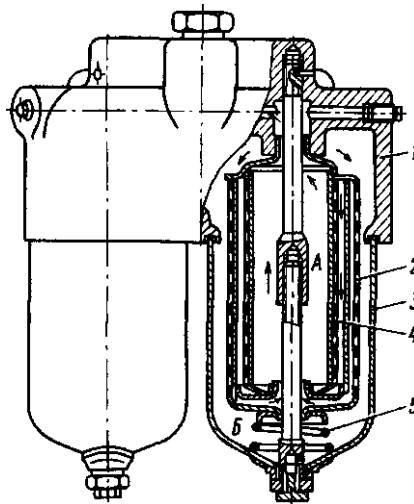


Рис. 5.7. Проволочно-щілинний фільтр грубої очистки

Фільтруючий елемент ущільнюється в корпусі 1 пружиною 5.

Фільтри тонкої очистки палива чотирьохсекційні. Секції фільтра об'єднані загальним чавунним корпусом.

5.1.6 Паливні трубки високого тиску

Паливна трубка високого тиску являє собою сталеву товстостінну трубку малого прохідного перерізу, на кінцях якої є з'єднання для кріплення трубки до ПНВТ і форсунки.

Розрахунок паливної системи двигуна типу 12ЧН 26/32

Циклова подача палива:

$$g_{\text{ц}} = \frac{g_e N_e \tau}{120 n_{\text{дв}} i} \text{ г/цикл,}$$

де $g_e = 0,196 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{год)}$ – питома витрата палива;

$N_e = 4080 \text{ кВт}$ – потужність двигуна;

$\tau = 4$ – коефіцієнт тактності;

$n = 1000$ об/хв – частота обертання колінчатого валу;

$i = 12$ – кількість циліндрів.

$$g_{\text{ц}} = \frac{0,196 \cdot 4080 \cdot 4}{120 \cdot 1000 \cdot 12} = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{ г/цикл.}$$

Запас палива

$$G_{\text{тт}} = [K_{\text{м}}(g_{\text{е}} N_{\text{е}})] \cdot 10^{-3}, \text{ т}$$

де $K_{\text{м}} = 1,1 - 1,2$ – коефіцієнт, який враховує можливе збільшення витрати палива;

$\tau = 20$ – час ходового режиму, годин;

$$G_{\text{т}} = [1,1 \cdot (0,196 \cdot 4080)] \cdot 10^{-3} = 0,88 \text{ т.}$$

Об'єм витратної цистерни

$$V = (G_{\text{п}} / \rho_{\text{п}}) K_1 K_2 \cdot 10^3, \text{ м}^3.$$

де $\rho_{\text{п}} = 830 \text{ кг/м}^3$ – щільність палива;

$K_1 = 1,01 \dots 1,05$ – коефіцієнт захащення цистерни;

$K_2 = 1,03 \dots 1,05$ – коефіцієнт, який враховує мертвий об'єм цистерни.

$$V = \frac{0,88}{830} \cdot 1,01 \cdot 1,03 \cdot 10^3 = 1,1 \text{ м}^3.$$

Продуктивність паливопідкачуючого насоса (ППН):

$$W_{\text{пн}} = K_3 N_{\text{е}} g_{\text{е}} / \rho_{\text{п}}, \text{ м}^3 / \text{год},$$

де $K_3 = 1,5 \dots 2$ – коефіцієнт запасу подачі палива.

$$W_{\text{пн}} = \frac{1,5 \cdot 4080 \cdot 0,196}{830} = 1,45 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Потужність привода ППН:

$$N = W_{\text{пн}} p K_4 \cdot 10^3 / (3600 \eta), \text{ кВт},$$

де, $p = 0,5 \text{ МПа}$ – тиск нагнітання;

$K_4 = 1,1 \dots 1,5$ – коефіцієнт запасу потужності;

$\eta = 0,6 \dots 0,7$ – ККД ППН.

$$N = \frac{1,45 \cdot 0,5 \cdot 1,5}{3600 \cdot 0,7} \cdot 10^3 = 0,43 \text{ кВт.}$$

Площа поверхні фільтруючих елементів:

$$F_{\phi} = W_{\text{пн}} / (3600 \nu_{\text{т}} K_{\text{ж.п}}) \text{ м}^2,$$

де $\nu_{\text{т}} = 0,02 \dots 0,05 \text{ м/с}$ – швидкість фільтрації;

$K_{\text{ж.п}} = 0,2 \dots 0,3$ – коефіцієнт живого перетину.

$$F_{\phi} = \frac{1,45}{3600 \cdot 0,02 \cdot 0,2} = 0,1 \text{ м}^2.$$

5.2 Масляна система

Масляна система (система мащення) дизеля на тепловозі виконує кілька функцій. Головна з них – підтримання необхідного тиску масла для забезпечення режиму рідинного тертя в підшипниках колінчастого валу і інших тертьових вузлах дизеля, а також для можливості змащення його циліндро-поршневої групи.

Крім того, масляна система служить для охолодження поршнів дизеля і відведення теплоти, що утворюється при терті, від змащення вузлів дизеля і його агрегатів, а також для видалення з робочих поверхонь тертьових вузлів дизеля продуктів їх зносу.

Для виконання цих функцій масляна система повинна бути замкнутою, циркуляційною. Вона складається з внутрішньої масляної системи дизеля і зовнішньої системи, яка забезпечує циркуляцію, охолодження і очищення масла.

5.2.1 Опис масляної системи

Насправді, насос дизеля має витрату $210 \text{ м}^3/\text{ч}$. Так як в масляну систему заливається приблизно 1585 кг масла ($1,76 \text{ м}^3$), то весь об'єм масла за годину перекачується $210/1,76 = 120$ разів. Таким чином, все коло циркуляції масло проходить пів хвилини. При такій інтенсивній циркуляції в олії з часом відбуваються різні фізико-хімічні процеси, які погіршують властивості («старіння» масла).

5.2.2 Класифікації масляної системи

- Система з примусовою подачею масла до споживача нагнітається спеціальним насосом.

За кількістю сортів масла – одномасляна система.

- В одномасляних системах для всіх споживачів двигуна використовується один сорт масла.

- В залежності від особливостей змащення поверхні циліндра система з організованою подачею масла.

У системах з організованою подачею масла підведення мастила на поверхню втулки циліндра здійснюється через спеціальні свердління в циліндрі і систему маслопроводів. Масло може надходити із загальної магістралі (в одномасляних системах) або від спеціального насоса, лубрикатора. В останньому випадку масло на поверхню циліндра надходить не постійно, а періодично – в моменти, коли поршень знаходиться в контакті з маслопідвідним каналом.

- За особливостями збору масла в картері двигуна система з мокрим картером. В системах змащення з мокрим картером піддон (або фундаментна рама) служить в якості цистерни, в якій знаходиться масло.

5.2.3 Складові системи

- Масляний насос. Для циркуляції мастила під тиском у системі дизеля на передній стінці опорної плити насосів встановлений масляний шестерневий насос (рис. 5.8). Насос приводиться в обертання від колінчастого валу через еластичну шестеренну передачу і зубчастий повідець 8, посаджений на шліцах провідної шестерні 2.

