

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

Кафедра двигунів  
внутрішнього згоряння,  
установок та технічної  
експлуатації

«Допущений до захисту»  
Завідувач кафедри  
Олексій ГОГОРЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ МАЛООБЕРТОВОГО  
ДВИГУНА ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ФОРСУНОК

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Освітня програма – Двигуни внутрішнього згоряння

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи

Здобувач освіти

Аркадій ПРОСКУРІН

Андрій ХІМОРОДА

Миколаїв 2025

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми

 Олексій ГОГОРЕНКО

«    »      20     року

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

Хіморода Андрій Григорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення паливної економічності малообертового двигуна шляхом вдосконалення конструкції форсунок

2. Керівник роботи к.т.н., доц. Проскурін А.Ю.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “    ”      20     року №    

3. Строк подання здобувачем роботи     

4. Вихідні дані до роботи Двигун – MAN B&W 6G50ME-C9.5; паливо – метанол, HFO; потужність двигуна – 9600 кВт, частота обертання колінчастого валу – 100 хв<sup>-1</sup>

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

Застосування двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5 на танкері "MARI COUVA";  
Сучасні напрямки вдосконалення конструкції форсунок суднових двигунів;  
Вдосконалення конструкції форсунок двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5;  
Забезпечення вимог охорони праці; Економічне обґрунтування

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

Загальний вигляд танкера "MARI COUVA"; Поперечний переріз двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5; Схема системи подачі метанолу у циліндр двигуна; Паливна форсунка. Вид А; Паливна форсунка. Вид Б

## 7. Консультанти розділів роботи

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

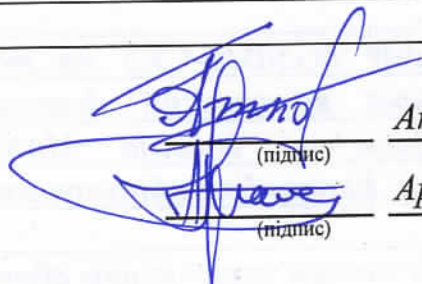
8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач освіти

Керівник роботи



(підпис)

Андрій ХІМОРОДА

(прізвище та ініціали)

Аркадій ПРОСКУРІН

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній розроблений комплекс заходів щодо підвищення паливної економічності суднового двигуна шляхом вдосконалення конструкції форсунок. Розглянуто економічне обґрунтування. Наведені заходи щодо забезпечення охорони праці.

Кваліфікаційна робота виконана українською мовою на 66 сторінках розрахунково-пояснювальної записки. Використано 9 джерел. Графічна частина представлена на 5 кресленнях формату А1.

*Ключові слова:* судновий двигун, метанол, форсунка, клапан.

The qualification work presents a set of measures to improve the fuel efficiency of ship engines by improving the design of injectors. The economic justification was considered. Measures to ensure occupational safety are also provided.

The qualification work is executed in Ukrainian language on 66 pages of explanatory note. 9 sources are used. The graphic part is presented on 5 drawings of format A1.

*Key words:* marine engine, methanol, injector, valve.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 2     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## ЗМІСТ

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Вступ.....</b>                                                                           | <b>4</b>  |
| <b>Розділ 1. Застосування двигуна MAN B&amp;W 6G50ME-C9.5 на танкері "MARI COUVA".....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Розділ 2. Сучасні напрямки вдосконалення конструкції форсунок суднових двигунів.....</b> | <b>15</b> |
| <b>Розділ 3. Вдосконалення конструкції форсунок двигуна MAN B&amp;W 6G50ME-C9.5.....</b>    | <b>23</b> |
| <b>Розділ 4. Економічне обґрунтування.....</b>                                              | <b>52</b> |
| <b>Розділ 5. Забезпечення вимог охорони праці.....</b>                                      | <b>56</b> |
| <b>Висновки.....</b>                                                                        | <b>64</b> |
| <b>Список використаної літератури.....</b>                                                  | <b>66</b> |
| <b>Додаток А. Загальний вигляд танкера "MARI COUVA".....</b>                                | <b>67</b> |
| <b>Додаток Б. Поперечний переріз двигуна MAN B&amp;W 6G50ME-C9.5.....</b>                   | <b>68</b> |
| <b>Додаток В. Схема системи подачі метанолу у циліндр двигуна.....</b>                      | <b>69</b> |
| <b>Додаток Г. Паливна форсунка. Вид А.....</b>                                              | <b>70</b> |
| <b>Додаток Д. Паливна форсунка. Вид Б.....</b>                                              | <b>71</b> |

## ВСТУП

Актуальність удосконалення конструкції форсунок малообертових дизельних двигунів зумовлена зростаючими вимогами до паливної економічності та зниження викидів шкідливих речовин у сучасному судноплавстві. Поліпшення параметрів упорскування дає змогу забезпечити більш повне згоряння палива, зменшити витрати палива та підвищити теплову ефективність двигуна. Сучасні конструкції форсунок повинні забезпечувати стабільну роботу при високих тисках упорскування, агресивності важкого палива та змінних навантаженнях, характерних для морських силових установок. Важливим є також підвищення надійності та довговічності форсунок, оскільки їх відмова призводить до порушення роботи всього двигуна та зростання експлуатаційних витрат. Тому інженерні рішення, спрямовані на оптимізацію геометрії розпилювача, покращення матеріалів і впровадження систем тонкого керування подачею палива, залишаються одним із ключових напрямів розвитку сучасних малообертових ДВЗ.

Мета даної роботи – розробити умови по поліпшенню паливної економічності головного двигуна танкера "MARI COUVA" шляхом вдосконалення конструкції форсунок.

Задачі що вирішуються у роботі:

1. Аналіз сучасних конструкцій форсунок, які встановлюються в судових двигунах.
2. Вдосконалення конструкції форсунок, працюючих на метанолі.
3. Оцінка запропонованих рішень, технічні рекомендації та заходи з техніки безпеки.

**Об'єкт дослідження** – паливні форсунки головного двигуна.

**Предмет дослідження** – експлуатаційні характеристики роботи форсунок.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 4     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

**РОЗДІЛ 1**  
**ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА MAN B&W 6G50ME-C9.5 НА**  
**ТАНКЕРІ "MARI COUVA"**

Побудоване компанією Hyundai Mipo, судно «MARI COUVA» (рис. 1.1 – 1.2, табл. 1.1) було передане замовнику в серпні 2019 року та стало першим із чотирьох танкерів другої генерації для перевезення метанолу, призначених для канадської компанії Methanex (дочірня фірма Waterfront Shipping). «MARI COUV»А і «MARI КОКАКО» (вересень 2019 року) належать спільному підприємству WFS і Marinvest; Takaroa Sun (серпень 2019 року) належить NYK, а Creole Sun (вересень 2019 року) – спільному підприємству IINO та Mitsui.

Судно створене на основі стандартного проєкту Hyundai Mipo – танкера дедвейтом 49 000 т із розмірами корпусу: довжина 183,06 м, ширина 32,2 м та осадка 13,32 м. Вони мають 18 вантажних танків і два відстійні танки, які також можуть використовуватися для зберігання метанолу як палива. Вантажні насоси виробництва Framo забезпечують подачу 600 м³/год для основних танків і 300 м³/год для відстійних. На верхній палубі встановлено приміщення для системи подачі метанольного палива.

Waterfront уже експлуатувала сім подібних метанол-паливних суден, побудованих у 2016–2017 роках, які відрізняються від «MARI COUVA» та її «сестер» тим, що оснащені двигунами попереднього покоління. Нові судна обладнані двигуном MAN B&W 6G50ME-C9.5-LGIM-HPSCR, а не версією B9. Основні відмінності між цими двигунами стосуються паливних ліній.

Використання метанолу як палива дає змогу суднам відповідати вимогам ІМО 2020 щодо вмісту сірки, оскільки метанол узагалі не містить сірки. Mari Couva оснащена високотисковою системою SCR для відповідності нормам NO<sub>x</sub> Tier III, але судно може бути модернізоване, оскільки новий двигун здатний працювати на метанолі з додаванням до 40% води.

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>KPM.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 5     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |



Рисунок 1.1 – Танкер «MARI COUVA»

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>KPM.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 6     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |



Це підвищує частку горючого водню та знижує температуру згоряння, що зменшує утворення NO<sub>x</sub> до рівня, за якого SCR уже не потрібен. Система SCR залишатиметься необхідною лише під час роботи на нафтових паливах.

Оскільки метанол має нижчий вміст вуглецю, його використання як палива забезпечує індекс EEDI = 4,21, що значно нижче від нормативного значення 5,6.

Таблиця 1.1 – Головні характеристики судна [1].

| Параметр                                                                                                                                                                           | Значення  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Класифікаційне товариство та позначення:<br>DNV GL, +1A, танкер для нафтопродуктів і хімікатів, ESP, CSR, IMO Ship Type 2, E0, TMON, ETC, CLEAN, VCS(2), LFL FUELLED, BWM(T), LCS. |           |
| ІМО номер                                                                                                                                                                          | 9848584   |
| MMSI                                                                                                                                                                               | 257080210 |
| Позивний борту                                                                                                                                                                     | LAVL5     |
| Довжина максимальна, м                                                                                                                                                             | 183,00    |
| Довжина між перпендикулярами, м                                                                                                                                                    | 175,15    |
| Ширина, м                                                                                                                                                                          | 32,20     |
| Конструктивна висота до головної палуби, м                                                                                                                                         | 19,10     |
| Ширина подвійного борту, м                                                                                                                                                         | 2,00      |
| Проектна осадка, м                                                                                                                                                                 | 11,00     |
| Дедвейт, т                                                                                                                                                                         | 49700     |
| Швидкість судна, вуз                                                                                                                                                               | 14,50     |
| Об'єм баластних цистерн, м <sup>3</sup>                                                                                                                                            | 22400     |
| Об'єм цистерн важкого палива, м <sup>3</sup>                                                                                                                                       | 2600      |
| Об'єм цистерн дизельного палива, м <sup>3</sup>                                                                                                                                    | 200       |

## Опис двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5

MAN B&W 6G50ME-C9.5 – це шестициліндровий, малообертовий, двотактний морський дизельний двигун із електронно-керованою системою упорскування палива серії ME. Він призначений для головних енергетичних установок танкерів, балкерів та контейнеровозів із середнім діаметром циліндра 500 мм і ходом поршня близько 2500 мм. Двигун забезпечує високу питому потужність, низьку витрату палива та здатність працювати на важких паливних оліях завдяки оптимізованому процесу згоряння. Електронне керування дає змогу точно регулювати кут випередження впорскування, тиск уприскування та профіль циклу, що сприяє зменшенню викидів  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$  та покращенню економічності.

Зміна цін на паливо в поєднанні з ужорсточенням екологічних вимог щодо викидів створили потребу в двухпаливних двигунах.

Двигун MAN B&W 6G50ME-C9.5 є двопаливним для роботи на метанолі та/або важкому паливі, які впорскуються в двигун у рідкій формі [2]. Функціональність розроблена як додатковий модуль до електронно керованого двигуна серії ME.

Для роботи на двох видах палива необхідно впорскування запального палива (для ініціювання згоряння) та метанолу в камеру згоряння.

Для впорскування метанолу та запального палива використовуються різні типи форсунок.

Допоміжні речовини, необхідні для роботи в двопаливному режимі та в режимі роботи лише на важкому паливі:

- Метанол
- Запальне паливо (важке паливо, що подається існуючою паливною системою двигуна ME)
- Керувальне масло для керуючого блока
- Ущільнююче масло для змащування рухомих частин FBIV і для відокремлення метанолу від керувального масла.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 9     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

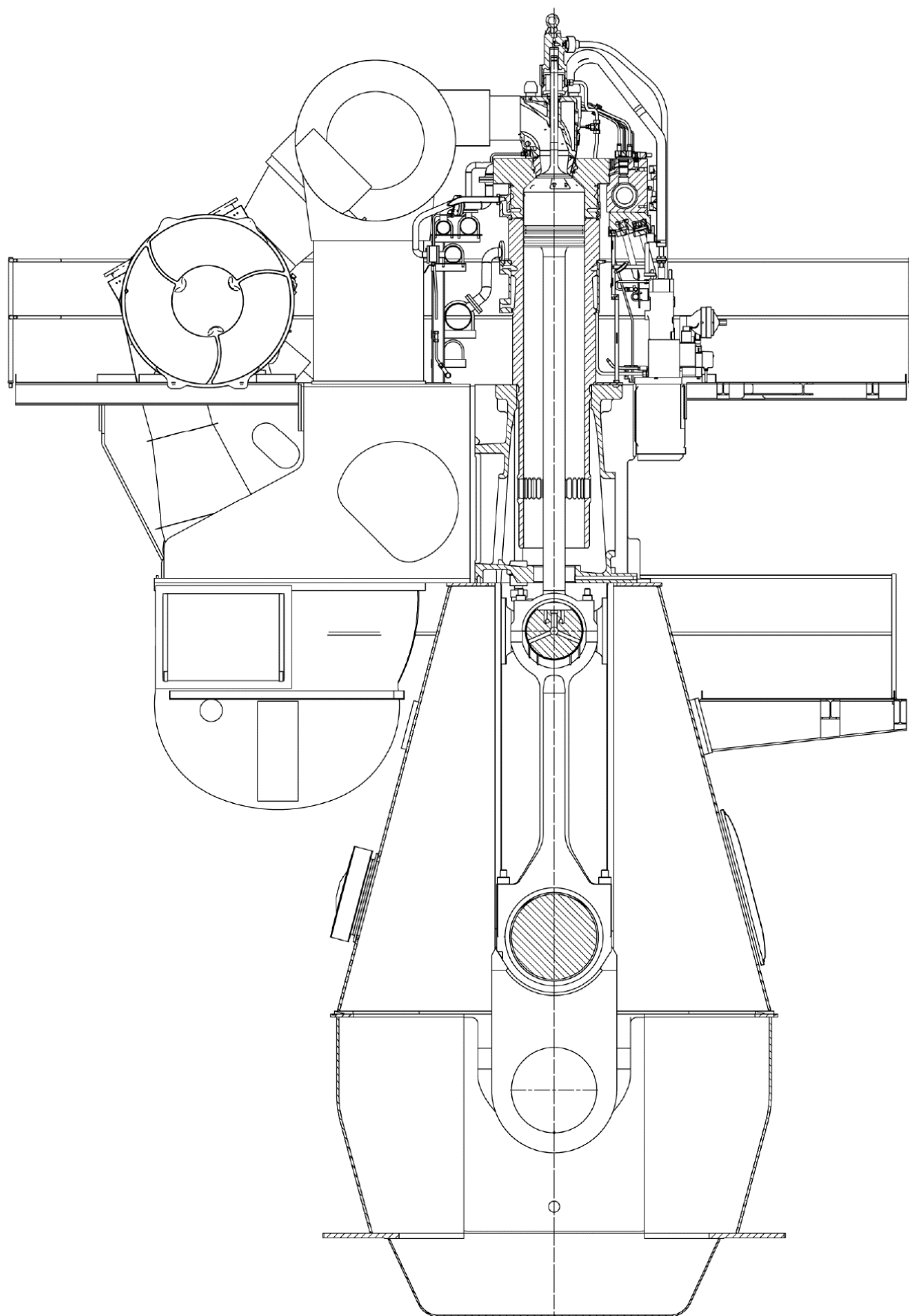


Рисунок 1.3 – Поперечний переріз MAN B&W 6G50ME-C9.5

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

*KPM.142.6221м.25.24.00.ПЗ*

Аркуш

10

Однією з головних переваг двигуна 6G50ME-C9.5 є його паливна гнучкість. Концепція керування передбачає два режими роботи:

- Двопаливний режим із мінімальною кількістю запального важкого палива
- Стандартний режим роботи лише на важкому паливі.

Двопаливний режим використовується під час роботи на метанолі. Його можна увімкнути тільки вручну оператором на головній панелі керування.

Режим роботи лише на важкому паливі є стандартним для двигунів серії ME.

Концепція двигуна ME включає гідравлічно-механічну систему для приводу паливного упорскування та випускних клапанів. Приводи керуються електронно за допомогою кількох блоків керування, що формують повну систему управління двигуном.

Компанія MAN B&W спеціально розробила як апаратне забезпечення, так і програмне, щоб отримати інтегроване рішення для системи керування двигуном.

Підіймач тиску палива складається з простого плунжера, який приводиться в дію гідравлічним поршнем, активованим тиском масла. Тиск масла регулюється електронно керованим пропорційним клапаном.

Випускний клапан відкривається гідравлічно двотактним приводом випускного клапана, який активується керувальним маслом, що подається через електронно керований пропорційний клапан. Закриття випускних клапанів забезпечується за допомогою «повітряної пружини».

У гідравлічній системі як робоче середовище використовується звичайне масло. Воно фільтрується та подається під тиском гідравлічним насосним агрегатом, встановленим на двигуні або в машинному відділенні.

Пускові клапани відкриваються пневматично за допомогою електронно керованих клапанів типу «вмик./вимк.», що дозволяє відмовитися від механічного стартового розподільника повітря.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 11    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Завдяки електронному керуванню паливним упорскуванням і випускними клапанами відповідно до виміряного миттєвого положення колінчастого вала, система керування двигуном повністю контролює процес згоряння.

Гнучкість системи забезпечується різними «режимами роботи двигуна», які вибираються або автоматично залежно від умов експлуатації, або вручну оператором для досягнення конкретних цілей. Основним режимом є «режим паливної економичності», який забезпечує відповідність обмеженням ІМО щодо викидів  $\text{NO}_x$ .

Регулювання  $\text{NO}_x$  встановлює обмеження на питомі витрати палива (SFOC) для двотактних двигунів. Загалом, викиди  $\text{NO}_x$  збільшуються зі зниженням SFOC і навпаки. У стандартній конфігурації двигуни B&W оптимізовані поблизу межі ІМО щодо  $\text{NO}_x$ , тому подальше збільшення  $\text{NO}_x$  є неприпустимим.

Граничне значення  $\text{NO}_x$  за вимогами ІМО визначається як зважене середнє значення викидів при навантаженнях 25, 50, 75 і 100%. Цю залежність можна використати для зміни профілю SFOC по всьому діапазону навантаження. Це означає, що SFOC може бути зменшена на часткових і малих навантаженнях за рахунок її збільшення на високих навантаженнях, не перевищуючи при цьому ліміти ІМО щодо  $\text{NO}_x$ .

Оптимізація SFOC у діапазонах часткового (50...85%) або низького навантаження (25...70%) вимагає впровадження методу налаштування EGB (Exhaust Gas Bypass). Цей метод дозволяє зменшити витрати палива на малих і часткових навантаженнях, зберігаючи можливість роботи на високих навантаженнях у разі потреби.

Фундаментна рама складається з міцних зварних поздовжніх балок і зварних поперечних балок із литими сталевими опорами підшипників. Для кріплення рами до фундаменту судна застосовуються довгі еластичні

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 12    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

фундаментні болти та гідравлічні інструменти для затягування. Рама виготовляється з упорним підшипником у кормовій частині.

*Головні підшипники* складаються з тонкостінних сталевих вкладишів, покритих білим металом. Нижній вкладиш головного підшипника може бути виведений та встановлений за допомогою спеціальних пристроїв та гідравлічних інструментів для підйому колінчастого вала. Кришка підшипника утримує вкладиші у правильному положенні.

*Картер* є зварною конструкцією. На вихлопному боці картера встановлено запобіжний клапан для кожного циліндра. На маневровому боці кожен циліндр має велику дверку на завісах. На картер зварюванням кріпляться напрямні хрестовини. Картер болтами приєднується до фундаментної рами. Стяжні болти з'єднують між собою фундаментну раму, картер і блок циліндрів.

*Блок циліндрів* має оглядові люки для очищення просторів наддувного повітря (за потреби), а також для огляду продувних вікон і поршневих кілець із маневрового боку. Блок циліндрів разом із гільзою циліндра утворюють простір наддувного повітря [3].

*Кришка циліндра* з кованої сталі виготовлена як єдина деталь і має канали для циркуляції охолоджувальної води. У центрі виконано отвір для випускного клапана, а також отвори для форсунок, пілотних клапанів, пускового клапана та індикаторного клапана. З боку кришки циліндра, що звернений до гідравлічного блока (HCU), передбачена площа для встановлення спеціального клапанного блока – газового керуючого блока (gas control block). Крім того, кришка циліндра оснащена комплектом отворів і трубопроводів для подачі та зворотного відведення палива від керуючого блока до кожної форсунки.

*Колінчастий вал* є напівзбірного типу та виготовляється з кованих або литих сталевих щік. Залежно від кількості циліндрів колінчастий вал може постачатися у двох частинах.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 13    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

У кормовій частині колінчастий вал має:

- комірць для упорного підшипника
- фланець для встановлення зубчастого колеса редуктора, що приводить гідравлічний насосний агрегат
- фланець для встановлення поворотного колеса та для з'єднувальних болтів із проміжним валом.

У передній частині колінчастий вал оснащено комірцем для демпфера осьових коливань та фланцем для встановлення балансувального колеса. Цей фланець також може використовуватися для відбору потужності.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 14    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## РОЗДІЛ 2

### СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ФОРСУНОК СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Сучасні напрями вдосконалення конструкції форсунок суднових двигунів спрямовані на підвищення економічності, надійності та екологічної безпечності великих двотактних і чотиритактних дизелів. Одним із ключових напрямів є розвиток високотискових систем упорскування, які забезпечують надтонке розпилення палива та формування оптимальної паливно-повітряної суміші, що істотно знижує витрати палива та викиди  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$ .

Важливою тенденцією є впровадження *електронно-керованих форсунок* (Common Rail, ME/ME-C, LGI/LGIP), що дозволяють гнучко змінювати тиск упорскування, момент початку подачі та тривалість циклу залежно від режиму роботи двигуна.

Електронно-керовані форсунки є одним із найважливіших напрямів розвитку сучасних суднових дизельних двигунів, оскільки вони забезпечують точне дозування палива та оптимізацію процесу згоряння в широкому діапазоні навантажень. На відміну від традиційних механічних систем, електронно-керований привід дозволяє змінювати тиск упорскування, момент початку подачі та тривалість циклу з високою точністю, не залежно від частоти обертання двигуна. Це дає можливість реалізувати багатофазне упорскування, формувати тонкодисперсний факел та покращувати повноту згоряння палива.

Однією з ключових переваг електронно-керованих форсунок є здатність адаптувати режим роботи двигуна до конкретних умов експлуатації – від економічного ходу до максимального навантаження, забезпечуючи стабільність роботи та зменшення викидів  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  та твердих частинок. Система контролю дозволяє постійно коригувати параметри упорскування на основі даних з датчиків, що підвищує ефективність і надійність двигуна.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 15    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Сучасні електронні форсунки також підтримують роботу на альтернативних видах палива – метанолі, LPG, аміаку та біопаливі. Для цього їх конструкція виконується з використанням корозійно-стійких матеріалів, спеціальних ущільнень та оптимізованої геометрії розпилювача, що забезпечує стабільне впорскування низьков'язких або хімічно активних палив [4].

Завдяки можливості гнучко формувати цикл згоряння, електронно-керовані форсунки дозволяють двигунам відповідати жорстким екологічним нормам IMO Tier II–III та забезпечують підвищену паливну економічність. Їх впровадження є невід'ємною складовою модернізації суднових енергетичних установок і переходу на більш екологічні види морського транспорту.

Особливу увагу приділяють **створенню форсунок, здатних працювати на альтернативних паливах** – метанолі, LPG, аміаку, біопаливі та синтетичних паливних сумішах. Це вимагає використання корозійно-стійких матеріалів, нових ущільнювальних пар та спеціальних конструкцій голок і розпилювачів, що забезпечують стабільне упорскування низьков'язких або агресивних палив.

Форсунки, здатні працювати на альтернативних видах палива, є ключовим елементом сучасних і перспективних суднових енергетичних установок, орієнтованих на зниження викидів та підвищення енергоефективності. Такі форсунки проєктуються з урахуванням специфічних фізико-хімічних властивостей метанолу, LPG, аміаку, біопалива й синтетичних палив, які часто мають нижчу в'язкість, іншу теплоту згоряння або підвищену корозійну активність. Це потребує використання спеціальних матеріалів – нержавкої та подвійно легованої сталі, високостійких покриттів, а також особливих ущільнювальних систем, здатних витримувати контакт із агресивними середовищами.

Важливою тенденцією є впровадження багатофункціональних розпилювачів та оптимізованої геометрії голки форсунки, що забезпечує

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 16    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

формування рівномірного дрібнодисперсного факела при роботі на низькоенергетичних паливах, таких як метанол або аміак. Це дозволяє підвищити стабільність займання, покращити теплотехнічні показники двигуна та зменшити ризик неповного згоряння. У системах, що працюють на LPG або метанолі, додатково застосовуються ущільнювальні й ізоляційні елементи для запобігання змішуванню палива з керувальною оливою та зниження небезпеки витоків.

Форсунки для альтернативних палив нерідко поєднуються з електронними системами керування (ME-LGIM, ME-LGIP, Common Rail), які дозволяють точно регулювати тиск і момент упорскування залежно від типу та параметрів палива. Це забезпечує оптимальне згоряння та відповідність екологічним нормам IMO Tier II–III без істотної втрати потужності.

Таким чином, розвиток форсунок, здатних працювати на альтернативних паливах, є важливою складовою декарбонізації морського транспорту та переходу до більш чистих і безпечних енерготехнологій у судновій галузі.

Ще одним напрямом є оптимізація *гідравлічних підсилювачів тиску* та багатоступеневих *упорскувальних систем*, що гарантують утворення дрібнодисперсного факела навіть на малих навантаженнях, характерних для економічної експлуатації сучасних суден. Удосконалення охолодження корпусу форсунки, зменшення теплових деформацій і впровадження комп'ютерного моделювання (CFD) дають змогу забезпечити тривалий ресурс роботи та рівномірне зношування.

Оптимізація гідравлічних підсилювачів тиску є одним із ключових напрямів підвищення ефективності систем паливного упорскування сучасних судових дизельних двигунів. У гідравлічних бустерах тиску (Fuel Booster Injection Valve – FBIV) вдосконалюються конструкція поршня, ущільнення та розподіл керувальної оливи, що дає змогу забезпечувати стабільно високий тиск упорскування незалежно від режиму роботи двигуна. Це дозволяє

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 17    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

формувати більш тонкодисперсний факел та покращувати однорідність паливно-повітряної суміші, особливо на низьких і часткових навантаженнях, де традиційні механічні системи працюють менш ефективно.

Багатоступеневі системи упорскування є ще одним перспективним напрямом розвитку паливної апаратури. Замість одноразового вприску невеликі порції палива подаються декількома фазами – попереднє, основне та післяупорскування. Це дозволяє зменшити затримку займання, знизити піковий тиск згоряння, оптимізувати швидкість тепловиділення та зменшити утворення NO<sub>x</sub> і твердих частинок. Особливо ефективним є поєднання багатоступеневого упорскування з електронно керованими системами (ME-C, Common Rail), які забезпечують точний контроль над кожним етапом циклу.

У процесах оптимізації велике значення має цифрове моделювання (CFD-аналіз), що дозволяє оцінювати взаємодію паливного факела з повітряними потоками та визначати оптимальні значення тиску, тривалості й послідовності упорскування. Покращення конструкції гідравлічних систем також сприяє продовженню ресурсу форсунок, зменшенню теплового навантаження та підвищенню надійності роботи двигуна в реальних морських умовах.

Загалом оптимізація гідравлічних підсилювачів тиску та впровадження багатоступеневого упорскування підвищують паливну економічність, екологічність і експлуатаційну стабільність суднових енергетичних установок, забезпечуючи відповідність сучасним вимогам ІМО та тенденціям енергоефективності у світовому флоті.

Також активно розвиваються **форсунок модульного типу**, які спрощують обслуговування, скорочують час ремонту та підвищують надійність системи. Загалом модернізація форсунок спрямована на підвищення екологічної ефективності суднових енергетичних установок, відповідність нормам ІМО Tier II–III та оптимізацію паливної економічності флоту.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 18    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Форсунки модульного типу є сучасним конструктивним рішенням у паливних системах суднових дизельних двигунів, спрямованим на підвищення надійності, спрощення технічного обслуговування та скорочення часу простою судна. На відміну від традиційних форсунок, де основні елементи розміщені в єдиному корпусі, модульні форсунки складаються з окремих функціональних модулів – розпилювача, гідравлічного підсилювача тиску, керувального блока, ізоляційного та ущільнювального модулів. Такий підхід дозволяє виконувати заміну або ремонт окремої частини без демонтажу всієї форсунки.

Однією з головних переваг модульної конструкції є підвищена ремонтпридатність. Обслуговування здійснюється швидше, а витрати на ремонт зменшуються, оскільки проблемний модуль можна замінити без впливу на інші вузли. Це особливо важливо для великих двотактних двигунів, де якість і швидкість ремонту безпосередньо впливають на графік експлуатації судна та економічні показники.