Масло заповнює западини між зубами шестерень і переноситься при роботі насоса з порожнини усмоктування в порожнину нагнітання Я, звідки надходить у систему змащення. Розвантажувальний пристрій 11 захищає внутрішній торець плити 10 і торець шестерні 2 від задирака за рахунок розвантаження від осьового зусилля тиску масла, що надходить у порожнину М з порожнини нагнітання Я. Масло, потрапляє в порожнину Я кришки 12, зли-

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		80

вається по каналу До в корпус опорної плити. Для забезпечення вільного обертання робочих шестерень масляного насоса передбачений торцевий зазор між торцем шестерень і торцем плити, рівний 0,2...0,4 мм, радіальний між циліндричними поверхнями стінок корпусу і вершиною головки зуба 0,325 мм. Сумарний бічний зазор 0,25...0,6 мм. Значення зазначених зазорів впливає на подачу масляного насоса. Подача насоса 210 м³/год і тиск 0,5 МПа (5 кгс/см²).

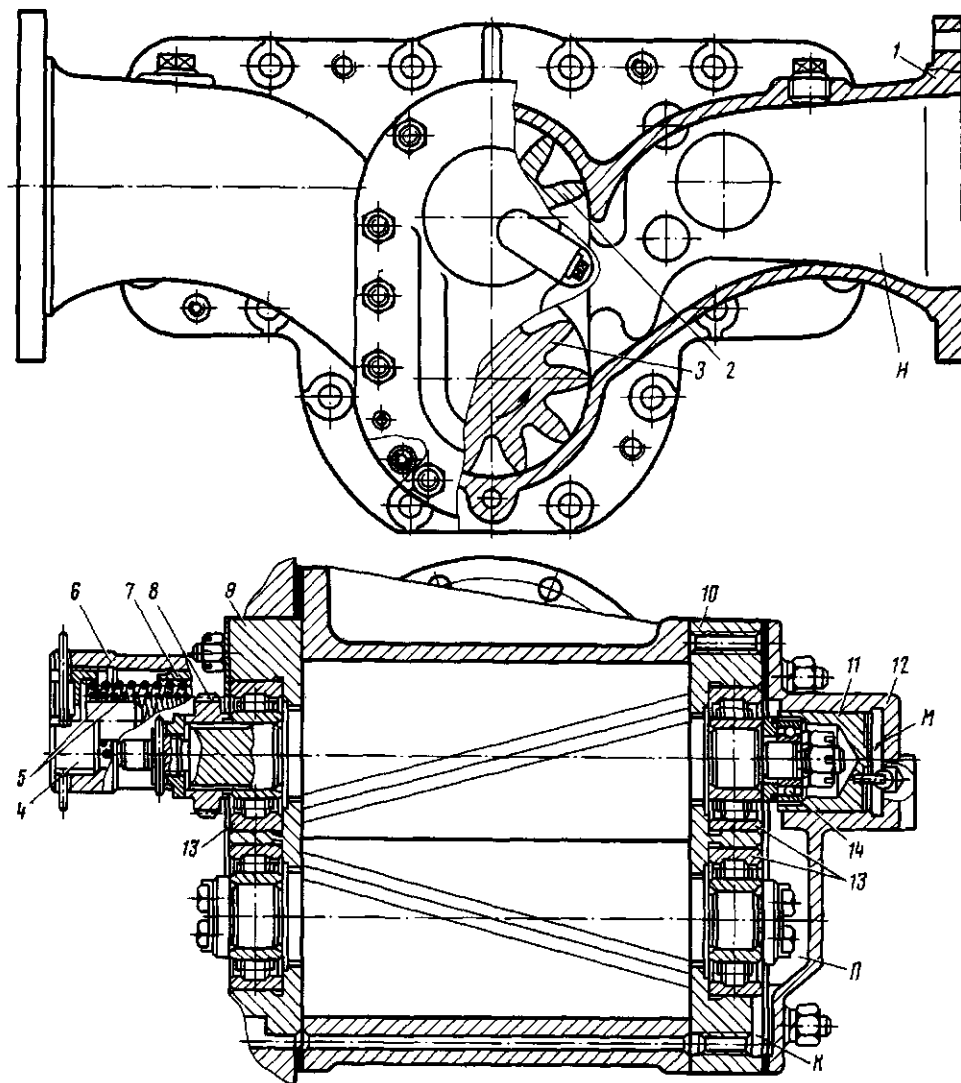


Рис. 5.8. Масляний шестерневий насос

Для запобігання надмірного підвищення тиску масла в системі на внутрішньому торці корпусу насоса встановлений поршень 7 редукційного клапана, притискується до сидла пружиною 5. Затягування пружини регулюється

гайкою, яка кантується шплінтом. Редукційний клапан регулюється на тиск 0,55...0,57 МПа (5,5...5,7 кгс/см²).

- Масляний фільтр грубого очищення. Фільтр грубої очистки встановлений на масляному трубопроводі тепловоза перед входом масла в нижній масляний колектор двигуна, він служить для очищення від механічних домішок масла, що надходить у дизель. Фільтр складається із сталевго корпусу, розділеного горизонтальною перегородкою на дві частини. У корпусі виконано 10 гнізд для установки в них секцій фільтрів.

- Масляний фільтр тонкого очищення. Фільтр тонкого очищення масла служить для безперервного, паралельно з фільтром грубого очищення, тонкого очищення масла спеціальними фільтрувальними пакетами; в яких навитий фільтрувальний папір з поставкою картону. Тонкість фільтрації становить 20 мкм.

- Відцентровий фільтр масла. Фільтр встановлений на кронштейні, закріпленому на люку з правої сторони блока дизеля. Дія відцентрового масляного фільтра заснована на тому, що він обертається з великою частотою, внаслідок виникнення при цьому відцентрової сили, важкі сторонні частинки, що містяться в маслі, відкидаються до зовнішніх стінках ротора фільтра і відкладаються на них. Для обертання ротора фільтра використовується реактивна дія струменів масла, яка виливається з великою швидкістю з двох діаметрально встановлених в роторі соплових наконечників. Для додання струменям масла необхідної швидкості вона підводиться спеціально насосом, створюючи при цьому високий тиск 0,8...1,0 МПа.

- Теплообмінник встановлений безпосередньо на дизелі. Складається з циліндричного корпусу, всередині якого розміщено пучок мідних трубок. Трубки об'єднані трубними решітками (дошками).

Решітка затиснута між корпусом і кришкою. Трубки розвальцьовані і приварені до трубних решіток. На пучок труб надіта ущільнювальна сталева сорочка товщиною 1 мм. У кришці виконані перегородки, які розділяють потік охолоджувальної води на два ходи.