Модульні форсунки також забезпечують вищу експлуатаційну надійність завдяки стандартизації елементів і можливості індивідуального налаштування кожного модуля. Наприклад, модуль розпилювача може мати різну кількість та діаметр отворів залежно від типу палива, а бустерний модуль – різні параметри тиску для роботи на важкому паливі, метанолі чи LPG. Це робить модульні системи сумісними з широким спектром альтернативних палив, що є важливим у контексті декарбонізації морського транспорту.

Крім того, такий тип форсунок легко інтегрується з електронними системами керування (ME-C, Common Rail), оскільки окремі модулі можуть обладнуватися датчиками тиску, температури або ходу голки. Це дозволяє системі керування отримувати точні дані в режимі реального часу та автоматично адаптувати параметри упорскування під поточні умови роботи двигуна.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 19    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Таким чином, форсунки модульного типу є одним із найбільш перспективних напрямів удосконалення паливної апаратури суднових двигунів, забезпечуючи поєднання високої надійності, зручності обслуговування та адаптивності до сучасних вимог енергоефективності та екологічної безпеки.

Останнім часом з'явився попит на великі двотактні двигуни з турбонаддувом, здатні працювати на альтернативних видах палива, таких як газ, метанол, вугільна суспензія, нафтовий кокс тощо. Однією з груп палив, що користується зростаючим попитом, є палива з низькою температурою займання.

Багато видів палива [5] з низькою температурою займання, такі як метанол, LPG (скраплений нафтовий газ), DME (диметиловий ефір) або біопаливо, є відносно чистими видами палива, що проявляється у значно знижених рівнях вмісту сполук сірки, NO<sub>x</sub> та CO<sub>2</sub> у вихлопних газах при їх використанні як палива для великих тихохідних прямоточно-двотактних дизельних двигунів із турбонаддувом, у порівнянні, наприклад, з двигунами, що працюють на важкому дизельному паливі.

Однак існують проблеми, пов'язані з використанням палив із низькою температурою займання у великих малообертових прямоточно-двотактних дизельних двигунах із турбонаддувом. Однією з таких проблем є саме **низька температура займання**, яка створює суттєві ризики, якщо таке паливо потрапляє до інших систем двигуна і змішується з іншими рідинами, наприклад зі змазувальним маслом. Паливам із низькою температурою займання властива легка здатність до займання, і їх пари можуть легко утворювати вибухонебезпечні суміші.

Тому якщо паливо з низькою температурою займання потрапляє в іншу систему двигуна, необхідно з міркувань безпеки зупинити двигун і повністю очистити або замінити всю рідину в такій системі. Це є дорогим і трудомістким процесом для обслуговуючого персоналу двигуна.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 20    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Конструкція відомих форсунок завжди має певний витік уздовж осі голки форсунки та з отвору, у якому переміщується голка, через особливості конструкції голки та сидла. Тому в зазор між цією віссю та отвором подають рідке «ущільнювальне масло» під тиском – як для ущільнення, так і для змащування. Щоб звести витік до мінімуму, зазор роблять настільки малим, наскільки це можливо, із дуже вузькими допусками, але малий зазор потребує масла між голкою та отвором.

Розділення ущільнювального масла й палива є складним у випадку, коли ці дві рідини змішалися, що спричиняє помилку в системі. Виявлення палива в системі змащувального масла призведе до зупинення машини, і часто важко визначити причину інциденту.

Іншою проблемою, пов'язаною з безпекою, є вимога класифікаційних товариств щодо того, що не **можна допускати залишення палива з низькою температурою займання в паливних форсунках і трубопроводах**, які ведуть до паливних форсунок, коли двигун не працює на такому паливі — наприклад, коли двигун зупинений або коли двопаливний двигун працює на іншому типі палива. Таким чином, необхідно вживати заходів для очищення паливних форсунок і трубопроводів, що ведуть до них.

Інша проблема палив із низькою температурою займання полягає в їхніх порівняно **слабких змащувальних властивостях**, що ускладнює використання дуже малих зазорів між рухомими деталями без застосування змащувальної рідини.

Великі малообертові прямоточно-двотактні дизельні двигуни з турбонаддувом зазвичай використовують у головних суднових установках океанських вантажних суден, тому їхня надійність є надзвичайно важливою. Робота таких двигунів на паливі з низькою температурою займання є відносно новим досягненням, і рівень надійності при роботі з таким паливом ще не досяг рівня традиційного дизельного палива. З цієї причини найбільші двотактні двигуни внутрішнього згоряння із самозайманням виконуються як

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 21    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

двопаливні: вони мають паливну систему для роботи на паливі з низькою температурою займання та окрему паливну систему для роботи на дизельному паливі, що дозволяє працювати на повній потужності лише на дизельному паливі.

Через великий діаметр циліндра камери згоряння таких двигунів зазвичай оснащують трьома (іноді двома) клапанами для подачі палива на кожен циліндр, розташованими по колу приблизно через  $120^\circ$  ( $180^\circ$ ) відносно центрального випускного клапана. Таким чином, у двопаливній системі буде три клапани для палива з низькою температурою займання та три клапани для дизельного палива на кожен циліндр, що призводить до значного скупчення елементів у зоні верхньої кришки циліндра.

***З урахуванням викладеного вище, мета роботи полягає у створенні паливної форсунки, у конструкції якій усунені або, щонайменше, зменшено зазначені вище проблеми.***

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 22    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

### РОЗДІЛ 3

## ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ФОРСУНОК ДВИГУНА MAN B&W 6G50ME-C9.5

### Тепловий розрахунок двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5

#### *Методика розрахунку робочого циклу двигуна*

Робочий цикл двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) — це періодично повторювана сукупність процесів, у ході яких теплова енергія палива перетворюється на механічну роботу [6].

Оскільки цей процес має складний фізико-хімічний характер, його точне аналітичне описання досі потребує застосування експериментально визначених коефіцієнтів, адже наявні методи моделювання не забезпечують достатнього рівня точності без їх використання.

Тому під час інженерних розрахунків зазвичай застосовують спрощені схеми, серед яких найбільш відомою та поширеною є модель Гриневецького-Мазінга [5].

У цьому розрахунковому циклі (рис. 3.1) послідовно реалізуються такі процеси: політропне стискання ( $t-c$ ), ізохорне теплопідведення ( $c-y$ ), ізобарний процес ( $y-z$ ), політропне розширення ( $z-b$ ) та ізохорне охолодження ( $b-t$ ), що завершує цикл.

Популярність методу Гриневецького-Мазінга пояснюється тим, що він забезпечує прийнятну точність результатів при відносно простій математичній реалізації.

Завдяки цьому підходу можна ефективно аналізувати основні закономірності перебігу робочих процесів у ДВЗ [7].

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 23    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

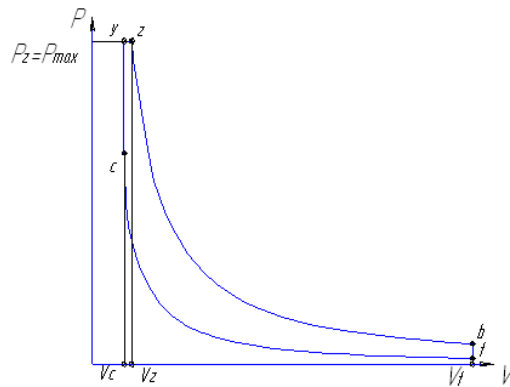


Рисунок 3.1 – Теоретичний цикл

*Результати розрахунку циклу двигуна при роботі на важкому паливі*

| Параметр                                  | Значення |
|-------------------------------------------|----------|
| <i>Вихідні дані</i>                       |          |
| Діаметр циліндра, м                       | 0,5      |
| Хід поршня, м                             | 2,5      |
| Частота обертання, хв <sup>-1</sup>       | 100      |
| Тактність                                 | 1,0      |
| Число циліндрів                           | 6        |
| Тиск наддуву, МПа                         | 0,4      |
| Тиск навколишнього середовища, МПа        | 0,103    |
| Температура навколишнього середовища, К   | 297      |
| Показник політропи стиснення в компресорі | 1,8      |
| Коефіцієнт надлишку повітря для згоряння  | 2,64     |
| Коефіцієнт продувки                       | 1,05     |
| Коефіцієнт залишкових газів               | 0,04     |
| Коефіцієнт використання тепла в точці z   | 0,92     |
| Коефіцієнт використання тепла в точці b   | 0,94     |
| Ступінь стиснення                         | 15       |
| Ступінь підвищення тиску при згорянні     | 1,2      |
| Підігрів заряду від стінок циліндра, К    | 10       |

|                                                                                                                                                       |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Коефіцієнт заокруглення індикаторної діаграми                                                                                                         | 0,98    |
| Коефіцієнт втрати тиску у впускному колекторі                                                                                                         | 0,98    |
| Механічний ККД двигуна                                                                                                                                | 0,93    |
| Втрата тиску в повітроохолоджувачі, МПа                                                                                                               | 0,003   |
| Зниження температури в повітроохолоджувачі, К                                                                                                         | 220     |
| Температура залишкових газів, К                                                                                                                       | 800     |
| Рідке нафтове паливо, %                                                                                                                               | 1       |
| Газоподібне паливо   0                                                                                                                                | 0       |
| Альтернативне паливо   0                                                                                                                              | 0       |
| Вуглець С, %                                                                                                                                          | 0,87    |
| Водень Н <sub>2</sub> , %                                                                                                                             | 0,13    |
| Сірка S, %                                                                                                                                            | 0       |
| Кисень О <sub>2</sub> , %                                                                                                                             | 0       |
| Відсотковий вміст води W, %                                                                                                                           | 0       |
| <i>Розрахунок процесу наповнення</i>                                                                                                                  |         |
| Температура повітря за компресором, К                                                                                                                 | 542,8   |
| Температура заряду перед двигуном, К                                                                                                                  | 322,8   |
| Температура заряду до кінця процесу наповнення, К                                                                                                     | 350,8   |
| Тиск повітря перед двигуном, МПа                                                                                                                      | 0,397   |
| Тиск заряду до кінця процесу наповнення, МПа                                                                                                          | 0,389   |
| Коефіцієнт наповнення                                                                                                                                 | 0,9291  |
| <i>Розрахунок процесу стиснення</i>                                                                                                                   |         |
| $A_{\text{сх}}$                                                                                                                                       | 19,2776 |
| $B_{\text{сх}}$                                                                                                                                       | 0,00252 |
| Теплоємність газоповітряної суміші та залишкових газів<br>на ході стиснення визначається за формулою:<br>$C_{\text{сх}} = 19,2775 + 0,00252 \times T$ |         |
| Середній показник політропи стиснення                                                                                                                 | 1,3685  |

|                                                                                                                |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Тиск наприкінці стиснення, МПа                                                                                 | 15,8306 |
| Температура наприкінці стиснення, К                                                                            | 951,5   |
| <i>Розрахунок процесу згоряння</i>                                                                             |         |
| Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни                                                                         | 1,0246  |
| Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни                                                                          | 1,0237  |
| Частка палива, що згоріла в точці z                                                                            | 0,9787  |
| Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z                                                                        | 1,0232  |
| $A_{sz}$                                                                                                       | 19,7164 |
| $b_z$                                                                                                          | 0,00292 |
| $A_{sb}$                                                                                                       | 19,7450 |
| $B_b$                                                                                                          | 0,00293 |
| Середня мольна ізохорна теплоємність у точці z визначається за формулою: $C_{sz} = 19,7164 + 0,00292 \times T$ |         |
| Середня мольна ізохорна теплоємність у точці b визначається за формулою: $C_{sb} = 19,745 + 0,00293 \times T$  |         |
| Максимальна температура згоряння, К                                                                            | 1738,0  |
| Максимальний тиск згоряння, МПа                                                                                | 18,997  |
| <i>Розрахунок процесу розширення</i>                                                                           |         |
| Ступінь попереднього розширення                                                                                | 1,557   |
| Ступінь подальшого розширення                                                                                  | 9,631   |
| Середній показник політропи розширення                                                                         | 1,296   |
| Температура наприкінці процесу розширення, К                                                                   | 890     |
| Тиск наприкінці процесу розширення, МПа                                                                        | 1,0088  |
| <i>Індикаторні показники</i>                                                                                   |         |
| Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа                                                                    | 2,3068  |
| Дійсний середній індикаторний тиск, МПа                                                                        | 2,2607  |
| Індикаторний ККД                                                                                               | 0,5035  |

|                                                                                               |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Індикаторна питома витрата газу, $\text{м}^3/(\text{кВт} \times \text{год})$                  | 0        |
| Індикаторна питома витрата рідкого палива, $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$         | 0,1658   |
| Індикаторна питома витрата альтернативного палива, $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$ | 0        |
| Індикаторна потужність двигуна, кВт                                                           | 11105,6  |
| <i>Ефективні показники</i>                                                                    |          |
| Середній ефективний тиск, МПа                                                                 | 2,1024   |
| Ефективний ККД двигуна                                                                        | 0,4683   |
| Ефективна питома витрата рідкого палива, $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$           | 0,1783   |
| Ефективна потужність двигуна, кВт                                                             | 10328,2  |
| Найнижча теплотворна здатність нафтового палива, кДж/кг                                       | 431222,0 |

*Результати розрахунку циклу двигуна при роботі на метанолі*

| Параметр                                  | Значення |
|-------------------------------------------|----------|
| <i>Вихідні дані</i>                       |          |
| Діаметр циліндра, м                       | 0,5      |
| Хід поршня, м                             | 2,5      |
| Частота обертання, $\text{хв}^{-1}$       | 100      |
| Тактність                                 | 1,0      |
| Число циліндрів                           | 6        |
| Тиск наддуву, МПа                         | 0,4      |
| Тиск навколишнього середовища, МПа        | 0,103    |
| Температура навколишнього середовища, К   | 297      |
| Показник політропи стиснення в компресорі | 1,8      |
| Коефіцієнт надлишку повітря для згорання  | 2,64     |
| Коефіцієнт продувки                       | 1,05     |
| Коефіцієнт залишкових газів               | 0,04     |
| Коефіцієнт використання тепла в точці z   | 0,92     |

|                                                                                                 |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Коефіцієнт використання тепла в точці b                                                         | 0,94    |
| Ступінь стиснення                                                                               | 15      |
| Ступінь підвищення тиску при згорянні                                                           | 1,2     |
| Підігрів заряду від стінок циліндра, К                                                          | 10      |
| Коефіцієнт заокруглення індикаторної діаграми                                                   | 0,98    |
| Коефіцієнт втрати тиску у впускному колекторі                                                   | 0,98    |
| Механічний ККД двигуна                                                                          | 0,93    |
| Втрата тиску в повітроохолоджувачі, МПа                                                         | 0,003   |
| Зниження температури в повітроохолоджувачі, К                                                   | 220     |
| Температура залишкових газів, К                                                                 | 800     |
| Рідке нафтове паливо, %                                                                         | 0,05    |
| Газоподібне паливо   0                                                                          | 0       |
| Альтернативне паливо   0                                                                        | 0,95    |
| Вуглець С, %                                                                                    | 0,87    |
| Водень Н <sub>2</sub> , %                                                                       | 0,13    |
| Сірка S, %                                                                                      | 0       |
| Кисень О <sub>2</sub> , %                                                                       | 0       |
| Метанол, %                                                                                      | 1       |
| Відсотковий вміст води W, %                                                                     | 0       |
| <i>Розрахунок процесу наповнення</i>                                                            |         |
| Температура повітря за компресором, К                                                           | 542,8   |
| Температура заряду перед двигуном, К                                                            | 322,8   |
| Температура заряду до кінця процесу наповнення, К                                               | 350,8   |
| Тиск повітря перед двигуном, МПа                                                                | 0,397   |
| Тиск заряду до кінця процесу наповнення, МПа                                                    | 0,389   |
| Коефіцієнт наповнення                                                                           | 0,9291  |
| <i>Розрахунок процесу стиснення</i>                                                             |         |
| <b>A</b><br> | 19,2745 |

|                                                                                                                                            |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $B_z$                                                                                                                                      | 0,00251 |
| Теплоємність газоповітряної суміші та залишкових газів<br>на ході стиснення визначається за формулою:<br>$C_{mz}=19,2745+0,00251 \times T$ |         |
| Середній показник політропи стиснення                                                                                                      | 1,3685  |
| Тиск наприкінці стиснення, МПа                                                                                                             | 15,8306 |
| Температура наприкінці стиснення, К                                                                                                        | 951,5   |
| <i>Розрахунок процесу згоряння</i>                                                                                                         |         |
| Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни                                                                                                     | 0,9573  |
| Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни                                                                                                      | 0,9589  |
| Частка палива, що згоріла в точці z                                                                                                        | 0,9787  |
| Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z                                                                                                    | 0,9589  |
| $A_{mz}$                                                                                                                                   | 19,6357 |
| $b_z$                                                                                                                                      | 0,00285 |
| $A_{mb}$                                                                                                                                   | 19,6593 |
| $B_b$                                                                                                                                      | 0,00286 |
| Середня мольна ізохорна теплоємність у точці z визначається за<br>формулою: $C_{mz} = 19,6357 + 0,00285 \times T$                          |         |
| Середня мольна ізохорна теплоємність у точці b визначається за<br>формулою: $C_{mb} = 19,6593 + 0,00286 \times T$                          |         |
| Максимальна температура згоряння, К                                                                                                        | 1850,0  |
| Максимальний тиск згоряння, МПа                                                                                                            | 18,997  |
| <i>Розрахунок процесу розширення</i>                                                                                                       |         |
| Ступінь попереднього розширення                                                                                                            | 1,555   |
| Ступінь подальшого розширення                                                                                                              | 9,645   |
| Середній показник політропи розширення                                                                                                     | 1,2939  |
| Температура наприкінці процесу розширення, К                                                                                               | 949     |

|                                                                                               |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Тиск наприкінці процесу розширення, МПа                                                       | 1,0118   |
| <i>Індикаторні показники</i>                                                                  |          |
| Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа                                                   | 2,3077   |
| Дійсний середній індикаторний тиск, МПа                                                       | 2,2616   |
| Індикаторний ККД                                                                              | 0,5017   |
| Індикаторна питома витрата газу, $\text{м}^3/(\text{кВт} \times \text{год})$                  | 0        |
| Індикаторна питома витрата рідкого палива, $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$         | 0,0083   |
| Індикаторна питома витрата альтернативного палива, $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$ | 0,2864   |
| Індикаторна потужність двигуна, кВт                                                           | 11109,9  |
| <i>Ефективні показники</i>                                                                    |          |
| Середній ефективний тиск, МПа                                                                 | 2,1033   |
| Ефективний ККД двигуна                                                                        | 0,4666   |
| Ефективна питома витрата рідкого палива, $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$           | 0,0089   |
| Ефективна питома витрата альтернативного палива, $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$   | 0,308    |
| Ефективна потужність двигуна, кВт                                                             | 10332,3  |
| Найнижча теплотворна здатність нафтового палива, кДж/кг                                       | 431222,0 |
| Найнижча теплотворна здатність альтернативного палива, кДж/кг                                 | 23800,0  |

### Вдосконалення конструкції форсунки двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5

На рис. 3.2 спрощено зображено форсунку для метанолу 50 разом із її з'єднаннями з джерелом метанола 60, джерелом охолоджувальної рідини (масла) 59, джерелом ущільнювальної рідини 57, джерелом пускової рідини (масла) 97 через керувальний клапан 96, а також з керувальним клапаном 98 очищення та керувальним клапаном 96 пускової рідини.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 30    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Від джерела стисненого метанола 60 до вхідного отвору в корпусі паливного клапана 50 веде трубопровід 62, який є трубопроводом із подвійною стінкою, наприклад, утвореним концентричними трубами або трубою, розташованою всередині суцільного матеріалу, такого як циліндрична кришка 48. Метанол подається внутрішньою трубою/каналом, тоді як зовнішній канал є випускним і обладнаний датчиком 63 для визначення летких вуглеводневих компонентів (газоаналізатором).

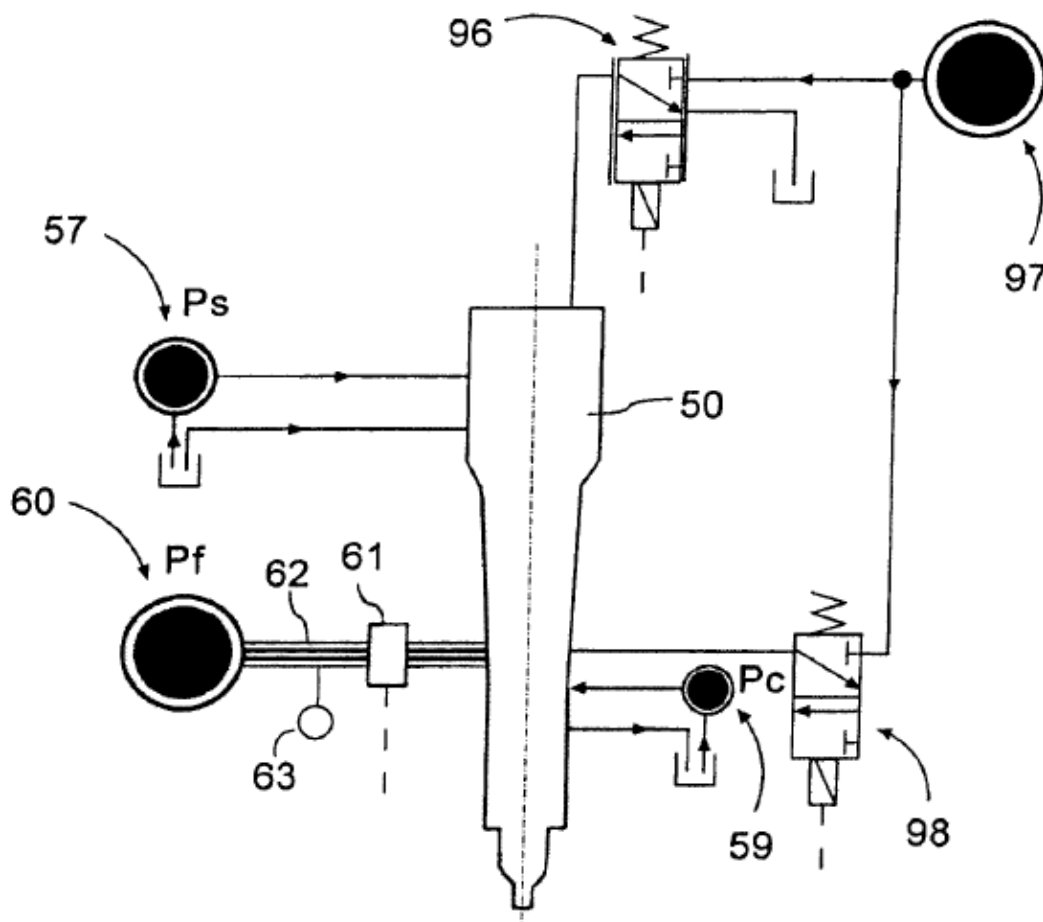


Рисунок 3.2 – Схема системи подачі метанола у циліндр двигуна:  
 50 – форсунка; 57 – джерелом ущільнювальної рідини; 59 – джерело охолоджувальної рідини; 60 – джерело метанола; 61 – відсічний клапан;  
 62 – трубопровід; 63 – датчик-газоаналізатор; 96 – керувальний клапан пускової рідини; 97 – джерело пускової рідини; 98 – керувальний клапан очищення

Датчик 63 під'єднаний до електронного блока керування, який подає сигнал тривоги у разі виявлення летких вуглеводнів. У трубопроводі 62 встановлено відсічний клапан 61, що дає можливість від'єднувати форсунку 50 від джерела метанолу 60, щоб забезпечити очищення форсунки 50 від метанолу. Клапан 61 переважно керується електронікою та регулюється електронним блоком керування.

Керувальний клапан 96 контролює такти упорскування, а керувальний клапан 98 керує очищенням, запобігаючи закриванню зворотного клапана.

На рис. 3.3 показано верхню частину одного з циліндрів 1. Верхня кришка 48 циліндрів 1 оснащена 3 паливними форсунками 50 для упорскування метанолу через розпилювачі цих клапанів 50 у камеру згоряння над поршнем 41 у циліндрі 1. Двигун має три форсунки 50 на циліндр. Випускний клапан 4 розміщений у центрі верхньої кришки, а форсунки 50 – ближче до стінки циліндра.

У верхній кришці 48 додатково встановлені два клапани для важкого палива для роботи двигуна на важкому паливі. Форсунки важкого палива з'єднані з джерелом під високим тиском у загальновідомий спосіб.

Передня частина форсунки 50, що знаходиться найближче до розпилювача та камери згоряння, охолоджується за допомогою охолоджувальної рідини. Для цього корпус форсунки 50 має вхідний отвір для охолоджувальної рідини, вихідний отвір та проточний канал (не показаний) між ними, що проходить крізь передню частину корпусу форсунки 50. Вхідний отвір охолоджувальної рідини з'єднаний трубопроводом з джерелом охолоджувальної рідини 59 під тиском, а вихідний отвір – з резервуаром охолоджувальної рідини.

Корпус форсунки 50 також має отвір для пускової рідини, яка використовується для керування відкриванням і закриванням клапана. Цей керувальний отвір під'єднаний через трубопровід до джерела пускової рідини 97 під тиском. Електронно керований керувальний клапан 96, переважно

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 32    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

пропорційного типу, розташований у трубопроводі між джерелом пускової рідини 97 та керувальним отвором форсунки 50, забезпечуючи керування тактом упорскування.

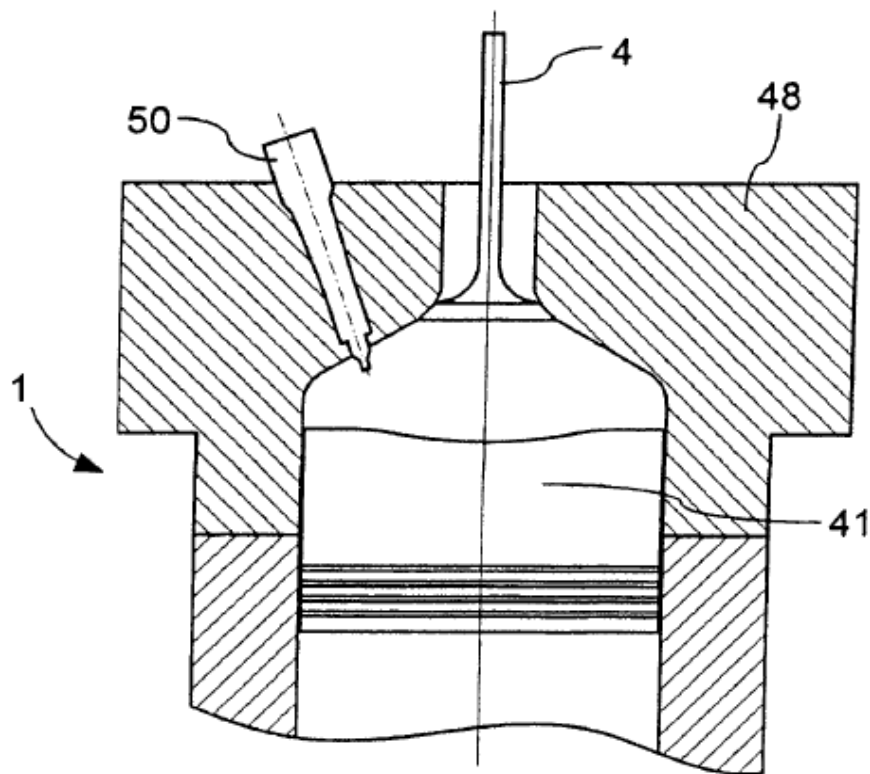


Рисунок 3.3 – Розташування форсунки у циліндрі:

1 – циліндр; 4 – випускний клапан; 41 – поршень; 48 – кришка робочого циліндра; 50 форсунка

Двигун оснащений електронним блоком керування, що регулює його роботу. Сигнальні лінії з'єднують електронний блок керування з клапанами 96 і 98 та з відсічним клапаном 61.

Електронний блок керування забезпечує точну синхронізацію моментів упорскування метанолу форсункою 50 та контролює дозування (об'єм подачі за один такт упорскування). В одному з варіантів виконання електронний блок керування також здатний регулювати форму кривої упорскування (динаміку швидкості подачі), оскільки паливний клапан може адаптуватися до таких режимів.

Електронний блок керування відкриває і закриває відсічний клапан 61, гарантуючи, що подаючий трубопровід 62 заповнений метанолом під тиском до моменту початку упорскування.

Відсічний клапан 61 закривається електронним блоком керування в той момент, коли необхідно очистити форсунку 50 від метанолу.

Рисунок 3.4 зображає вид в аксонометрії форсунки 50, яка має подовжений корпус 52, розпилювач 54, встановлений на передньому кінці корпусу 52, отвір 70 для ущільнювальної рідини і керувальний отвір 36 для управління очищенням.