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		82

Розрахункова частина

1. Мощность главного двигателя, кВт $N_e = 4080$
2. Удельный расход топлива, кг/(кВт*ч) $g_e = 0.196$

3. Количество теплоты трения, отводимой маслом, кДж/ч
Доля теплоты трения, принята маслом

Лежит в диапазоне $\alpha_{тр}=0.4-0.45$, принимаем

$$\alpha_{тр} = 0.42$$

Механический КПД двигателя

$$\eta_M = 0.88$$

$$Q_{тр} = 3600 \cdot \alpha_{тр} \cdot N_e \cdot \left[\left(\frac{1}{\eta_M} \right) - 1 \right] = 3600 \cdot 0.42 \cdot 4080 \cdot \left(\frac{1}{0.88} - 1 \right) = 841222.0$$

4. Проток в контуре масла для отвода теплоты трения, м³/ч

Теплоемкость, кДж/(кг*К)

$$c_M = 2.05$$

Плотность, кг/м³

$$\rho_M = 900$$

Допустимая разность температур, °C

$$\Delta t_M = 10$$

$$W_1 = \frac{Q_{тр}}{(c_M \cdot \rho_M \cdot \Delta t_M)} = \frac{841222.0}{2.05 \cdot 900 \cdot 10} = 45.59$$

5. Поток масла в контуре охлаждения поршней, м³/ч

Доля теплоты отводимая от поршней

Лежит в диапазоне $\alpha_{тр}=0.04-0.05$, принимаем

$$\alpha_{о.п} = 0.05$$

Теплота сгорания топлива, кДж/ч

Лежит в диапазоне $Q_p=40000-43000$, принимаем

$$Q_p = 42664.4$$

Теплота, отведенная от поршней, кДж/ч

$$Q_{о.п} = \alpha_{о.п} \cdot g_e \cdot N_e \cdot Q_p = 0.05 \cdot 0.196 \cdot 4080 \cdot 42664.4 = 1.705893e6$$

$$W_2 = \frac{Q_{о.п}}{(c_M \cdot \rho_M \cdot \Delta t_M)} = \frac{1.705893e6}{2.05 \cdot 900 \cdot 10} = 92.46$$

6. Подача циркуляционного масляного насоса, м³/ч

Коэффициент запаса подачи

$$k_W = 1.53$$

$$W_{MH} = k_W \cdot (W_1 + W_2) = 1.53 \cdot (45.59 + 92.46) = 211.2$$

7. Необходимый запас циркуляционного масла, кг

Кратность циркуляции, 1/ч

$$K_{ц} = 120$$

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
						83
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Подача циркуляционного насоса, м³/ч

$$G_{\text{сист}} = \frac{W_{\text{мн}}}{K_{\text{ц}}} = \frac{211.2}{120} = 1.76$$

$$G_{\text{цм}} = G_{\text{сист}} \cdot \rho_{\text{м}} = 1.76 \cdot 900 = 1584$$

8. Коэффициент загромождения картера элементами конструкции

$$K_1 = 1.04$$

Коэффициент учитывающий мертвый объем картера

$$K_2 = 1.05$$

Вместимость картера для хранения запаса масла, м³

$$V_{\text{м}} = \frac{G_{\text{цм}} \cdot K_1 \cdot K_2}{\rho_{\text{м}}} = \frac{1584 \cdot 1.04 \cdot 1.05}{900} = 1.92$$

9. Рекомендуемое время работы самоочищающегося сепаратора в сутки, ч

$$\tau_{\text{с}} = 10$$

Рекомендуемая частота сепарации масла, сут.⁻¹

$$K = 2$$

Суммарная пропускная способность сепараторов, м³

$$W_{\text{пзс}} = \frac{V_{\text{м}}}{\tau_{\text{с}}} \cdot K = \frac{1.92}{10} \cdot 2 = 0.384$$

10. Температура масла после подогревателя, °С

$$t_{2\text{м}} = 85$$

Температура масла в картере, °С

$$t_{1\text{м}} = 45$$

Коэффициент теплопередачи, кДж/(м²·ч·К)

$$K_{\text{ТП}} = 500$$

Температура насыщенного пара, поступающего в подогреватель, °С

$$t_{\text{см}} = 170$$

Средняя разница температур между насыщенным паром и маслом, °С

$$\Delta t_{\text{м.}} = t_{\text{см}} - \frac{t_{2\text{м}} + t_{1\text{м}}}{2} = 170 - \frac{85 + 45}{2} = 105$$

Количество одновременно работающих сепараторов

$$n_{\text{с}} = 1$$

Коэффициент, учитывающий загрязнение поверхности отложениями

$$k_3 = 1.2$$

Площадь теплопередающей поверхности подогревателя масла перед сепаратором, м²

$$F_{\text{пс}} = \frac{W_{\text{пзс}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t_{2\text{м}} - t_{1\text{м}}) \cdot \rho_{\text{м}}}{K_{\text{ТП}} \cdot \Delta t_{\text{м.}} \cdot n_{\text{с}}} \cdot k_3 = \frac{0.384 \cdot 2.05 \cdot (85 - 45) \cdot 900}{500 \cdot 105} \cdot 1.2 = 0.648$$

11. Мощность, потребляемая насосом, кВт

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
						84
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Напор насоса, м

$$H_H = 4$$

К.П.Д насоса

$$\eta_H = 0.75$$

$$N_{цн} = 0.272 \cdot \frac{W_{мн} \cdot H_H \cdot \rho_M}{\eta_H} \cdot 10^{-5} = 0.272 \cdot \frac{211.2 \cdot 4 \cdot 900}{0.75} \cdot 10^{-5} = 2.757$$

12. Площадь фильтрующей поверхности фильтра грубой очистки, м²

Скорость фильтрации, м/с

$$v_M = 0.05$$

Коэффициент живого сечения

$$K_{жс.} = 0.2$$

$$F_{фго} = \frac{W_{мн}}{3600 \cdot v_M \cdot K_{жс.}} = \frac{211.2}{3600 \cdot 0.05 \cdot 0.2} = 5.867$$

13. Удельная пропускная способность материала, из которого выполнен фильтрующий элемент, м³/(м²*ч)

$$q_{\phi} = 1.2$$

Площадь поверхности фильтра тонкой очистки, м²

$$F_{фто} = \frac{W_{мн}}{q_{\phi}} = 176$$

14. Коэффициент теплопередачи, кДж/(м²*ч*К)

$$k_{ТП} = 1400$$

Коэффициент загрязнения холодильника

$$k_3 = 1.2$$

Температуры охлаждающей жидкости на входе и выходе из охладителя масла, °С

$$t_1 = 80 \quad t_2 = 95$$

Температурный напор, °С

$$\Delta t_H = \frac{t_{1м} + t_{2м}}{2} - \frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{45 + 85}{2} - \frac{80 - 95}{2} = 72.5$$

Площадь теплопередающей поверхности маслоохладителя, м²

$$F_M = \frac{Q_{тр} + Q_{о.п.}}{k_{ТП} \cdot \Delta t_H} \cdot k_3 = 30.114$$

5.3 Система охлаждения

При згорянні палива в циліндрі дизеля температура газів досягає 1500...1600 °С і відповідно зростає температура дотичних з ним деталей: по-

ршня, втулки циліндра, та ін. Якщо не охолоджувати ці деталі, то температура їх підвищиться настільки, що вони можуть вийти з ладу. Щоб температура деталей не перевищувала допустимі межі, деталі необхідно охолоджувати.

На тепловозі застосовується замкнута система охолодження водою, має суттєві переваги перед проточною, що застосовується в деяких стаціонарних і суднових установках. Ця система дозволяє працювати на високому температурному режимі (температура води на виході з дизеля 90...95 °С), що підвищує економічність двигуна.

Як відомо, кількість води, яка потрібна для охолодження, залежить від температурного перепаду (різниця температури, що входить і виходить з двигуна). Великий температурний перепад, пов'язані з поданням малої кількості води, а, отже, малій швидкості її руху, призводить до значної нерівномірності температури в сорочці втулки циліндра (вода холодна біля входу і гаряча біля виходу). Тому бажано мати таку систему охолодження, в якій завжди забезпечувалася б необхідна витрата води і скорочувалася б різниця температури між виходом і входом (практично різниця в 5...7 °С, а рівень температури 75...85 °С незалежно від навантаження).