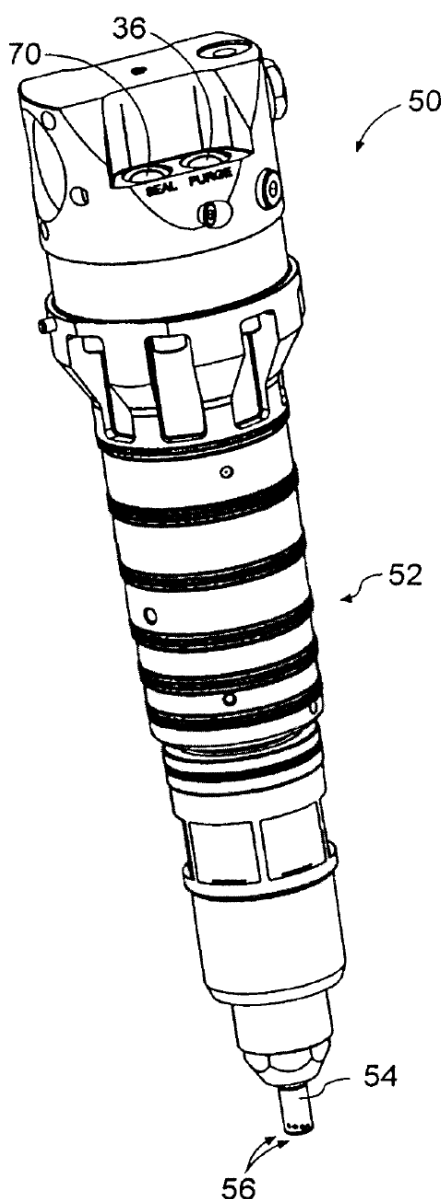


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд форсунки

Розпилювач 54 має кілька отворів 56, які розподілені по ньому у радіальному і аксіальному напрямках.

Рис. 3.5-3.9 зображають розрізи форсунки 50 для упорскування метанолу в камеру згоряння. Форсунка 50 має подовжений корпус 52 з найдальшим кінцем і розпилювачем 54 на його передньому кінці. Розпилювач 54 являє собою окремий елемент, який прикріплений до переднього кінця корпусу 52 форсунки.

Найдавший кінець корпусу 52 форсунки має отвори, включаючи керувальний отвір 36, отвір 78 для пускової рідини і отвір виявлення витoku газу (не зображено). Найдавший кінець збільшений з утворенням головки, яка виступає з кришки 48 циліндра, коли форсунка 50 встановлена у кришці 48. У представленому варіанті паливні форсунки 50 розміщені навколо центрального випускного клапана 4, тобто відносно близько до стінки втулки циліндра.

Подовжений корпус 52 і інші деталі форсунки 50, а також розпилювач виконання виготовлені з нержавіючої сталі.

Порожнистий розпилювач 54 має отвори 56, які з'єднані з внутрішньою порожнистою частиною у розпилювачі 54 і розподілені радіально по розпилювачу 54. Розпилювачі в осьовому напрямку розташовані близько до кінчика 59, і радіальний рознос отворів 56 розпилювача має відносно вузький інтервал приблизно у 50°.

Радіальна орієнтація отворів 56 розпилювача така, що вони спрямовані у бік від стінки втулки циліндра. Крім цього, отвори 56 розпилювача спрямовані таким чином, що вони орієнтовані приблизно у тому ж напрямку, як і напрямок вихору продувочного повітря в камері згоряння, викликаного конфігурацією продувочних вікон (цей вихор являє собою добре відому особливість великих двотактних двигунів внутрішнього згоряння з турбонаддувом).

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 35    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

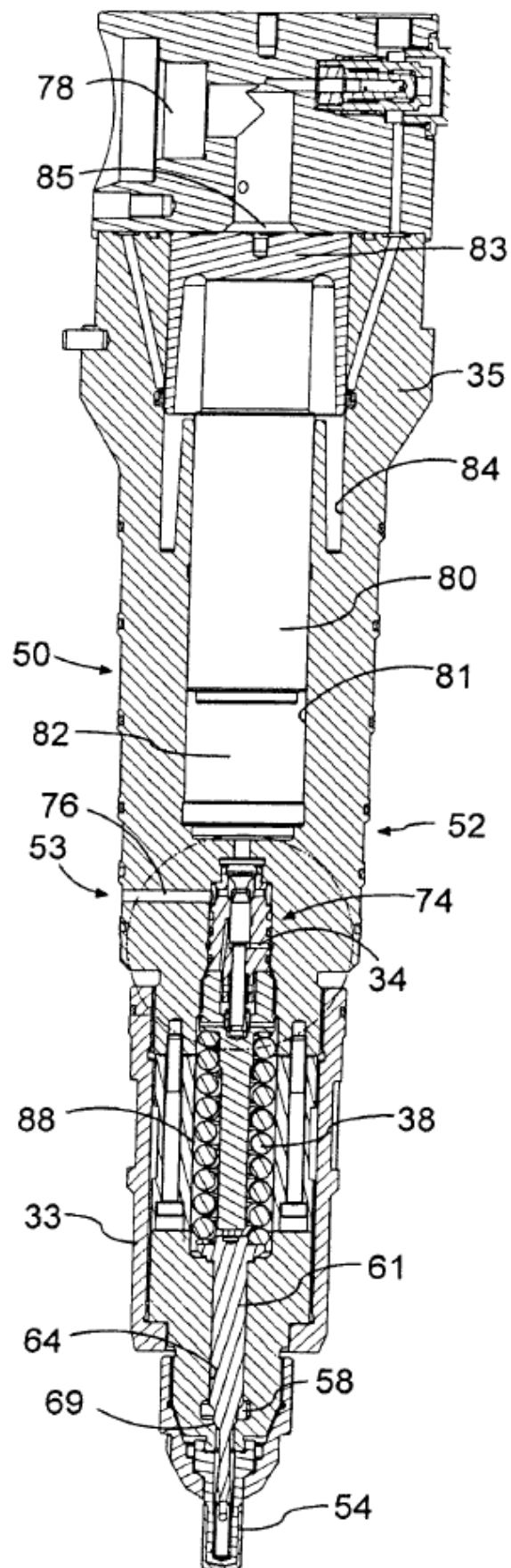


Рисунок 3.5 – Переріз форсунки. Вид А

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ

Аркуш

36

Кінчик розпилювача 54 закритий. Розпилювач 54 приєднаний до переднього кінця корпусу 52 форсунки так, що внутрішня порожниста частина розпилювача 54 виходить у поздовжній канал 64 у корпусі 52. Сідло 69 форсунки розташовано на переході між поздовжнім каналом 64 і паливною камерою 58.

У поздовжньому каналі в подовженому корпусі 52 форсунки зі здатністю ковзання і з вузьким зазором розташована голка 61 форсунки виконана з можливістю осевого переміщення, і наявність масла між голкою 61 і поздовжнім каналом є вкрай необхідним. Для цього в зазор між поздовжнім каналом і голкою форсунки через канал 47 подається рідина, що перебуває під тиском, ущільнювальна рідина. Цей канал з'єднує зазор між голкою 61 і аксіальним каналом із вхідним отвором 70 для ущільнювальної рідини, який, у свою чергу, може бути приєднаний до джерела ущільнювальної рідини 57, яка знаходиться під тиском і тиск дорівнює  $P_s$ . Ущільнювальна рідина запобігає протіканню метанола через зазор між голкою 61 і аксіальним каналом. Крім цього, ущільнювальна рідина, якою переважно є масло, забезпечує мастило між голкою 61 і аксіальним каналом.

Тиск джерела ущільнювальної рідини 57, принаймні, майже такий самий високий, як і максимальний тиск у нагнітальній камері 82 під час такту упорскування. Голка 61 має закрите положення і відкрите положення. Голка 61 має конічну частину, яка має форму, відповідну сідлу 69 форсунки. У закритому положенні конічна частина голки форсунки спочиває в сідлі 69. Конічна частина піднята від сідла 69 у відкритому положенні, і голка 61 пружно притиснута у напрямку закритого положення попередньо напруженою спіральною пружиною 38. Пружина 38 діє на голку 61 і притискає її у напрямку її закритого положення, у якому конічна частина спочиває в сідлі 69.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 37    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

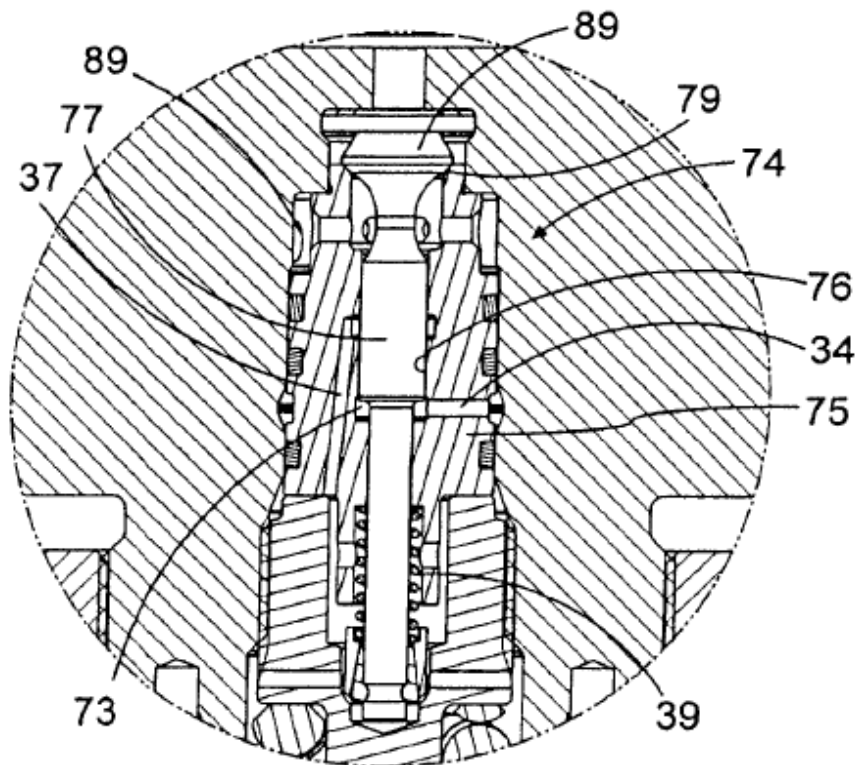


Рисунок 3.6 – Виріз елемента форсунки

Пружина 38 являє собою спіральну пружину з дроту, яка розміщена в камері 88 для пружини у подовженому корпусі 52 форсунки. Охолоджувальне масло тече через камеру 88. Один кінець пружини 38 взаємодіє з одним кінцем камери 88, а інший кінець пружини 38 взаємодіє з розширеною частиною або фланцем на голці 61, пружно підштовхуючи, таким чином, голку форсунки у напрямку до сидла 69 форсунки.

Подовжений корпус 52 має вхідний отвір 53 для палива для приєднання до джерела метанолу 60, що знаходиться під тиском, наприклад, через трубопровід 62 подачі рідкого палива. Вхідний отвір 53 приєднаний до нагнітальної камери 82 в корпусі 52 форсунки через канал 76 і зворотний клапан 74. Зворотний (всмоктувальний) клапан 74 передбачено всередині корпусу 52 форсунки. Клапан 74 гарантує, що метанол може текти через канал 76 у камеру 82, але не в протилежному напрямку.

Нагнітальний поршень 80 зі здатністю ковзання і з запобіганням протікання розташований у першому каналі 81 у подовженому корпусі 52 форсунки, при цьому нагнітальна камера 82 розташована в першому каналі 81 на одній стороні поршня 80. Пусковий поршень 83 зі здатністю ковзання і з запобіганням протікання розташований у другому каналі 84 в корпусі 52 форсунки, при цьому пускова камера 85 розташована в другому каналі 84 на одній стороні пускового поршня 83. Поршень 80 з'єднаний з пусковим поршнем 83 зі здатністю спільного переміщення з ним, тобто поршні 80 і 83 можуть ковзати спільно в їх відповідних каналах 81 і 84. У представленому варіанті виконання поршні 80 і 83 виконані як єдиний елемент, однак слід зазначити, що поршні 80 і 83 можуть бути окремими взаємопов'язаними елементами.

Поршень 80 має верхню частину з трохи збільшеним діаметром  $D2$  у порівнянні з діаметром  $D1$  своєї нижньої частини.

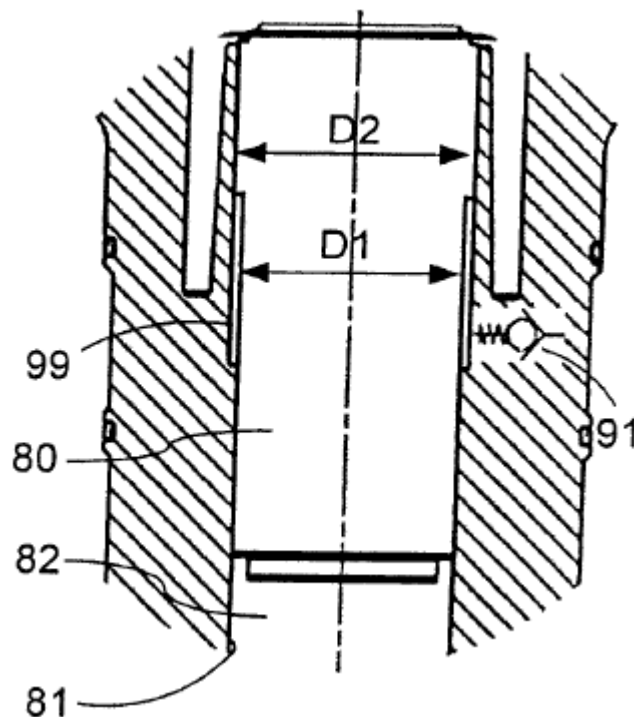


Рисунок 3.7 – Виріз по поршню форсунки

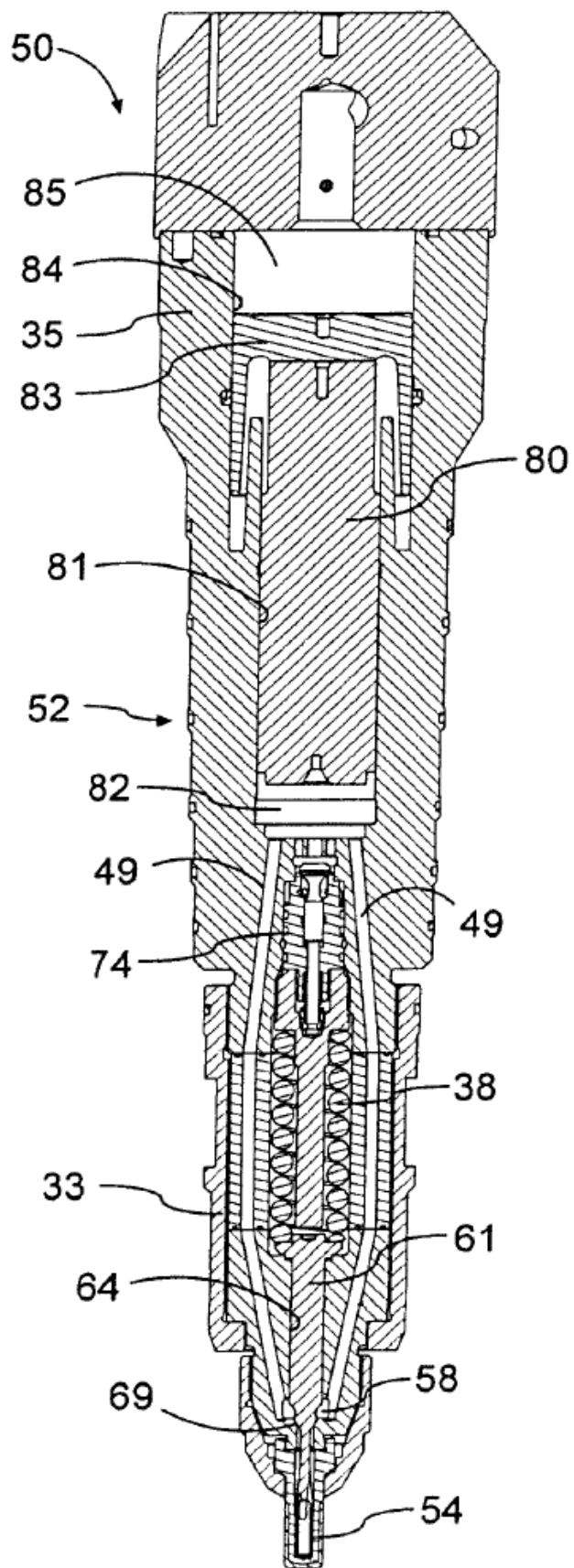


Рисунок 3.8 – Переріз форсунки. Вид Б

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ

Аркуш

40

Верхня частина каналу 81, в якому розміщений нагнітальний поршень 80, має відповідно збільшений діаметр D2, тоді як нижня частина каналу 81 має діаметр D1. Таким чином утворюється кільцева камера 99, і верхня частина поршня 80 утворює поршень підсилювача ущільнювальної рідини, який зменшує об'єм кільцевої камери 99, коли поршень 80 рухається вниз (вгору і вниз, як на рис. 3.5 та 3.7). Камера 99 приєднана до джерела ущільнювальної рідини (масла) через зворотний клапан 91. Камера 99 наповнюється ущільнювальною рідиною через клапан 91, коли поршень 80 рухається вгору, але клапан 91 перешкоджає зворотному течінню ущільнювальної рідини, і тому ущільнювальна рідина вдавлюється у зазор між поршнем 80 і каналом 81.

Тому ущільнювальна рідина витискається з кільцевої камери 99 у зазор між поршнем 80 і каналом 81, у зв'язку з цим перешкоджаючи входженню метанолу у зазор між поршнем 80 і каналом 81.

При виборі зазору для нижньої частини поршня 80 трохи більшим, ніж зазор для верхньої частини поршня 80, може бути гарантовано, що більша частина ущільнювальної рідини потече через зазор у напрямку нагнітальної камери 82. Надлишок ущільнювальної рідини змішається з паливом у нагнітальній камері і буде спалений.

Пускова камера 85 гідравлічно з'єднана з отвором 78 для пускової рідини. Керований електронікою керувальний клапан 96 регулює потік рідини під тиском до отвору 78 і з нього, і, у зв'язку з цим, у пускову камеру 85 і з неї. На початку такту упорскування електронний блок керування дає команду керованому електронікою клапану 96 пропустити пускову рідину в пускову камеру 85.

Рідина під тиском у пусковій камері 85 діє на пусковий поршень 83, створюючи, таким чином, силу, яка штовхає поршень 80 у камеру 82.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 41    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

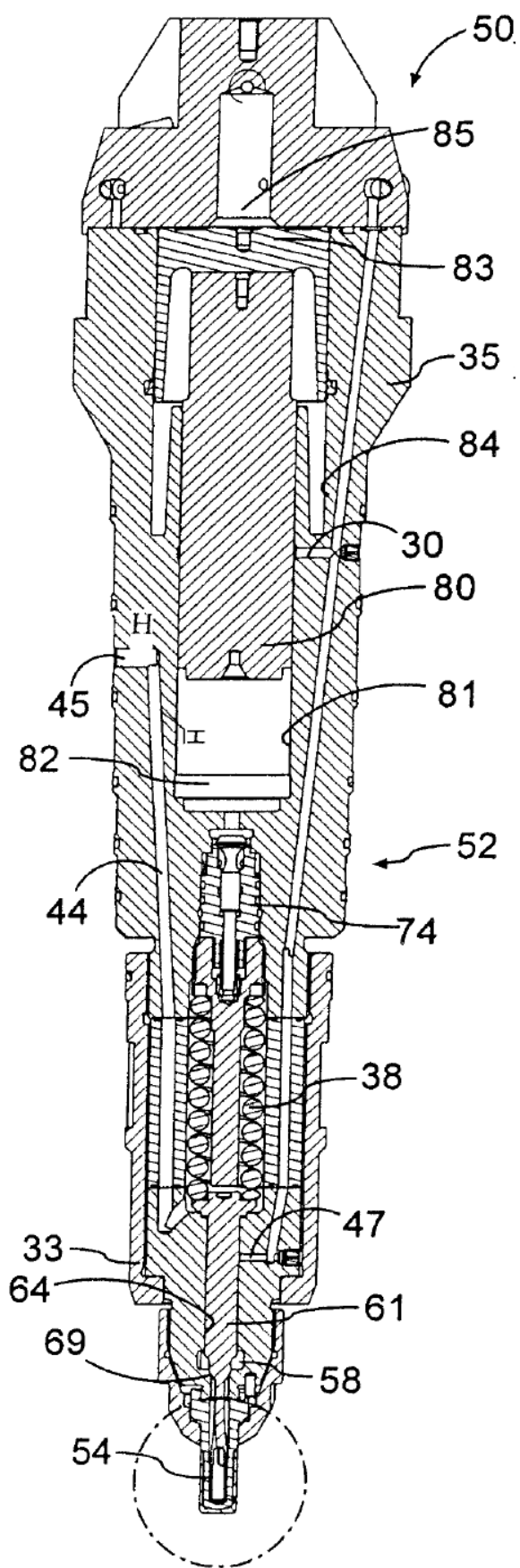


Рисунок 3.9 – Переріз форсунки. Вид В

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

KPM.142.6221м.25.24.00.ПЗ

Аркуш

42

У зв'язку з цим тиск метанолу в камері 82 збільшується. Діаметр пускового поршня 83 більший, ніж діаметр нагнітального поршня 80, і тому тиск у камері 82 буде відповідно вищим, ніж тиск у пусковій камері 85, і комбінація пускового поршня 83 і нагнітального поршня 80 діє як підсилювач тиску.

Один або кілька каналів (проходів) 57 гідравлічно з'єднують нагнітальну камеру 82 з паливною камерою 58 і, відповідно, із сідлом 69 форсунки, яке розташоване в нижній частині паливної камери. Сідло 69 форсунки звернене до паливної камери 58, яка оточує голку 61 форсунки. Голка 61 виконана зі здатністю переміщення від розпилювача 54, підіймаючись, і у бік розпилювача, опускаючись. У своєму відкритому положенні голка 61 піднята від сідла 69, дозволяючи, таким чином, течію метанолу з камери 82 у камеру 58, через сідло 69 і через аксіальний канал у внутрішню порожнину розпилювача 54. Метанол виходить із розпилювача через отвори 56 розпилювача.

Голка 61 підіймається, коли тиск метанола в камері 82 перевищує силу спіральної пружини 38. Таким чином, голка 61 виконана зі здатністю відкриватися з подоланням сили підтискання пружини 38, коли тиск палива в камері 82 перевищить заданий поріг. Тиск палива створюється поршнем 80, що діє на рідке паливо в камері 82.

Голка 61 виконана з можливістю підтискання для переміщення у напрямку до розпилювача 54, при цьому її конічна частина переміщується у напрямку до сідла 69. Це відбувається тоді, коли тиск метанола зменшується, коли поршень 80 більше не діє на паливо в камері 82, і закривальна сила спіральної пружини 38, що діє на голку 61, стає більшою, ніж відкривальна сила рідкого палива, що також діє на голку 61.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 43    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

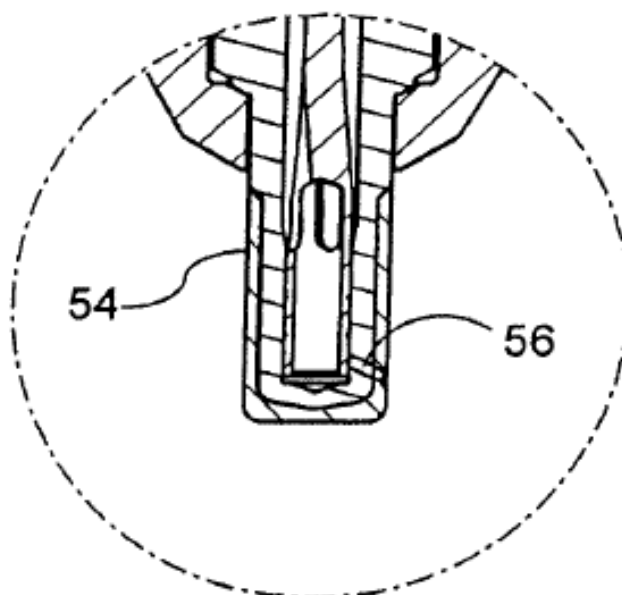


Рисунок 3.10 – Розпилювач

Коли електронний блок керування закінчує такт упорскування, він командує керувальному клапану 96 з'єднати пускову камеру 85 з баком. Камера 82 з'єднана з джерелом метанолу 60, що перебуває під тиском, і тиск подачі метанолу, який тече всередину через зворотний клапан 74, буде штовхати пусковий поршень 83 у пускову камеру 85 доти, поки він не досягне положення, яке зображено на рис. 3.5, коли камера 82 повністю заповнена метанолом, так що форсунка 50 готова до наступного такту упорскування.

Рис. 3.8 ілюструє положення поршня 80 і пускового поршня 83 поблизу кінця такту упорскування, коли основна частина камери 80 спорожнена від метанолу.

Такт упорскування метанолу регулюється електронним блоком керування ЕБУ протягом часу пуску і впродовж ходу поршня 80 (формування швидкості передачі). Загальна кількість зазначеного рідкого палива, упорснутого в такті упорскування, визначається тривалістю ходу поршня 80. Таким чином, за сигналом електронного блока керування тиск пускової рідини в пусковій камері 85 підвищується.

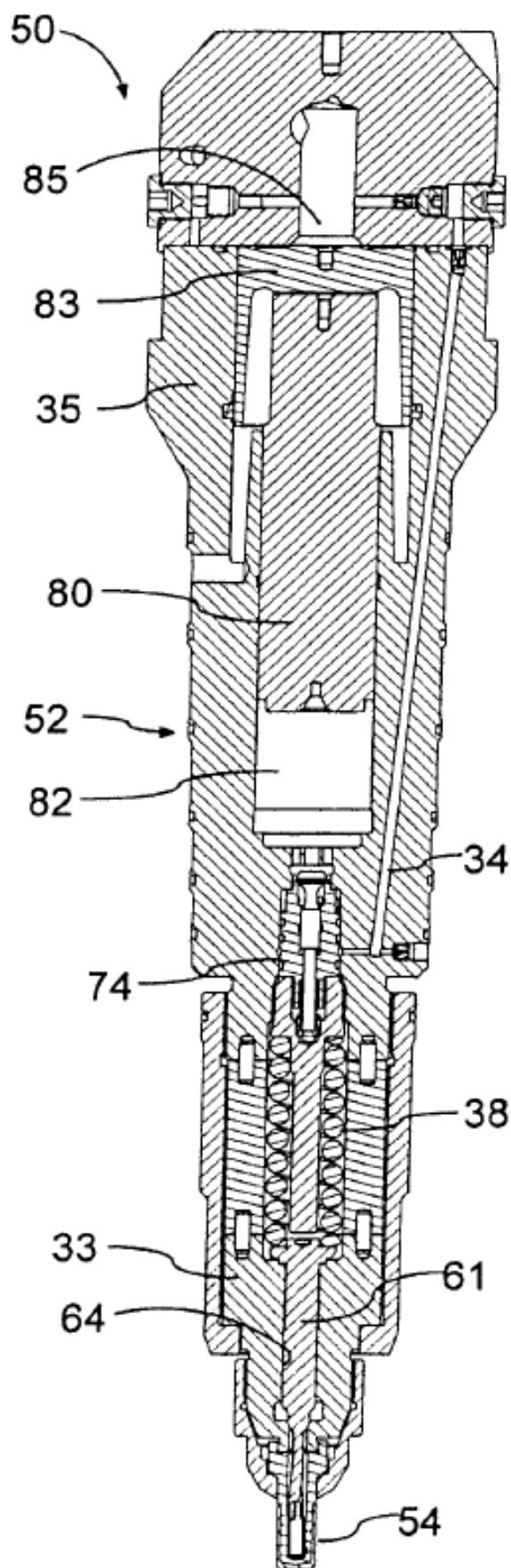


Рисунок 3.10 – Переріз форсунки. Вид Г

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ

Аркуш

45

Наприкінці такту упорскування клапан 96 скидає тиск у пусковій камері 85, і сила метанолу, що перебуває під тиском у камері 82, викликає проштовхування пускового поршня 83 назад у другому каналі 85 доти, поки він не вдариться об кінець другого каналу 85, і камера 82 не наповниться повністю метанолом, так що форсунка 50 стане готовою до наступного такту упорскування.

Форсунка 50 містить підсилювач тиску, утворений поршнем з двома різними діаметрами, при цьому частина поршня з більшим діаметром звернена до камери з отвором, який з'єднаний з керувальним клапаном 96, а частина поршня зі збільшеним діаметром звернена до камери з отвором, який з'єднаний з проходами (каналами) 76 і 47 таким чином, щоб збільшити ущільнювальний тиск під час такту упорскування палива, гарантуючи таким чином, що тиск ущільнювальної рідини буде високим саме в той час, коли він найбільш необхідний для забезпечення високого тиску ущільнення.