Застосування водяних насосів з великою подачею забезпечує майже сталу швидкість води на всіх режимах. Крім того, температура охолодження води в холодильнику тепловоза регулюється зміною частоти обертання вала вентилятора охолоджуючого повітря (отже, кількість повітря), що досягається застосуванням багатоступеневих редукторів. Саме така система охолодження використовується на тепловозному дизелі Д80. Циркуляційна, примусова, відкритого типу з розширювальним баком, що виключає утворення повітряних або парових мішків в трубопроводах.

5.3.1 Склад системи

Функціонально система охолодження складається з таких підсистем: водяних насосів, охолоджувачів, розширювальної цистерни, регуляторів, трубопроводів.

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		86

Призначення водяних насосів – забезпечення безперервного руху (циркуляції) охолоджуючої води в системі.

Охолоджувачі призначені для відводу надлишкової теплоти, яка міститься в охолоджуваній рідині і наддувному повітрі в повітря.

Розширювальна цистерна служить для компенсації зміни об'єму води в системі внаслідок зміни її температури, для поповнення втрат води в системі з-за витоків і випаровування, а також видалення з системи повітря й водяних парів.

Регулятори повинні автоматично підтримувати температуру води, а також охолоджувальних рідин в заданому діапазоні.

Трубопроводи слугують для транспортування води.

5.3.2 Класифікація системи

Система охолодження двигуна класифікуються за такими ознаками:

- за кількістю водяних контурів;
- по температурному рівню охолоджуючої води;
- за напрямом руху охолоджуючої води в двигуні.

За кількістю водяних контурів систем є одноконтурною. В такій системі використовується холодна вода, яка прокачується насосом через порожнини охолодження двигуна, охолоджувачі робочих рідин і потім повертається.

Залежно від температурного рівня води, що відводить теплоту від нагрітих деталей двигуна, системи є помірно температурної. Системи з помірним рівнем температури (70...95 °C).

За напрямом руху охолоджуючої води в двигуні система є з природним напрямком потоку води. Охолоджуюча вода підводиться до нижньої порожнини охолодження, піднімається вгору у міру підвищення температури і відводиться з двигуна в його верхній частині.

Розрахункова частина

1. Общее количество воды в системе, м³

$$V_v := 2$$

Коэффициент температурного расширения воды в интервале температур от 8 до 90 °С;

$$\beta := 0.00043$$

Приращение температуры при работе двигателя (принимается $\Delta t = 50-70$ °С);

$$\Delta t := 70$$

Коэффициент запаса

$$k_3 := 2$$

Объем расширительного бака, м³

$$V_{p6} := 2V_v \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot k_3 = 0.241$$

2. Эффективная мощность двигателя, кВт

$$N_e := 4080$$

Доля теплоты, отводимой в охлаждающую воду от рабочих цилиндров

$$\alpha_{nv} := 0.2$$

Удельный эффективный расход топлива двигателем, кг/(кВт*ч)

$$g_e := 0.196$$

Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг

$$Q_{np} := 42664.4$$

Количество теплоты, отводимой пресной водой от цилиндров, кДж/ч

$$Q_{nv} := \alpha_{nv} \cdot g_e \cdot N_e \cdot Q_{np} = 0.2 \cdot 0.196 \cdot 4080 \cdot 42664.4 = 6823573.478$$

3. Теплоемкость пресной воды, кДж/(кг*К)

$$c_{nv} := 4.19$$

Плотность пресной воды, кг/м³

$$\rho_{nv} := 1000$$

Перепад температур при охлаждении цилиндров, °С

$$\Delta t_{nv} := 9$$

Коэффициент запаса подачи насоса

$$K_{\Pi} := 1.15$$

Подача циркуляционного насоса пресной воды, м³/ч

$$W_{nv} := \frac{Q_{nv} \cdot K_{\Pi}}{c_{nv} \cdot \rho_{nv} \cdot \Delta t_{nv}} = 208.091$$

4. Температура воды на входе в теплообменник, °С

$$t_1 := 95$$

Температура воды на выходе из теплообменник, °С

$$t_2 := 70$$

Температура воздуха на входе в теплообменник, °С

$$t_3 := 40$$

Температура воздуха на выходе из теплообменника, °С

$$t_4 := 80$$

$$\Delta t_{cp} := \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{t_3 + t_4}{2} = 22.5$$

5. Коэффициент теплопередачи от пресной воды воздуху, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К})$

$K_B := 4000$

Площадь теплопередающей поверхности водо-водяного теплообменника, м^2

$$F_{ov} := \frac{Q_{nv}}{K_B \cdot \Delta t_{cp}} = 75.817$$

5.4 Система повітропостачання і газовідводу

Система повітропостачання призначена для подачі в циліндри дизеля достатньої кількості чистого повітря, необхідного для спалювання впорскуваного палива, а також для його продувки. На сучасних тепловозах застосовуються тільки дизелі з наддувом. Це означає, що в циліндри подається повітря, попередньо стиснене компресором. Повітряний заряд циліндрів відповідно зростає, що дає можливість подати і спалити в циліндрах значно більшу кількість палива і отримати в результаті більшу потужність при тих же розмірах двигуна. Сукупність пристроїв, що забезпечують подачу в циліндри двигуна необхідної кількості повітря із заданими тиском і температурою, називається системою повітропостачання.

Функціонально система газовідводу (газовихлопу) покликана забезпечити найбільш раціональне відведення відпрацьованих газів в циліндрі.

Під раціональним відведенням розуміється така організація газовихлопу, яка сприяє максимальному використанню енергії робочого тіла в циліндрі двигуна, так і поза його межами, а також якісного очищення і наповнення циліндрів. Крім того, необхідно забезпечити мінімальний по шкідливості вплив на навколишнє середовище відпрацьованих газів.

5.4.1 Склад системи

Функціонально система повітропостачання у загальному випадку складається з таких підсистем: компресорів, теплообмінників, колектора, повітропроводів.

Призначенням компресорів є підвищення щільності повітря за рахунок стиснення та його переміщення.

В теплообмінниках щільність стисненого повітря змінюється за рахунок зміни його температури.

Колектор служить для забезпечення рівномірної подачі повітря в усі циліндри двигуна.

Повітроводи призначені для транспортування повітря.

Функціонально система газовідводу складається з таких підсистем: випускних колекторів, утилізаційних газових турбін, утилізаційних котлів, глушників шуму, газоводу (трубопроводів).

Випускні колектори призначені для відведення відпрацьованих газів з циліндрів з максимально можливим збереженням їх енергії. При цьому вони повинні сприяти очищенню циліндра від залишкових газів.

Призначенням утилізаційних газових турбін є перетворення в крутний момент механічної енергії відпрацьованих газів в циліндрах.

Утилізаційні котли покликані перетворити теплову енергію відпрацьованих газів в енергію пари.

Глушники шуму призначені для зниження шкідливого звукового впливу відпрацьованих газів на навколишнє середовище.

Газоводи служать для транспортування відпрацьованих газів.

5.4.2 Класифікація системи

Класифікація систем повітропостачання здійснюється за такими ознаками:

- по числу ступенів стиснення повітря;
- за кількістю компресорів;
- за кількістю теплообмінників та їх призначенням;
- за способом зміни параметрів повітря, що надходить у циліндр.

Система наддуву – двоступенева, з охолодженням наддувочного повітря; перша ступінь – відключаємий привідний відцентровий нагнітач з системою керування муфтою і заслінками; друга ступінь – турбокомпресор. Для

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		90

обмеження максимального тиску згоряння передбачений випуск в атмосферу частини наддувного повітря за допомогою золотникового пристрою, керованого тиском в ресивері.

За способом зміни параметрів повітря, що надходить у циліндр, двигун з нерегульованими системами повітропостачання параметри наддувного повітря змінюються мимовільно при зміні зовнішніх умов.

Класифікація систем газовідводу.

Класифікація систем газовідводу здійснюється за такими ознаками: по глибині утилізації теплоти; за наявності глушителів шуму.

- По глибині утилізації теплоти системи поділяються на системи без утилізації теплоти, системи з помірною утилізацією теплоти і системи з глибокою утилізацією теплоти.

У системах без утилізації теплоти відпрацьовані в циліндрах газу відводяться в навколишнє середовище без попередньої протікання через пристрої – утилізатори.

У системах з помірною утилізацією теплоти механічна енергія відпрацьованих газів в циліндрах використовується в газових турбінах або ежекторах.

У системах з глибокою утилізацією теплоти як механічна, так і теплова енергія відпрацьованих газів в циліндрах використовується в пристроях - утилізаторах.

- За наявності глушників шуму системи газовідводу діляться на системи з глушниками шуму випуску і на системи без глушників шуму випуску.

Розрахункова частина

Продуктивність компресора знаходимо із умови витрати повітря через двигун для номінального режиму:

$$G = \pi \frac{D^2}{4} S \frac{P_s}{RT_s} \eta_i i \frac{1}{\chi} \frac{n}{60} \varphi_a (1 - \psi) \text{ кг/с,}$$

де, $D = 0,26 \text{ м}$ – діаметр циліндра;

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		91

$S = 0,32$ м – хід поршня;

$R = 287$ Дж/(кг·К) – універсальна газова стала для повітря;

$i = 12$ – кількість циліндрів;

$\chi = 2$ – коефіцієнт тактності;

$n = 1000$ об/хв. – частота обертання КВ;

$\phi_a = 1,25$ – коефіцієнт продувки;

$\psi = 0$ – доля ходу поршня втрачена на газообмін;

$P_s = 0,98 \cdot P_{\text{оПк}}$ МПа – тиск повітря в ресивері;

$T_s = T_k - \eta_{\text{ох}} (T_k - T_{\text{в1}})$ К – температура повітря в ресивері;

$\eta_n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_s} \frac{T_s}{T_a} \frac{1}{1 + \gamma_r}$ – коефіцієнт наповнення;

$$G = \pi \frac{D^2}{4} S \frac{P_s}{RT_s} \eta_n i \frac{1}{\chi} \frac{n}{60} \phi_a (1 - \psi) = 9,356 \text{ кг/с.}$$

Розрахунок газовідвідної труби:

$$d_r = 3,18 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{g_e N_e (\alpha_\Sigma L_0' + 1) T_r}{p_r v_r}} \text{ м,}$$

де $g_e = 0,196$ кг/(кВт·год) – питома витрата палива;

$N_e = 4080$ кВт – ефективна потужність двигуна;

$\alpha_\Sigma = 2,0 \dots 2,7$ – сумарний коефіцієнт надлишку повітря. Приймаємо:

$\alpha_\Sigma = 2,0$;

$L_0' = 14,3$ кг/кг – теоретично необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг палива;

$T_r = 592$ К – температура газів за турбіною;

$p_r = 0,103 \dots 0,107$ МПа – тиск в газопроводі при допустимій швидкості газу

$v_r = 40 \dots 50$ м/с. Приймаємо: $p_r = 0,107$ МПа, $v_r = 50$ м/с.

$$d_z = 3,18 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{0,196 \cdot 4080 \cdot (2 \cdot 14,3 + 1) \cdot 592}{0,107 \cdot 50}} = 0,51$$

Розрахунок ізоляції

					КРБ.142.2227ст.07.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		92

$$d_{u3} = x d_n \text{ м,}$$

де d_n – зовнішній діаметр газоходу, мм;

x знаходимо з рівняння:

$$y = x \ln x = \frac{2\lambda_{u3}}{\alpha_2 d_n} \frac{t_n - t_{u3}}{t_{u3} - t_b}$$

де $\lambda_{u3} \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ кДж/(м·год·К) – коефіцієнт теплопровідності совелита або вермикуліту при $t_{cep} \approx 573$ К;

$\alpha_2 \approx 3,6 \cdot 10^{-3}$ кДж/(м²·год·К) – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ізоляції до повітря;

$t_{u3} = 333$ К – температура на поверхні ізоляції;

$t_b = 313$ К – температура повітря;

$t_n \approx 573$ К – температура потоку газу.

$$y = x \ln x = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{3,6 \cdot 10^{-3} (110 + 6)} \frac{573 - 333}{333 - 313} = 0,029$$

Виводимо з рівняння x , і отримуємо:

$$x = 1,029,$$

$$d_{из} = 1,029 \cdot (0,28 + 0,006) \approx 0,29 \text{ м.}$$

5.5 Висновок по розділу

Розглянуто паливну, масляну, систему охолодження і повітропостачання та газовипуску. Складені принципові схеми зазначених систем, визначені основні параметри елементів систем. Визначено запас палива з урахуванням 20 годинного режиму роботи двигуна, визначено кількість масла і охолоджуючої рідини у відповідних системах.

Виконані розрахунки систем дозволяють оцінити об'єми, які необхідно передбачити в машинному відділенні судна для розміщення самих систем і їх елементів.

Розділ 6

Організація охорони праці в машинному відділені судна

Охорона праці є комплексною системою, яка включає законодавчі акти, соціально-економічні, організаційні, технічні, гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи і засоби. Її основна мета полягає в забезпеченні безпеки, збереженні здоров'я і підтриманні працездатності людини під час виконання праці.

Важливо зазначити, що абсолютно безпечних і нешкідливих умов у виробництві не існує. Основним завданням охорони праці є мінімізація ризику травматизму та захворювань серед працівників, забезпечуючи при цьому їхній комфорт і максимальну продуктивність праці.

Реальні умови виробництва зазвичай характеризуються наявністю певних небезпечних і шкідливих факторів, які можуть впливати на здоров'я працівників. Це можуть бути хімічні речовини, фізичні чинники (шум, вібрація, радіація), біологічні агенти (мікроорганізми), психофізіологічні чинники (психічний стрес, надмірна фізична напруга тощо). Завдяки системі охорони праці вживаються заходи для контролю, мінімізації або усунення цих факторів з метою збереження здоров'я та підвищення загальної безпеки на робочому місці.

Задача охорони праці полягає в створенні системи організаційних заходів і технічних засобів для запобігання або зменшення впливу шкідливих виробничих факторів на працюючих. До таких заходів відносяться гігієна праці (область профілактичної медицини, що вивчає умови збереження здоров'я на виробництві, і заходу, що сприяють цьому). Санітарна техніка (заходи і пристрої технічного характеру, що відносяться до виробничої санітарії – системи і пристрою вентиляції, опалення, кондиціонування повітря, теплопостачання, газопостачання, водопостачання, каналізації, очищення і нейтралізації викидів шкідливих речовин в атмосферу і водойми, висвітлення, захисти людини

					КРБ.142.2227ст.07.06.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		94

від вібрацій, шуму, дії шкідливих випромінювань, санітарні і побутові спорудження і пристрої, будівельна теплотехніка, будівельна кліматологія і т. ін.).

Машинне відділення (МВ), через свою природу, є об'єктом підвищеної небезпеки через наявність різного устаткування і механізмів. Воно підпадає під контроль охорони праці через значну кількість потенційно небезпечних і шкідливих факторів, які можуть включати механічні ризики, хімічні речовини, термічні навантаження, шум, вібрацію та інші негативні впливи на здоров'я працівників. Охорона праці в МВ включає в себе розробку і впровадження заходів безпеки та гігієни, щоб забезпечити безпечні умови праці для всіх працівників цього відділення. До числа цих факторів відносяться:

- машини, що рухаються, і механізми, частини устаткування;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- підвищена запиленість і загазованість;
- освітленість;
- підвищений рівень шуму.

Розглянемо по окремої кожний з вище перерахованих небезпечних і шкідливих факторів.

Безпека виробничого устаткування забезпечується правильним вибором принципів його дії, кінематичних схем, конструктивних рішень (у тому числі форм корпусів, складальних одиниць і деталей), робочих тіл, параметрів робочих процесів, використанням різних засобів захисту. Останні по можливості повинні вписуватися в конструкцію машин і агрегатів. Засоби захисту повинні бути, як правило, багатофункціонального типу, тобто вирішувати кілька задач одночасно. Так, конструкції машин і механізмів, станин верстатів повинні забезпечувати не тільки огороження небезпечних елементів, але і зниження рівня їхнього шуму і вібрації, огороження абразивного кола заточувального верстата повинне конструктивно сполучатися із системою місцевої витяжної вентиляції.

Небезпечна зона визначається як простір, де може існувати небезпека впливу на працюючого через наявність небезпечних або шкідливих виробничих факторів. Ця небезпека зазвичай пов'язана з рухомими елементами обладнання. Особлива увага приділяється випадкам можливого захоплення одягу або волосся працюючого частинами рухомого устаткування.

Загороджувальні засоби захисту призначені для того, щоб запобігти потраплянню людини в небезпечну зону. Вони використовуються для ізоляції систем приводу машин і агрегатів, зон обробки матеріалів, огороження струмоведучих частин, зон інтенсивних випромінювань (теплових, електромагнітних, іонізуючих), а також для обмеження доступу до зон виділення шкідливих речовин у повітряне середовище.

Ці заходи призначені для забезпечення безпеки працівників і мінімізації ризиків у робочих умовах.

Вібрація – це коливальний рух точки або механічної системи, який характеризується почерговим зростанням і зменшенням координати в часі. Цей феномен може виникати з різних причин, головною з яких є наявність невра- вноважених силових впливів під час роботи машин і агрегатів.

Невра- вноважені сили можуть мати різне джерело:

Зворотно-поступальні системи: наприклад, кривошипно-шатунні механізми двигунів внутрішнього згоряння або інші механізми, де рух обертання перетворюється в поступальний рух і навпаки.

Невра- вноважені обертові маси: деякі деталі або вузли машин мають неоднорідності в масі або формі, що призводить до нерівномірного розподілу маси вздовж осі обертання.

Ударні взаємодії деталей: наприклад, зубцюваті зачеплення, робота підшипникових вузлів, де ударні взаємодії можуть викликати коливання.

Дисбаланс може бути викликаний різними факторами:

Неоднорідність матеріалу: нерівномірність матеріалу в обертових тілах може призвести до нерівномірного розподілу маси.

Розбіжність центра маси і осі обертання: коли центр маси тіла не співпадає з його осі обертання.

Деформація деталей: деформація через нерівномірне нагрівання або охолодження, що може виникати при гарячих і холодних посадках.

Основною задачею щодо вібрацій є контроль і мінімізація їх впливу на працюючих, що досягається за допомогою використання спеціальних технічних рішень, які зменшують чи усувають невідновлювані сили та викликані ними коливання.

Вплив вібрацій на людину переважно пов'язаний з коливаннями, що виникають через зовнішні силові впливи на машину або окрему її систему. Ці коливання можуть бути спричинені не лише силовими, але й кінематичними порушеннями.

Розрізняють два типи вібрацій: загальну і локальну. Загальна вібрація викликає струс у всьому організмі, тоді як локальна втягує в коливальний рух окремі частини тіла. У машинному відділенні переважає загальна вібрація, але працівники також можуть ділитися під впливом локальних вібрацій при використанні ручного електричного чи пневматичного інструменту. У деяких випадках працівники можуть одночасно відчувати ефекти як загальної, так і локальної вібрації.

Такі умови можуть спричинити віброхворобу, яка відноситься до групи професійних захворювань. Ефективне лікування віброхвороби можливе лише на ранніх стадіях. Відновлення порушених функцій відбувається дуже повільно, а в особливо важких випадках можуть відбутися необоротні зміни в організмі, що призводять до інвалідності.

Відповідно до ДСТ 12.1.012-78 «Система стандартів безпеки праці. Вібрація, загальні вимоги безпеки» установлені припустимі значення.

Гігієнічні норми щодо обмеження вібрацій встановлені для тривалості робочої зміни 8 годин і регулюються величиною логарифмічного рівня коливальної швидкості в октавних діапазонах зі середньгеометричними значеннями 2, 4, 8, 16, 32, 63 Гц, а норми по обмеженню локальної вібрації – в окта-

вних смугах частот зі середньгеометричними значеннями 16, 32, 63, 125, 250, 500, 1000 Гц.

Високий рівень електромагнітних випромінювань. Джерелами електромагнітних полів є: атмосферна електрика, радіовипромінювання від сонця і галактик, статичні і змінні електричні і магнітні поля Землі, а також штучні джерела, такі як електротермічні установки з машинними генераторами, клістри, магнетронні генератори тощо.

Серед штучних джерел можна відзначити індуктори, конденсатори термічних установок з ламповими генераторами (потужність яких зазвичай коливається від 8 до 200 кВт), фідерні лінії, що з'єднують окремі частини генераторів, трансформатори, антени, фланцеві з'єднання волноводних трактів, відкриті кінці хвилеводів та генератори високих частот.

Джерелами постійних магнітних полів є електромагніти, соленоїди, імпульсні установки полуперіодного або конденсаторного типу, а також литі і металокерамічні магніти.

Електромагнітне поле, створене цими джерелами, характеризується постійним розподілом у просторі і здатністю поширюватися зі швидкістю світла. Воно впливає на заряджені частки і струми, що призводить до перетворення енергії поля в інші види енергії.

Вплив електромагнітних полів на людину залежить від таких факторів, як напруженість електричного і магнітного полів, потік енергії, частота коливань поля, розмір поверхні тіла, що опромінюється, а також індивідуальні особливості організму.

Електромагнітне поле впливає на організм людини через кілька механізмів, що можуть мати серйозні наслідки для здоров'я. В електричному полі атоми і молекули в тілі людини поляризуються, що означає, що вони розподіляються у напрямку поширення поля. Особливо полярні молекули, наприклад вода, орієнтуються у напрямку поля.

У рідких електролітах, які є частинами тканин, таких як кров, після впливу зовнішнього поля можуть виникати іонні струми. Це викликає нагрі-

					КРБ.142.2227ст.07.06.ПЗ	Лист
						98
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

вання тканин людини як через змінну поляризацію діелектриків, таких як сухожилля і хрящі, так і через появу струмів провідності. Тепловий ефект виникає через поглинання енергії електромагнітного поля.

Надмірна теплота може призводити до перевищення меж терморегуляції організму. Зокрема, коли напруженість поля перевищує значення близько 10 мікроватт на квадратний сантиметр (10 МВт/см^2), відоме як тепловий поріг, організм вже не може ефективно відводити утворену теплоту. Це може призвести до підвищення температури тіла, що може негативно вплинути на здоров'я.

Таким чином, важливо контролювати рівні електромагнітних полів у робочих та житлових приміщеннях, особливо в контексті великих напружень і тривалості впливу, щоб уникнути негативних наслідків для людського здоров'я.

Електромагнітні поля мають значний вплив на органи людини, особливо на ті, які містять велику кількість води. Перегрів є особливо шкідливим для тканин зі слаборозвиненою судинною системою або з недостатнім кровообігом, таких як очі, мозок, бруньки, шлунок, жовчний міхур і сечовий міхур, оскільки кровоносна система може бути уподібнена системі водяного охолодження. Опромінення очей може викликати помутніння кристалика (катаракту), яка може проявитися не відразу, а через кілька днів чи тижнів після впливу.

Електромагнітні поля впливають на тканини людини як біологічні об'єкти при інтенсивності, що значно нижчій за тепловий поріг. Вони можуть змінювати орієнтацію кліток або ланцюгів молекул відповідно до напрямку силових ліній електричного поля, впливати на біохімічну активність білкових молекул, порушувати функції серцево-судинної системи і обміну речовин. Важливо зазначити, що ці зміни мають оборотний характер: достатньо припинити опромінення, і хворобливі явища зазвичай зникають.

Вплив постійних магнітних і електростатичних полів на організм залежить від їхньої напруженості і тривалості впливу. При перевищенні допус-

тимих значень напруженості розвиваються порушення в роботі нервової, серцево-судинної, дихальної і травної систем, а також в біохімічних показниках крові.

Основним параметром, який визначає біологічну дію електромагнітного поля промислової частоти, є електрична напруженість. Магнітна складова цих полів не має помітного впливу на організм, оскільки в межах діючих установок напруженість магнітного поля промислової частоти не перевищує 25 А/м, тоді як шкідливі наслідки виявляються лише при значеннях 150...200 А/м.

Електричне поле промислової частоти впливає на людину шляхом його взаємодії з мозком та центральною нервовою системою. Крім біологічного впливу, воно спричиняє можливість електричних розрядів між людиною і металевими об'єктами з іншим потенціалом, що може призвести до виникнення судом.

Гранично припустимі значення напруженості електромагнітного поля на робочих місцях та в місцях перебування персоналу, що мають професійний контакт із цими полями, не повинні перевищувати певних встановлених значень протягом робочого дня:

По електричній складовій				
F, МГц	0,06...3,0	3,0...30,0	30,0...50,0	50,0...300,0
E, У/м	50	20	10	5
По магнітній складовій				
F, МГц	0,06...1,5		30,0...50,0	
H, А/м	5		0,3	

Підвищена запиленість і загазованість. Однією з ключових умов для забезпечення здорової та продуктивної праці є збереження чистоти повітря та нормальних метеорологічних умов у робочій зоні. Це важливе завдання національного значення, яке потребує комплексного підходу. Необхідно ефективно вирішувати питання усунення впливу таких шкідливих факторів виробництва, як газу і пари, пил, надлишкова теплота і вологість, одночасно з вирішенням основних виробничих завдань.

Атмосферне повітря у своєму складі містить (% по обсязі): азоту – 78,08; кисню – 20,95; аргону, неону й інших інертних газів – 0,93; вуглекислого газу – 0,03; інших газів – 0,01. Повітря такого складу найбільш сприятливе для подиху.

Поряд з хімічним складом повітря важливий його іонний склад. У повітрі присутні негативні і позитивні іони, які рухаються з різною швидкістю. Важкі іони утворюються, коли легкі іони осідають на частки, такі як порошини чи краплі туману. У чистому повітрі переважають легкі іони, тоді як у забрудненому — важкі.

Негативні іони кисню у повітрі сприяють позитивному впливу на організм людини. Проте робочі зони часто не мають такого чистого хімічного складу повітря через викидання шкідливих речовин у процесі виробництва — пари, газів, твердих і рідких часток.

Пари і гази утворюють з повітрям суміші, а тверді і рідкі частки речовини – дисперсні системи – аерозолі, що поділяються на пил (розмір твердих часток більш 1 мкм), дим (менш 1 мкм) і туман (розмір рідких часток менш 10 мкм).

Шкідливі речовини найчастіше потрапляють в організм людини через дихальні шляхи, а також можуть проникати через шкіру та з їжею. Більшість цих речовин відноситься до небезпечних виробничих факторів, оскільки вони можуть мати токсичний вплив на організм людини. Ці речовини добре розчиняються в біологічних середовищах і можуть взаємодіяти з ними, що призводить до порушень нормальної життєдіяльності. Отруєння від таких речовин може виникати внаслідок тривалого чи інтенсивного впливу. Небезпека отруєння залежить від типу речовини, її концентрації, тривалості експозиції та індивідуальних характеристик організму людини.

З основних забруднень, що можуть бути присутнім у МВ – вуглеводні, сірчаний і сірчистий ангідрид, у концентрації вище ГДК роблять виражену дію на організм людини.

За ДСТ 12.1.005-76 установлені ГДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони, для деяких з них приведені в таблиці. Тут клас небезпеки: 1-й – надзвичайно небезпечні, 2-й – високо небезпечні, 3-й – помірковано небезпечні, 4-й – малобезпечні, агрегатні стани, А – аерозолі, П – пари чи газу.

Речовина	Величина ГДК	Клас небезпеки	Агрегатний стан
Двоокис азоту	0,085	1	П
Сажа (кіптява)	0,15	1	А
Сірчистий ангідрид	0,5	1	П
Хлор	1,0	2	П
Окис вуглецю	3,0	2	П
Соляна кислота	5	2	П
Окис заліза	5,5	4	А
Ацетон	200	4	П

Освітленість. Ефективна організація освітлення на заводах машинобудівної промисловості є ключовою для забезпечення нормальної виробничої діяльності. Важливість цього аспекту полягає в тому, що він безпосередньо впливає на здоров'я очей, стан центральної нервової системи та загальну безпеку на робочому місці.

Частина електромагнітного спектра з довжинами волі 10...340000 нм називається оптичною областю спектра, що поділяється на інфрачервоне випромінювання з довжинами хвиль 340000...770 нм, видиме випромінювання 770...380 нм, ультрафіолетове випромінювання 380...10 нм. У межах видимої частини спектра випромінювання різної довжини хвиль викликають різні світлові і колірні відчуття: від фіолетового (400 нм) до червоного (750 нм) кольорів. Найбільша чутливість зору до випромінювання з довжиною хвилі 555 нм (жовто-зелений колір) і зменшується до границь видимого спектра.

Освітлення на робочих місцях машинобудівних відділень включає кількісні і якісні аспекти. Кількісні показники, такі як світловий потік, сила світла, освітленість і яскравість, визначаються у люменах і відображають не лише фізичну, але й фізіологічну величину, засновану на зоровому сприйнятті.

У машинобудівних відділеннях застосовується штучне освітлення. Нерівномірне освітлення може призводити до змін у рівнях освітленості на різних робочих поверхнях, що викликає стомлювання органів зору через часту преадаптацію зору при перемиканні погляду з освітленої на менш освітлену поверхню. Наявність тіней на робочих місцях та блискітків від відбивання світла від устаткування створюють несприятливі умови для роботи органів зору.

Загальне освітлення, яке забезпечує рівномірний розподіл світла на всіх робочих поверхнях, сприяє зниженню стомленості органів зору та покращує робочі умови. При аварійному освітленні освітленість робочих поверхонь повинна бути не менш 25 % установлених для робочого освітлення норм, а на сходінках трапа і проходах – не менш 5лм. Норми освітленості регламентуються діючими нормами штучного висвітлення на судах морського флоту ДСТ 2506-81. У МВ загальне освітлення згідно цих норм повинне бути не менш 20 лм, на шкалах приладів – 75 лм, на сходінках – 20 лм.

Запобігання впливу шуму на виробничий персонал. Шум – це будь-який небажаний для людини звук. Під звуком ми розуміємо коливання, що поширюються хвилеподібно у твердому, рідкому чи газоподібному середовищі. Такі коливання виникають через вплив на середовище зовнішніх сил, які порушують його стаціонарний стан. Це призводить до коливань часток середовища відносно їхнього положення рівноваги, і швидкість цих коливань значно менша за швидкість поширення звукової хвилі..

Звукове поле – це область простору, у якій поширюються звукові хвилі. У кожній точці звукового поля тиск і швидкість руху часток повітря змінюються в часі. Різниця між миттєвим значенням повного тиску і середнім тиском, що спостерігається в необуреному середовищі, називається звуковим тиском. Одиниця виміру звукового тиску – Па. На слух діє середній квадрат звукового тиску.

У практиці боротьби з шумом важливо мати справу з величинами звукового тиску і інтенсивності звуку, які можуть значно коливатися: звуковий

тиск може змінюватися до 105 разів, а інтенсивність звуку - до 1016 разів. Однак людське вухо сприймає не абсолютні значення цих величин, а їх відносні зміни. Відчуття людини від різних видів роздратувань, включаючи шум, пропорційні логарифму енергії подразника. Це призвело до використання логарифмічних шкал для вимірювання рівнів звукового тиску та інтенсивності звуку.

Вухо людини може сприймати як чутні тільки ті коливання, частоти яких знаходяться в межах від 20 Гц до 20 кГц. Нижче 20 Гц і вище 20 кГц знаходяться відповідно області нечутних людиною інфра- і ультразвуку.

У дизельних установках основними джерелами шуму є головні дизельні двигуни. Найбільш інтенсивним є шум аеродинамічного походження, який виникає через взаємодію потоків повітря з навколишньою атмосферою на вході в двигун і на виході з нього через випускні газы. Основним джерелом шуму в дизелях є шум усмоктування, який генерується турбонагнітачем.

Для зниження рівня шуму у дизельних установках застосовуються різноманітні методи, але основним і ефективним вважається використання глушителів шуму. Глушители призначені для поглинання і розсіювання звукової енергії, що генерується двигуном і турбонагнітачем, що дозволяє значно знизити загальний рівень шуму від дизельної установки.

У системах вентиляції МКВ на усмоктуванні встановлюють в основному активні глушители з декількома шарами звукоізолюючого матеріалу, що у діапазоні частот від 300 до 5000 Гц дозволяють зменшити рівень шуму на 20...35 дБ.

В системи газовідводу ДУ включають глушники-іскрогасники. Утилізаційні парогенератори є гарними глушниками шуму й іскрогасниками. Рівень шуму знижується на 12...15 дБ. Для зниження повітряного шуму використовують звукоізолюючі кожухи, що знижують рівень шуму на 10...15 дБ. Для зниження механічного шуму необхідно зменшити зазори між деталями і вузлами.

Висновки по роботі

В кваліфікаційній роботі було виконано розрахунок робочого циклу двигуна типу 12ЧН 26/32, за результатами якого отримано основні параметри робочого циклу і побудована теоретична індикаторна діаграма.

Основна частини роботи полягала в розрахунку та проектуванні відцентрового насосу системи охолодження двигуна, який повинен забезпечувати роботу системи і двигуна на номінальному режимі роботи за будь-яких кліматичних умов, а також на всіх можливих режимах експлуатації. Розрахунок відцентрового насосу виконувався на підставі методики, яка існувала на кафедрі ДВЗ, У та ТЕ НУК. На підставі цієї методики були повністю сконструйовані і розроблена конструкція насосу, яка представлена на кресленні.

Спроектований насос системи охолодження забезпечує такі можливості: розхід рідини $Q = 100 \text{ м}^3/\text{год}$, яку спроможний всмоктувати з висоти 5,4 м; ККД насоса $\eta = 0,707$; насос споживає 17,7 кВт енергії при 2500 хв⁻¹; на виході з насоса рідина має швидкість 4,0 м/с.

У роботі також розглянуті основні системи, які забезпечують роботу двигуна, а також виконаний аналіз заходів забезпечення вимог охорони праці в машинному відділенні, проведено дослідження шкідливих факторів від роботи дизельних двигунів.

					КРБ.142.2227ст.07.ПЗ	Лист
						105
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Список використаної літератури

1. Суднові двигуни внутрішнього згоряння : Підручник / В. С. Наливайко, Б. Г. Тимошевський, С. Г. Ткаченко. – Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2015. – 332 с.
2. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників. Т. 4. Основи САПР ДВЗ / За ред. проф. А.П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ “ХПІ”, 2004. – 428 с.
3. Мошенцев Ю. Л. Проектування відцентрового насосу: Методичні вказівки / Ю. Л. Мошенцев, О. А. Гогоренко. – Миколаїв: НУК, 2009. – 52 с.
4. Кондусь В. Ю. Лопатеві насоси: навчальний посібник / В. Ю. Кондусь, О. І. Котенко. – Суми: Сумський державний університет, 2021. – 293 с.
5. Герасимов Г. Г. Гідравлічні та аеродинамічні машини: Підручник / Г. Г. Герасимов. – Рівне: НУВГП, 2008. – 241 с.
6. Омельченко О. В. Гідравлічні машини: навч. посіб. / О. В. Омельченко, О. О. Цвіркун. – Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2020. – 100 с.
7. Свиридов В. І. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Суднові допоміжні механізми» (спеціальність 135 «Суднобудування», освітньо-професійна програма «Суднові енергетичні установки та устаткування», галузь знань 13 «Механічна інженерія») / В. І. Свиридов, І. В. Калініченко. – Миколаїв : НУК, 2021. – 84 с.
8. Мандрус В. І. Гідравлічні та аеродинамічні машини (насоси, вентилятори, газодуви, компресори): Підручник. – Львів: “Магнолія плюс”, видавець В. М. Піча, 2004. – 340 с.
9. Закон України «Про охорону праці» // Відомості Верховної Ради України, 1992, № 49, ст. 668.
10. Винокурова Л. Е. Основи охорони праці: Підручник для проф.-техн. навч. закладів / Л. Е. Винокурова, М. В. Васильчук, М. В. Гаман. – К. : Вікторія, 2001. – 192 с.

					КРБ.142.2227ст.07.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		106