Форсунка 50 має вхідний отвір 70 для ущільнювального масла для приєднання до джерела рідини, що перебуває під тиском, і канал 76, що проходить від отвору 70 до першого каналу 81 для ущільнення поршня 80 у першому каналі 81. Тиск джерела ущільнювальної рідини 57, принаймні, майже такий самий великий, як максимальний тиск у камері 82 під час такту упорскування.

Форсунка 50 забезпечена засобами вибіркового забезпечення потоку з камери 82 у напрямку до вхідного отвору 53 для палива для очищення форсунки 50.

Зазначені засоби вибіркового забезпечення потоку з камери 82 у напрямку вхідного отвору 53 містять засоби вибіркового припинення функції забезпечення одностороннього потоку зворотного клапана 74 (всмоктувального клапана).

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>KPM.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 46    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

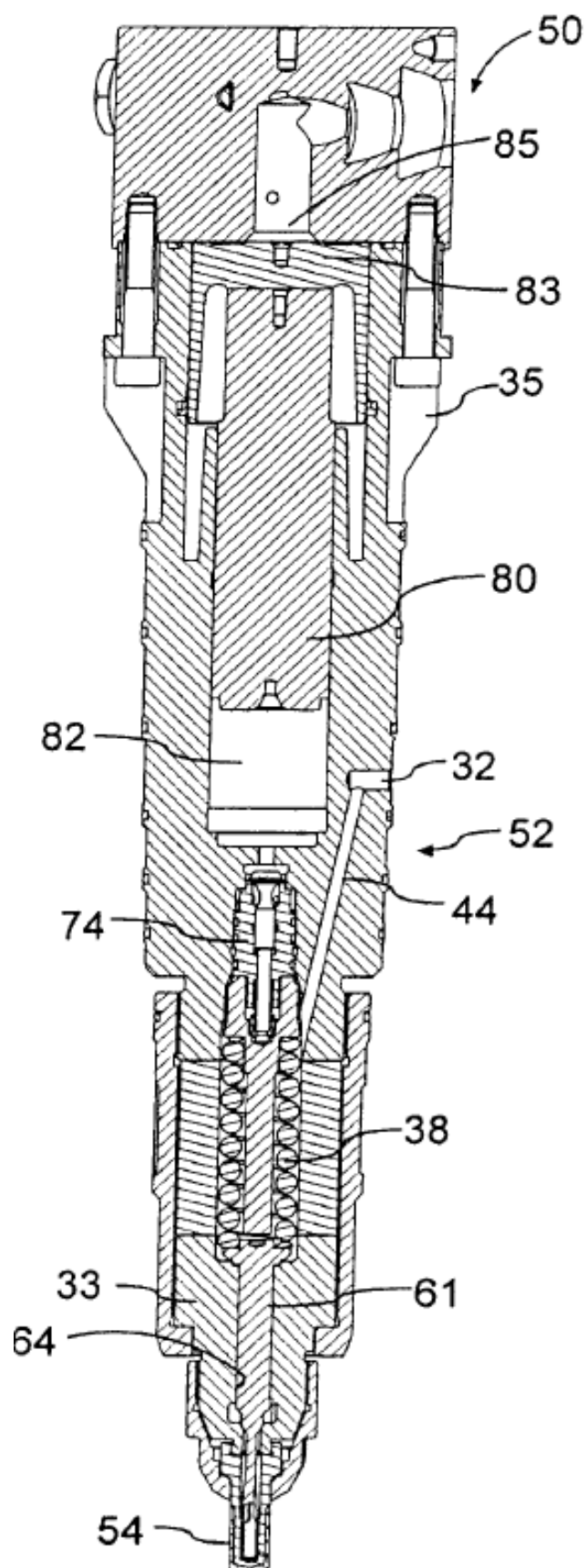


Рисунок 3.10 – Переріз форсунки. Вид Д

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ

Аркуш

47

Як зображено на рис. 3.6, клапан 74 забезпечений клапанним елементом 77, виконаним з можливістю переміщення між відкритим положенням і закритим положенням. Елемент 77 підтиснутий у закрите положення за допомогою попередньо напруженої спіральної пружини 39. Елемент 77 виконаний з можливістю штовхання у відкрите положення, коли тиск у вхідному отворі 53 для палива виявиться більшим, ніж тиск у камері 82, і з можливістю штовхання у закрите положення силою спіральної пружини 39, коли тиск у камері 82 більший, ніж тиск у отворі 53.

Елемент 77 має клапанну головку 89 на одному з його поздовжніх кінців, тоді як спіральна пружина 39 взаємодіє з елементом 77 на його протилежному поздовжньому кінці. Елемент 77 із можливістю ковзання і з запобіганням протікання розташований у каналі 76 у корпусі 75 зворотного клапана. Один кінець клапанного каналу утворює сідло 79 для клапанного диска 89 елемента 77, причому диск 89 спочиває на сідлі 79 клапана при знаходженні рухомого клапанного елемента в закритому положенні і піднятий від сідла 79 клапана при знаходженні елемента 77 у відкритому положенні.

Елемент 77 виконаний з можливістю переміщення у його відкрите положення за допомогою керувального сигналу, незалежно від тиску в камері 82. Для цього рухомий елемент 77 має поверхню тиску, звернену до керувальної камери 73 у клапані 74.

Камера 73 розташована в каналі 76 клапана, і елемент 77 містить поршневу частину на одній стороні камери 73. Корпус 75 зворотного клапана, який має циліндричну частину, розміщений у відповідному поздовжньому каналі в подовженому корпусі 52 клапана.

Керувальна камера 73 проточно з'єднана з керувальним отвором 36 у подовженому корпусі 52 форсунки через канал (не показаний) для приєднання до джерела керувальної рідини. Керувальна рідина надходить у отвір 36 із джерела пускової рідини 97 через трубопровід, який містить керований електронікою керувальний клапан 98, який переважно є двопозиційним

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 48    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

клапаном. Клапан 98 приєднаний до електронного блока керування, який командує клапану 98 переміститися у відкрите положення, коли настає час очистити форсунку 50.

Отвір 36 з'єднаний з керувальною камерою 73 зворотного клапана 74 через прохід або канал 34. Коли електронний блок керування командує клапану 98 керування переміститися у його відкрите положення, рідина керування/пускова рідина (масло), що перебуває під тиском, досягає камери 73 і переводить елемент 77 у відкрите положення, долаючи силу спіральної пружини 39, причому елемент 77 перебуває у відкритому положенні також тоді, коли рідина тече з камери 82 у напрямку до отвору 53 для палива, тобто проти зазвичай блокованого напрямку зворотного клапана 74. Це дозволяє форсунці 50 очиститися від метанолу.

Голка 69 виконана з можливістю переміщення із закритого положення у відкрите положення проти підтискання, коли тиск у паливній камері 82 перевищить заданий поріг. Цей поріг встановлюється при відповідному тиску упорскування, який є меншим від максимального тиску, що може бути створений у камері 82.

Подовжений корпус 52 в одному варіанті виконання має вхідний отвір 45 для охолоджувальної рідини, вихідний отвір 32 для охолоджувальної рідини і проточний тракт 44 для охолоджувальної рідини для охолодження форсунки 50, зокрема частини форсунки 50, найближчої до переднього кінця, наприклад, найближчої до розпилювача і нагрітої від камери згоряння.

Охолоджуючою рідиною є мастильне масло від двигуна. Проточний тракт для охолоджуючої рідини включає камеру 88 для пружини, в якій розташована спіральна пружина 38. Проточний тракт для охолоджуючої рідини приєднаний до каналу 37, який веде до клапанного каналу 76 для подачі ущільнювальної рідини в зазор між клапанним елементом 77 і каналом 76. З цією метою тиск  $P_f$  джерела метанолу 60 трохи нижчий за тиск  $P_c$  джерела охолоджуючої рідини 59.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 49    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Повдовжений корпус 52 містить передню частину 33, яка приєднана до задньої частини 35. Аксиально переміщувана голка 61 форсунки розташована в передній частині 33, перший канал 81, другий канал 84 і відповідний поздовжній канал виконані у задній частині 35.

Форсунка 50 також має канал 47, що проходить від вхідного отвору 70 для ущільнювальної рідини до поздовжнього каналу 64 для ущільнення голки 61 у поздовжньому каналі 64.

Форсунка 50 має спеціальний керувальний клапан, проточно приєднаний між камерою 82 та вхідним отвором 53 для палива для вибіркового допускання потоку з камери 82 до вхідного отвору 53 для очищення клапана 50. Цей керувальний клапан переважно відкривається і закривається у відповідь на керувальний сигнал.

Форсунка 50 має підсилювач тиску рідини (не зображено) з пусковою камерою, приєднаною до вхідного отвору для пускової рідини. Форсунка 50 має підсилювальну камеру, з'єднану з вхідним отвором 70 для ущільнювальної рідини через зворотний клапан (не показано) і з зазором між першим каналом 81 і нагнітальним поршнем 80. Підсилювач тиску ущільнювальної рідини виконаний з можливістю підсилення тиску ущільнювальної рідини під час нагнітального ходу поршня 80 і підтримання підсиленого тиску ущільнювальної рідини таким, що поступово змінюється вище тиску в нагнітальній камері 82 і в будь-який час протягом такту упорскування. Переважно зазначений підсилювач тиску виконаний з можливістю підсилення тиску ущільнювальної рідини до тиску, вищого за максимальний тиск палива в камері 82.

Джерело ущільнювальної рідини має регульований тиск  $P_{s1}$ , а джерело рідкого палива має регульований тиск  $P_f$ , причому  $P_{s1}$  вищий, ніж  $P_f$ . У цьому варіанті виконання керований тиск  $P_{s1}$  може бути нижчим, ніж максимальний тиск у камері 82 під час ходу нагнітання. У цьому випадку  $P_{s1}$ , розмір зазору і максимум тиску у камері 82 під час ходу нагнітання вибрані взаємозалежно

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 50    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

так, що метанол входить у зазор і витісняє ущільнювальну рідину уздовж частини, але не по всій довжині поршня 80, причому ущільнювальна рідина витісняє по суті весь метанол у зазорі до наступного ходу нагнітання, тобто жодна частина зазначеного палива, таким чином, не буде у самій системі ущільнювального масла.

**Згідно дослідних даних [8] при використанні вдосконаленої конструкції модернізованих форсунок питома ефективна витрата метанолу зменшується на 1,0% (в нашому випадку на 3 г/(кВт×год) – з 308 до 305 г/(кВт×год)).**

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 51    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Мета дослідження полягає в аналітичному обґрунтуванні економічної доцільності введення в експлуатацію вдосконалених форсунок у двигун порівняно зі штатними.

У таблиці 4.1 приведені техніко-економічні показники двигуна 6G50ME-C9.5 з штатними та модернізованими форсунками.

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні показники двигуна

| Найменування                                | Позначення       | Розмірність      | Штатний   | Вдосконалений |
|---------------------------------------------|------------------|------------------|-----------|---------------|
| Потужність                                  | $N_e$            | кВт              | 10320     | 10320         |
| Частота обертання                           | $n$              | хв <sup>-1</sup> | 100       | 100           |
| Діаметр циліндра, м                         | $D$              | м                | 0,5       | 0,5           |
| Хід поршня, м                               | $S$              | м                | 2,5       | 2,5           |
| Питома витрата рідкого палива               | $g_e$            | кг/кВт·год       | 0,308     | 0,305         |
| Механічний ККД                              | $\eta_m$         | -                | 0,93      | 0,93          |
| Питома витрата масла                        | $g_m$            | кг/кВт·год       | 0,0022    | 0,0022        |
| Ціна двигуна                                | $C$              | грн              | 700000000 | 703500000     |
| Ціна рідкого палива                         | $C_p$            | грн/кг           | 30        | 30            |
| Ціна масла                                  | $C_m$            | грн/ кг          | 50        | 50            |
| Час роботи за рік                           | $t$              | год              | 2000      | 2000          |
| Число контрольних ремонтів                  | $\eta$           | -                | 1         | 1             |
| Сумарний коефіцієнт по капітальних ремонтах | $\epsilon_{min}$ | -                | 1,1       | 1,1           |
| Коефіцієнт частини вартості роботи          | $b$              | -                | 0,05      | 0,05          |

|                                                            |                  |     |        |        |
|------------------------------------------------------------|------------------|-----|--------|--------|
| Коефіцієнт використання потужності                         | $K_{\text{д}}$   | -   | 0,95   | 0,95   |
| Коефіцієнт частини вартості капітального ремонту           | $K_{\text{к.р}}$ | -   | 0,3    | 0,3    |
| Ресурс двигуна до першого перебирання                      | $t_{\text{пер}}$ | год | 30000  | 30000  |
| Ресурс двигуна до капітального ремонту                     | $t_{\text{к.р}}$ | год | 200000 | 200000 |
| Нормативний коефіцієнт порівняння економічної ефективності | E                | -   | 0,15   | 0,15   |

Оцінювання економічної ефективності здійснюється відповідно до вимог методичних рекомендацій.

Зазначений підхід використовується для вирішення таких завдань:

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

### Розрахунок економічної ефективності

#### 1) Річна продуктивність

$$N = K_{\text{д}} \cdot N_{\text{е}} \cdot t, \text{ кВт*г за рік}$$

#### 2) Термін служби

$$T = \frac{t_{\text{кр}}}{t}, \text{ рік}$$

#### 3) Річні поточні витрати на паливо

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

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 53    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

4) Річні поточні витрати на масло

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

5) Річні витрати на поточний ремонт

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

6) Річні поточні витрати на капітальний ремонт

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

7) Річний економічний ефект у споживача

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

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

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

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

9) Час окупності модернізованого двигуна

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

де  $\Delta K$  – додаткові одноразові витрати на модернізацію двигуна,

$\Delta S$  – річна економія при експлуатації модернізованого двигуна

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

Результати розрахунку економічної ефективності представлені в табл. 4.2.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 54    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку економічної ефективності

| Найменування                                                                 | Позначення                   | Розмірність        | Базовий двигун | Спроектований двигун |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------|----------------|----------------------|
| Річна продуктивність                                                         | N                            | <u>кВт·год/рік</u> | 17544000,0     | 17544000,0           |
| Термін служби                                                                | T                            | рік                | 15,0           | 15,0                 |
| Річні поточні витрати на паливо                                              | <u>З<sub>п</sub></u>         | грн                | 162106560,0    | 160527600,0          |
| Річні поточні витрати на масло                                               | <u>З<sub>м</sub></u>         | грн                | 1929840,0      | 1929840,0            |
| Річні витрати на поточний ремонт                                             | <u>З<sub>др</sub></u>        | грн                | 2333333,3      | 2345000,0            |
| Річні витрати на капітальний ремонт                                          | <u>З<sub>кр</sub></u>        | грн                | 3818181,8      | 3837272,7            |
| Річний економічний ефект у споживача                                         | U <sub>1</sub>               | грн                | 170187915,2    | 168639712,7          |
|                                                                              | U <sub>1</sub> <sup>16</sup> | грн                | 170187915,2    |                      |
| Річний економічний ефект у споживача від використання спроектованого двигуна | <u>E<sub>к</sub></u>         | грн                | 3645549,7      |                      |
| Додаткові одноразові витрати на модернізацію двигуна                         | ΔK                           | грн                | 3500000,0      |                      |
| Річна економія при експлуатації модернізованого двигуна                      | ΔS                           | грн                | 1548202,4      |                      |
| Час окупності модернізованого двигуна                                        | <u>T<sub>окуп</sub></u>      | рік                | 2,26           |                      |

Річний економічний ефект спроектованого двигуна в порівнянні з базовим двигуном за рахунок використанням вдосконалених форсунок визначений у розмірі 3645549,7 грн. Заміна базового двигуна окупиться приблизно за 2,3 роки.

## РОЗДІЛ 5

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ОХОРОНИ ПРАЦІ

#### *Вступ*

Форсунки малообертових суднових дизельних двигунів є ключовими елементами системи упорскування палива, що визначають якість змішування, стабільність згоряння, економічність та екологічні показники роботи двигуна. Їх технічний стан безпосередньо впливає на параметри тиску упорскування, рівномірність розпилювання та температуру в циліндрах. Проте обслуговування форсунок пов'язане з рядом виробничих небезпек: високим тиском палива (до 1500–2000 бар), високою температурою деталей, можливістю ін'єкційних травм і опіків, утворенням токсичних парів, забрудненням паливом та мастилом, роботою у замкнутому просторі машинного відділення.

Саме тому питання забезпечення охорони праці при обслуговуванні форсунок є критичним для безпеки машинної команди і безаварійної роботи двигуна. Комплекс заходів безпеки включає організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні, протипожежні та спеціальні вимоги до діагностики, демонтажу, очищення, регулювання та монтажу форсунок [9].

#### *1. Загальні вимоги охорони праці під час виконання робіт*

Обслуговування форсунок допускається лише механікам, які пройшли навчання, інструктаж з охорони праці та перевірку знань щодо правил роботи з високонапірними паливними системами. Особа повинна мати відповідну групу з електробезпеки, оскільки поруч можуть розташовуватися електричні підігрівачі та датчики.

Перед початком робіт необхідно:

- забезпечити достатнє освітлення (не менше 100 лк у зоні роботи);
- увімкнути вентиляцію для видалення парів палива та відпрацьованих газів;

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>KPM.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 56    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

- перевірити відсутність ковзких поверхонь;
- забезпечити наявність вільного доступу до форсунок та проходів шириною не менше 0,8 м;
- приготувати штатний інструмент та заборонити використання саморобних знімачів.

До обслуговування не допускаються працівники у стані стомлення, після нічної вахти або під впливом медичних препаратів, що знижують концентрацію уваги.

## ***2. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори***

При роботі з форсунками малообертових двигунів діють такі фактори:

### ***2.1. Механічні небезпеки***

- високий тиск палива, здатний викликати підшкірні ін'єкційні поранення;
- великі зусилля затягування різьбових з'єднань (до 300–500 Н·м);
- значна маса форсунки (10–35 кг), що створює ризик падіння;
- можливість раптового виходу пружин та голок розпилювача.

### ***2.2. Теплові небезпеки***

- температура вузлів двигуна після роботи досягає 250–350 °С;
- можливі парові опіки від залишків гарячого важкого палива.

### ***2.3. Хімічні та токсичні фактори***

- контакт шкіри з важким паливом (IFO, HFO) або дизельним паливом;
- пара і мікрокраплини палива, що підлягають інгаляційному впливу;
- нагаросутворення, яке містить частки сажі та канцерогенні речовини.

### ***2.4. Фізичні небезпеки***

- шум у машинному відділенні (до 100–110 дБ);
- вібрація корпусних конструкцій та обладнання;

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 57    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

- недостатня видимість в умовах аварійного освітлення.

### *2.5. Пожежо- та вибухонебезпека*

- наявність у зоні обслуговування паливних трубопроводів високого тиску;
- висока температура навколишніх поверхонь;
- можливість розпилювання палива у гарячі місця.

### *3. Організаційні заходи безпеки*

Організаційні заходи — це основа безпечного проведення робіт. Вони включають:

#### *3.1. Підготовка персоналу*

Усі механіки проходять:

- вступний інструктаж;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- періодичну перевірку знань (не рідше одного разу на рік);
- навчання з надання першої долікарської допомоги.

#### *3.2. Підготовка місця роботи*

Перед початком обслуговування необхідно:

- зупинити двигун та забезпечити його охолодження;
- зняти тиск у паливній рампі;
- перекрити подачу палива;
- закріпити таблички «НЕ ВМИКАТИ! ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ».

Поверхні навколо повинні бути очищені від пилу та залишків палива. Поруч встановлюється ємність для збирання відпрацьованого палива та мастила.

#### *3.3. Засоби індивідуального захисту*

Працівники зобов'язані використовувати:

- комбінезон із щільної тканини;
- хімічностійкі рукавиці;
- захисні окуляри закритого типу;

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 58    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

- взуття з протиковзкою підошвою;
- беруші або навушники;
- при роботі з розчинниками — респіратор фільтрувального типу.

#### **4. Вимоги безпеки під час демонтажу форсунок**

##### **4.1. Зниження тиску**

Перед від'єднанням форсунки необхідно повністю скинути тиск у високонапірному паливопроводі. Залишковий тиск навіть 10–20 бар здатний створити небезпеку.

Забороняється:

- відкручувати з'єднання при працюючому двигуні;
- використовувати інструмент з довгими важелями;
- підставляти руки під з'єднання при першому відвертанні гайки.

##### **4.2. Застосування підіймальних механізмів**

Маса форсунки може сягати 25–40 кг, тому використовуються:

- талі вантажопідйомністю до 0,5 т;
- ручні підйомні лебідки;
- спеціальні скоби, що кріпляться до корпусу форсунки.

Забороняється переносити форсунку на руках по слизькій палубі або по трапах.

##### **4.3. Демонтаж з головки циліндра**

При знятті форсунки необхідно:

- очищати посадочне місце від нагару та бруду перед викручуванням;
- використовувати тільки штатний інструмент;
- не допускати перекосу форсунки.

У випадку якщо форсунка «прикипіла», її не можна виймати ударами. Застосовують спеціальні знімачі та проникаючі мастила.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 59    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## **5. Безпека при розбиранні та очищенні форсунки**

Розбирання проводиться в майстерні або спеціальному палаті, обладнаній витяжною вентиляцією.

### **5.1. Механічне очищення**

Виконується:

- м'якими латунними щітками;
- дерев'яними або мідними скребками;
- без використання абразивів, що можуть пошкодити соплові отвори.

Заборонено застосовувати сталі щітки та гострі предмети.

### **5.2. Очищення в ультразвуковій ванні**

Застосовується лише для знімних елементів (голка, пружина, ковпачок).

Розчин повинен бути сертифікованим і неагресивним щодо легованих сталей.

### **5.3. Хімічне очищення**

За необхідності застосовують органічні розчинники. Обов'язково:

- робота в рукавицях та респіраторі;
- температура розчинника не вище 40 °С;
- заборона нагрівання до моменту випаровування.

## **6. Вимоги безпеки при стендових випробуваннях форсунок**

Стенд — найбільш небезпечний етап через високий тиск.

### **6.1. Підготовка стенду**

Необхідно перевірити:

- справність манометрів;
- цілісність гідравлічних шлангів;
- відсутність сторонніх предметів на стенді;
- герметичність системи при низькому тиску.

### **6.2. Заходи безпеки при роботі**

Під час випробувань забороняється:

- підносити руки до факела розпилювання;

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 60    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

- нахилитися над форсункою;
- знаходитися перед сопловими отворами;
- працювати без захисного кожуха.

Проникаюча сила струменя палива настільки велика, що здатна вводити пальне під шкіру на глибину кілька сантиметрів, що є загрожуючим життю ушкодженням.

## **7. Монтаж форсунки та перевірка герметичності**

### **7.1. Підготовка форсунки до монтажу**

Після ремонту проводиться:

- зовнішній огляд;
- перевірка на герметичність корпусу;
- перевірка тиску початку впорскування;
- перевірка факела розпилу.

### **7.2. Установлення у головку циліндра**

Перед установленням:

- очистити посадочне місце;
- замінити ущільнювальну мідну шайбу;
- дотриматися крутного моменту затягування згідно з техдокументацією.

Перетягування гайок призводить до:

- деформації корпусу форсунки;
- порушення геометрії голки;
- підтікання палива у гарячі зони.

### **7.3. Перевірка після монтажу**

Проводиться:

- запуск на холостому ході;
- візуальний контроль витоків;
- контроль температур відпрацьованих газів за циліндрами;
- перевірка тиску палива у рампі.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 61    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## **8. Пожежна безпека при роботі з форсунками**

Паливо малообертових двигунів (IFO, HFO, MDO) має підвищену температуру спалаху, однак на гарячих поверхнях може займатися.

Необхідно:

- мати поруч вогнегасники (CO<sub>2</sub>, порошкові);
- використовувати сорбенти для прибирання палива;
- уникати попадання палива на гарячі частини двигуна;
- не працювати з оголеними електропроводами.

Заборонено:

- курити у машинному відділенні;
- використовувати лампи розжарювання;
- зберігати забруднені ганчірки без металевої кришки.

## **9. Санітарно-гігієнічні вимоги**

У процесі роботи необхідно:

- мити руки спеціальними очищувачами, оскільки паливо містить канцерогенні компоненти;
- не торкатися обличчя під час роботи;
- після завершення робіт забезпечити провітрювання;
- здавати на утилізацію забруднені матеріали згідно з екологічними нормами.

## **10. Завершальні заходи**

Після обслуговування форсунок проводиться:

- інвентаризація інструменту;
- очищення робочої зони;
- складання звіту або запис у вахтовий журнал;
- перевірка надійності кріплень та відсутності підтікань.

Двигун допускається до навантаження лише після повної перевірки, проведеної старшим механіком або інженером.

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>KPM.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 62    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

### ***Висновки***

Забезпечення охорони праці при обслуговуванні форсунок малообертових дизельних двигунів ґрунтується на комплексному підході, що поєднує організаційні, технічні, санітарні та протипожежні заходи. Дотримання цих вимог дозволяє значно знизити рівень травматизму, запобігти аваріям та забезпечити надійну, ефективну і безпечну роботу двигуна в умовах експлуатації судна.

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 63    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження конструкції та принципів роботи паливних форсунок малообертового двотактного двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5, що використовується на танкері «MARI COUVA». Аналіз сучасних тенденцій розвитку форсунок суднових енергетичних установок показав, що зростання вимог до паливної економічності, екологічної безпеки та надійності роботи головних двигунів потребує впровадження удосконалених систем упорскування, здатних забезпечувати стабільне формування паливо-повітряної суміші на всіх режимах навантаження, включаючи роботу на альтернативних видах палива.

У рамках роботи розглянуто існуючі конструкції паливних форсунок та виконано їх порівняльний аналіз з урахуванням можливостей використання метанолу як основного палива.

Запропонована конструкція форсунки для двигуна MAN B&W 6G50ME-C9.5 включає:

- удосконалений підсилювач тиску, що забезпечує підвищений та стабільний тиск упорскування;
- покращену систему ущільнення з подачею ущільнювальної рідини у критичні зони голки та поршнів;
- конструктивні рішення для ефективного очищення форсунки від метанолу після завершення роботи;
- оптимізовану геометрію розпилювача, що забезпечує рівномірний дрібнодисперсний факел та узгодженість із вихровими потоками у камері згоряння;
- можливість інтеграції з електронною системою керування двигуном ME-серії.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 64    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Проведений тепловий та робочий розрахунок двигуна на важкому паливі та метанолі підтвердив, що використання удосконаленої форсунки дозволяє забезпечити покращене згоряння, зниження нерівномірності подачі палива, стабілізацію температурних полів та зменшення питомої витрати палива. Економічне обґрунтування показало доцільність упровадження модернізованої форсунки у практику експлуатації, оскільки її застосування забезпечує зменшення експлуатаційних витрат, підвищення ресурсу двигуна та покращення екологічних характеристик суднової енергетичної установки.

У розділі охорони праці сформовано комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпечної роботи персоналу під час обслуговування форсунок, включаючи вимоги до організації робочого місця, використання засобів індивідуального захисту, безпечного демонтажу та монтажу форсунок, проведення стендових випробувань і заходів пожежної безпеки. Дотримання цих вимог є необхідною умовою безаварійної експлуатації двигуна та збереження здоров'я машинної команди.

У цілому результати кваліфікаційної роботи підтверджують, що вдосконалення конструкції паливної форсунки для роботи на метанолі дозволяє підвищити паливну економічність, зменшити негативний екологічний вплив та підвищити технічну надійність головного двигуна судна. Запропоновані технологічні та конструктивні рішення можуть бути використані під час модернізації флоту та у подальших науково-дослідних розробках у сфері суднових енергетичних установок.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 65    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Significant ships of 2019. The Royal Institution of Naval Architects, 2019. pp. 48 - 49.
2. Everllence B&W G50ME-C10.7-LGIM. Project guide, 2025. 670 p.
3. Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, 2004. 914 p.
4. Наливайко В. С., Тимошевський Б. Г., Ткаченко С. Г. Суднові двигуни внутрішнього згоряння : підруч. Миколаїв : Вид-во Торубара В.В., 2015. 332 с.
5. Kees Kuiken. Diesel Engines for ship propulsion and power plants. Target Global Energy Training. Onnen, The Netherlands. July 2008.
6. Судновий механік: Довідник у 3 томах / за редакцією А. А. Фока. Одеса.: Фенікс, 2008. Т. 1. 1036 с.
7. Latarche M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Tenth edition. Elsevier Ltd, 2021. 930 p.
8. Woodyard D. Marine diesel engines and gas turbines. 9th ed. Oxford, 2009. 896 p.
9. ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>КРМ.142.6221м.25.24.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 66    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |