

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Проектування технічного обслуговування та діагностування
традиційної паливної апаратури дизельних двигунів з дослідженням
альтернативних методів очищення форсунок

Виконав: студент 6 курсу, групи МАм-62
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Денис ОНУК

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Керівник

Іван ГЕВКО

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Нормоконтроль

Михайло ЛЕВКОВИЧ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Зав. кафедри

Олег ЦЬОНЬ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Рецензент

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олег ЦЬОНЬ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«14» листопада 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Онуку Денису Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування технічного обслуговування та діагностування традиційної паливної апаратури дизельних двигунів з дослідженням альтернативних методів очищення форсунок

Керівник роботи Гевко Іван Богданович., д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» листопада 2025 року № 4/7-972

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19 грудня 2025

3. Вихідні дані до роботи Базовий ТП технічного обслуговування та діагностування традиційної паливної апаратури дизельних двигунів

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ. 4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Несправності системи живлення дизельного двигуна – 1А1.

Загальний алгоритм пошуку несправностей – 1А1.

Стенд для перевірки форсунок – 1А1.

Стенд для випробування насоса високого тиску – 1А1.

Стенд для ремонту паливних баків – 1А1.

Результати наукових досліджень – 1А1.

Дільниця для ремонту паливної системи – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Посада, ім'я та прізвище консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 14.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	18.11.25	
2	Технологічний розділ	25.11.25	
3	Конструкторський розділ	02.12.25	
4	Науково-дослідний розділ	09.12.25	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	16.12.25	
6	Оформлення графічної частини	16.12.25	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра		

Студент

(підпис)

Олег ОНУК

(ім'я та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Іван ГЕВКО

(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Проектування технічного обслуговування та діагностування традиційної паливної апаратури дизельних двигунів з дослідженням альтернативних методів очищення форсунок».

Робота виконана на кафедрі автомобілів ТНТУ ім. І. Пулюя. Керівник кваліфікаційної роботи магістра д.т.н. професор Гевко Іван Богданович.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 70 сторінок формату А4 та 8 аркушів формату А1 графічної частини сторінок додатків.

Ключові слова: стендові випробування, паливна економічність, параметри упорскування, розпилювання палива, забруднення форсунок.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Перевірка компресії.....	8
1.2 Перевірка токсичності відпрацьованих газів дизельного двигуна.....	10
1.3 Перевірка герметичності паливної системи.....	13
1.4 Висновки та постановка завдання на кваліфікаційну роботу магістра.....	13
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	16
2.1 Діагностування димності вихлопу дизельних двигунів.....	16
2.2 Діагностика працездатності дизельного двигуна.....	18
2.3 Стендова перевірка форсунок (Pop-testing).....	20
2.4 Випробування викидів дизельних двигунів.....	21
2.5 Розроблення ТП технічного обслуговування системи живлення дизельних та форсунок.....	25
2.6 Розрахунок трудомісткості та вартості ТО системи живлення дизельного двигуна.....	28
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	31
3.1 Стенди для перевірки паливних насосів високого тиску (ПНВТ).....	31
3.2 Датчик початку впорскування палива.....	34
3.3 Розрахунок тиску в камері впорскування для п'єзодатчика початку упорскування.....	38
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ.....	41
4.1 Рідини для очищення паливної системи та методи.....	41
4.2 Стендове промивання дизельних форсунок без демонтажу.....	46
4.3 Очищення форсунок гідродинамічним методом.....	49
4.4 Розроблення схемних рішень системи очищення форсунок методом гідродинамічної кавітації.....	51
4.5 Розрахунок економічної доцільності застосування комплексної очисної присадки.....	56
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	61

	6
5.1 Оглядові канами та естакади.....	61
5.2 Планування заходів із протидії небезпечним хімічним речовинам.....	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	69
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Дизельні двигуни посідають провідне місце в сучасному автомобільному та спеціальному транспорті завдяки високому коефіцієнту корисної дії, економічності та значному моторесурсу. Ефективність їх роботи значною мірою визначається технічним станом паливної апаратури, яка забезпечує точне дозування та своєчасне упорскування палива в камеру згоряння. Традиційні системи упорскування, попри свою конструктивну надійність і багаторічний досвід експлуатації, залишаються чутливими до якості палива, умов роботи та своєчасності технічного обслуговування. Особливо вразливим елементом є форсунки дизельних двигунів, забруднення яких призводить до порушення процесу розпилу, збільшення токсичності відпрацьованих газів, підвищення витрати палива та зниження загальної потужності двигуна.

У сучасних умовах, коли вимоги до екологічності та енергоефективності транспортних засобів постійно посилюються, важливими стають удосконалення процесів діагностування паливної апаратури та впровадження технологій, здатних підвищити якість її обслуговування. Традиційні методи очищення форсунок не завжди забезпечують необхідний рівень відновлення їхніх параметрів, що зумовлює необхідність пошуку нових, більш ефективних та ресурсозберігаючих підходів до очищення й регенерації робочих поверхонь.

Актуальність теми зумовлена потребою в розробленні раціонального та технологічно обґрунтованого процесу технічного обслуговування і діагностування паливної апаратури дизельних двигунів, а також необхідністю порівняльного аналізу альтернативних методів очищення форсунок, які здатні підвищити ефективність їх відновлення та забезпечити стабільність паливоподачі. Дослідження способів ультразвукового, хімічного та гідродинамічного очищення дозволяє комплексно оцінити їхню продуктивність та вплив на ресурс форсунок, що є важливою науковою і практичною задачею.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Перевірка компресії

Початковим етапом діагностування технічного стану циліндропоршневої групи дизельного двигуна є вимірювання компресії. Для виконання цієї операції застосовують спеціалізовані вимірювальні прилади – дизельні компресометри. Незважаючи на конструктивну простоту, вони є незамінними засобами контролю працездатності дизельного двигуна, оскільки без визначення тиску стиску об'єктивна оцінка стану ЦПГ є неможливою.

Промисловістю передбачено використання індикаторів пневмощільності моделей ДД-4200 та ДД-4210, призначених для сервісного супроводу й пошуку несправностей у дизельних двигунах. Зазначені прилади забезпечують реєстрацію максимального тиску стиску в окремих циліндрах у режимі пуску стартером, що дозволяє оцінити їх технічний стан, виявити нерівномірність роботи та визначити ступінь зношування елементів циліндропоршневої групи.

Загальна схема пошуку несправностей у двигуні може виглядати так:

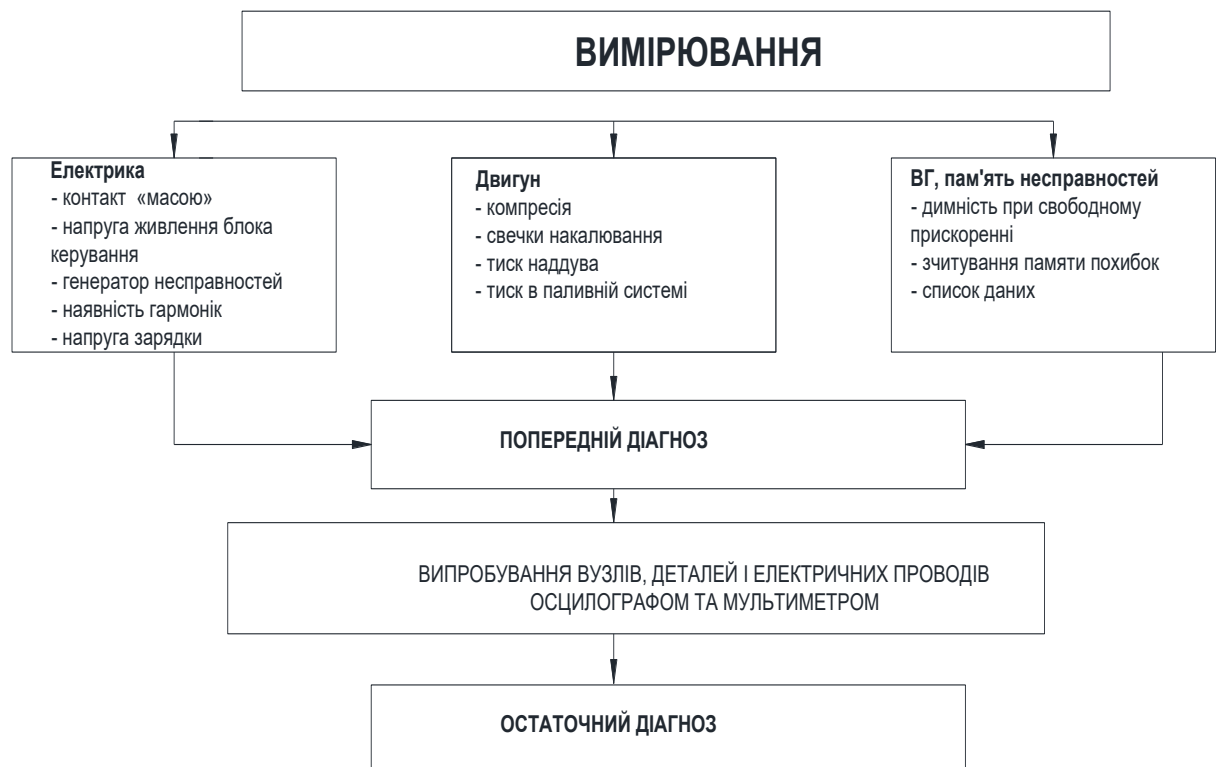


Рис. 1.1. Загальний алгоритм пошуку несправності.



Рис. 1.2. Дизельний компресометр.

Модифікації індикаторів відрізняються переважно конструктивним виконанням адаптерів (фальш-форсунок), що забезпечують можливість вимірювання компресії в дизельних двигунах різних типів і конструкцій. Модель ДД-4200 орієнтована на обслуговування двигунів вітчизняного виробництва та комплектується стандартним набором адаптерів, характерних для цих силових агрегатів. У свою чергу, ДД-4210 призначена для діагностування іноземних дизелів і оснащується набором із 14 спеціалізованих фальш-форсунок, що дозволяє охопити практично всю номенклатуру імпортованих двигунів, забезпечуючи високу універсальність при проведенні вимірювань.

Крім компресометра, під час комплексної перевірки технічного стану циліндрів доцільно використовувати аналізатор герметичності циліндрів (АГЦ-2) моделей ДД-4100 та ДД-4120. Принцип його роботи ґрунтується на вакуумному методі оцінювання пневмощільності циліндропоршневої групи, що дозволяє не лише визначити загальний рівень ущільнення, а й локалізувати джерела можливих витоків (через клапани, кільця чи прокладку головки блока).

Під час діагностування дизельного двигуна з використанням аналізатора герметичності циліндрів АГЦ-2 здійснюється реєстрація двох контрольних параметрів:

P_1 – рівень створеного у циліндрі вакууму в момент максимального розрядження;

P_2 – величина залишкового вакууму після стабілізації тиску.

Вимірювання проводять через отвір форсунки під час прокручування колінчастого вала стартером упродовж 3–4 секунд, що забезпечує відтворюваність показників та повноцінне заповнення робочої камери.



Рис. 1.3. Аналізатор герметичності циліндрів.

Отримане значення P_1 характеризує загальну герметичність циліндра та дає можливість оцінити ступінь зношування його гільзи, а також якість прилягання і щільність закриття клапанів. Параметр P_2 відображає стан поршневих кілець: за його величиною визначають наявність ознак їх зношування, закоксованості, можливу деформацію чи руйнування, а також дефекти перегородок у канавках поршня.

Таким чином, інтерпретація параметрів P_1 і P_2 дозволяє комплексно охарактеризувати стан елементів циліндропоршневої групи та локалізувати потенційні несправності без розбирання двигуна.

1.2 Перевірка токсичності відпрацьованих газів дизельного двигуна

Дизельне паливо відзначається більш високими температурними межами кипіння порівняно з бензином, що визначає його повільніше випаровування. У дизельному двигуні формування паливоповітряної суміші відбувається в обмежений проміжок часу, через що суміш часто має неповну однорідність. Крім того, дизельні силові установки працюють з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha > 1$, однак навіть за таких умов локальний дефіцит кисню в зоні розпилю палива спричиняє підвищене утворення сажі, оксиду вуглецю та вуглеводнів.

Процес згоряння розпочинається безпосередньо після впорскування палива у камеру згоряння через форсунку. Тривалість та фазування впорскування істотно впливають на індикаторний та ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна. Підвищення температури в зоні згоряння інтенсифікує формування оксидів азоту (NO_x) – одних із найбільш токсичних компонентів відпрацьованих газів дизелів.

Напрями зниження токсичності відпрацьованих газів. Одним із конструктивних способів впливу на рівень токсичних викидів є вибір типу камери згоряння. Двигуни з розділеними камерами (передкамерою чи вихровою камерою) демонструють нижчий рівень утворення NO_x порівняно з агрегатами з безпосереднім упорскуванням. Однак останні забезпечують кращу паливну економічність, оскільки зменшують теплові втрати та покращують умови згоряння.

Для забезпечення максимально повного згоряння палива необхідно досягти збалансованої взаємодії між вихровим рухом повітря у камері згоряння та геометрією факела розпилу, сформованого форсункою. Правильно підібрана структура факела, його кут розкриття та дисперсність крапель забезпечують рівномірний розподіл палива та сприяють зменшенню токсичності.

Упорскування палива. Фазування процесу впорскування є одним із ключових чинників, що визначають рівень токсичності відпрацьованих газів та паливну економічність дизельного двигуна. Зміщення моменту початку упорскування у бік пізнішого сприяє зменшенню утворення оксидів азоту (NO_x), оскільки знижується пікова температура згоряння. Водночас надмірне запізнення впорскування призводить до погіршення умов сумішоутворення, зростання витрати палива та підвищення концентрації незгорілих вуглеводнів (CH) у відпрацьованих газах. За даними експериментальних досліджень, збільшення кута випередження впорскування лише на 1° повороту колінчастого вала може підвищити викиди NO_x приблизно на 5 %, тоді як емісія CH при цьому здатна зрости до 15 %.

Сучасні дизельні агрегати обладнуються електронними системами керування упорскуванням, які забезпечують високоточну синхронізацію моменту подачі палива з поточними режимами роботи двигуна. Максимальної

точності можна досягти шляхом контролю початку підйому голки форсунки за допомогою датчика її переміщення, що дає змогу координувати процес упорскування безпосередньо в зоні формування факела.

Паливо, яке надходить у циліндр після фактичного завершення згоряння, не встигає вступити в реакцію окиснення й потрапляє у випускну систему у вигляді незгорілих фракцій, підвищуючи емісію вуглеводнів. Для запобігання цьому небажаному явищу необхідно мінімізувати об'єм камери між ущільнювальною поверхнею форсунки та її розпилювачем, а також виключити можливість підтікання палива та формування «пізнього» упорскування.

Зменшення токсичності та димності відпрацьованих газів значною мірою залежить від дисперсності факела розпилу. Дрібнокрапельний розпил забезпечує інтенсивнішу взаємодію частинок палива з повітрям, сприяє більш повному згорянню та знижує утворення сажі й незгорілих вуглеводнів. Досягти такого стану можливо за умови використання високого тиску упорскування та оптимально підібраної геометрії розпилювальних отворів.

Для стабільної та екологічно ефективної роботи дизеля коефіцієнт надлишку повітря повинен підтримуватися на рівні $\alpha = 1,1 \dots 1,2$, що забезпечує достатню кількість кисню для повного окиснення паливної суміші.

Температурний стан повітря, що надходить у циліндри дизельного двигуна, суттєво впливає на перебіг процесу згоряння та формування токсичних компонентів відпрацьованих газів. Підвищення температури повітряного заряду призводить до збільшення температури в зоні реакції, що, у свою чергу, інтенсифікує утворення оксидів азоту (NO_x) – продуктів високотемпературного окиснення азоту повітря.

Для двигунів, оснащених системою турбонаддуву, одним із найефективніших способів зниження концентрації NO_x є проміжне охолодження наддувного повітря (інтеркулеризація). Охолодження стисненого повітря дозволяє зменшити його температуру перед надходженням у камеру згоряння, підвищити щільність заряду та забезпечити більш сприятливі умови для повного й контрольованого згоряння суміші. Це не лише зменшує токсичність відпрацьованих газів, а й сприяє підвищенню загальної ефективності та економічності роботи двигуна.

1.3 Перевірка герметичності паливної системи

Комплексна діагностика та регулювання дизельних форсунок неможливі без застосування спеціалізованого випробувального обладнання. Одним із універсальних приладів, рекомендованих для таких робіт, є ДД-2110, який забезпечує перевірку більшості конструктивних типів дизельних форсунок. За його допомогою здійснюють визначення тиску початку впорскування, оцінювання структури та рівномірності факела розпилу, а також контроль герметичності запірного конуса на основі моменту появи краплини палива на наконечнику розпилювача. Окрім цього, прилад дозволяє проводити тестування гідрощільності по запірній поверхні й напрямній циліндричній частині форсунки.

Для оперативної, безрозбірної діагностики паливної апаратури без демонтажу форсунок з двигуна доцільно використовувати механотестер ДД-4500. Цей пристрій дає змогу не лише оцінити працездатність форсунок безпосередньо на моторі, а й визначити технічний стан плунжерних пар та нагнітальних клапанів паливного насоса високого тиску (ТНВД), що істотно скорочує тривалість діагностичних робіт.

Для контролю якості та ресурсу плунжерних пар, знятих із насоса або придбаних як запасні частини, застосовується прилад ДД-2115 (ПО-9691). Використання цього пристрою є особливо актуальним в умовах ринку, де значну частку становлять відновлені плунжерні пари з непередбачуваною якістю. Проведення попередньої перевірки дає змогу виявити можливі дефекти та запобігти встановленню елементів, що не відповідають нормативним вимогам.

1.4 Висновки та постановка завдання на кваліфікаційну роботу магістра

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення комплексу технологічних, діагностичних, конструкторських та експериментальних рішень, спрямованих на підвищення ефективності технічного обслуговування, контролю та очищення

системи живлення дизельних двигунів з акцентом на відновлення працездатності форсунок та покращення екологічних показників роботи силового агрегату.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання відповідно до структури пояснювальної записки:

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.

Провести аналіз методів вимірювання димності, охарактеризувати причини виникнення чорного, білого та синього диму, визначити діагностичні параметри та алгоритми оцінювання технічного стану двигуна за показниками димності.

Описати сучасні методи контролю технічного стану дизельного двигуна, включаючи сканерну діагностику, аналіз тиску в паливній рампі, перевірку компресії, температурних параметрів та системи розжарювання. Розробити узагальнений алгоритм діагностування працездатності.

Виконати аналіз методики стендової перевірки форсунок. Визначити вимоги до тиску відкриття, форми та рівномірності факела, оцінити умови герметичності та визначити технологічний регламент проведення рор-тестування.

Розглянути методики вимірювання токсичності та димності вихлопу, включаючи opacity-test, snap acceleration test та інші стандартизовані процедури. Визначити вплив паливної апаратури на екологічні показники двигуна.

Сформувати поетапний технологічний процес ТО системи живлення: очищення фільтрів, перевірка тиску, діагностика форсунок, їх демонтаж, очищення, перевірка та збирання. Обґрунтувати вибір обладнання, інструменту та раціональні режими виконання робіт.

Виконати розрахунок витрат робочого часу, кількості виконавців, тарифних ставок, вартості матеріалів та обладнання. Накласти результати на загальну калькуляцію вартості технічного обслуговування.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.

Провести огляд конструкцій сучасних стендів, визначити вимоги до точності вимірювання, можливостей регулювання та діапазону робочих тисків. Обґрунтувати вибір або модернізацію конкретного стенда для роботи з ПНВТ.

Проаналізувати принцип роботи, конструкцію та характеристичні показники датчиків початку впорскування. Розробити рішення щодо оптимізації або підвищення точності вимірювання моменту початку упорскування.

Виконати інженерний розрахунок зміни тиску в камері, визначити необхідні параметри датчика та його чутливість, побудувати залежності тиску від ходу плунжера та фаз упорскування.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ.

Провести порівняльний аналіз рідин та присадок для очищення паливної системи. Оцінити принцип дії, ефективність та ризики застосування.

Описати технологію промивання на спеціалізованих установках, визначити її переваги та недоліки, провести оцінку ефективності методу.

Проаналізувати процес гідродинамічної кавітації, умови формування кавітаційних зон, вплив на прецизійні поверхні форсунок, межі застосування технології.

Сформувати структурну схему системи, описати обладнання, логіку роботи, засоби контролю та безпеки. Розробити функціональну блок-схему процесу промивання.

Виконати техніко-економічний аналіз ефективності застосування присадок: зменшення витрат палива, продовження ресурсу форсунок, зниження вартості ремонту. Побудувати економічне обґрунтування використання присадки в системі обслуговування автомобіля.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Діагностування димності вихлопу дизельних двигунів

Для дизельних силових агрегатів певний рівень димності вважається характерним, особливо у двигунів із тривалим строком експлуатації. Водночас поява надмірної або нетипової димності є важливим діагностичним сигналом, який свідчить про порушення робочих процесів у системі упорскування, газообміну чи механічній частині двигуна.

Інтенсивне чорне задимлення формується внаслідок неповного окиснення вуглеводнів, що зазвичай є наслідком порушення співвідношення «повітря – паливо». Це може бути зумовлено:

- дефіцитом повітря у камері згоряння, викликаним засміченням фільтра, несправністю турбокомпресора або обмеженням у впускному тракті;

- подачею надмірної кількості палива через некоректну роботу окремих форсунок чи регуляторів тиску.

Для локалізації джерела несправності необхідно провести:

- балансувальний тест форсунок за допомогою діагностичного сканера з метою виявлення відхилень у їх продуктивності;

- аналіз коректності сигналу датчика тиску в паливній рампі (FRP);

- контроль стану впускної системи та турбіни на предмет обмеження повітряного потоку;

- перевірку витрати моторної оливи, адже її згорання також може зумовлювати появу темного диму.

Вихлоп білого кольору зазвичай спостерігається на етапі холодного пуску і є результатом неповного випаровування та згорання палива, яке конденсується у вигляді дрібнодисперсного аерозолю.

Однак стійка поява білого диму в прогрітому двигуні може вказувати на такі несправності:

- деградація характеристик форсунок (зміна геометрії факела, занижений тиск відкриття);

проникнення охолоджувальної рідини до камери згоряння унаслідок дефектів прокладки головки блока, тріщин у ГБЦ чи блоці циліндрів;

знижена компресія, яка не забезпечує необхідного підігріву повітря для самозаймання палива;

порушення у функціонуванні системи розжарювання (несправні свічки або реле керування).

Поява білого диму у вихлопі добре прогрітого дизельного двигуна часто слугує індикатором пропусків займання або порушення процесів сумішоутворення та згоряння. До найпоширеніших чинників, що зумовлюють виникнення такого димлення, належать:

Деградація або відсутність працездатності свічок розжарювання, що унеможливорює коректний пусковий підігрів повітряного заряду.

Зниження компресійного тиску в циліндрах, внаслідок чого температура стиснення не досягає рівня, необхідного для самозаймання палива.

Порушення геометрії або структури факела розпилення, зокрема нерівномірність диспергування чи затримка відкриття форсунки.

Проникнення охолоджувальної рідини до камери згоряння через дефекти прокладки ГБЦ, тріщини блока або головки циліндрів.

Блакитний або сіруватий дим з вихлопної системи є характерною ознакою згорання моторної оливи в циліндрах. Подібне явище виникає у випадках:

Надмірного зношення поршневих кілець, що спричиняє прорив оливи до камери згоряння.

Пошкодження або появи задирів на дзеркалі циліндра, що порушують герметичність циліндро-поршневої групи.

Порушення роботи сальників клапанів, через що олива просочується у впускний канал та далі в циліндр.

Крім цього, дим із сіруватим або блакитним відтінком може виникати внаслідок некоректної роботи окремих форсунок, коли надмірне або нерівномірне упрскування палива порушує процес згоряння та сприяє утворенню димності.

2.2 Діагностика працездатності дизельного двигуна

Ефективне виявлення відхилень у роботі дизельного двигуна доцільно починати з контролю рівня моторної оливи. Перевищення номінального рівня оливи зазвичай свідчить про проникнення дизельного палива в картер, що може бути наслідком несправності паливної апаратури або підтікання через зношені елементи системи упорскування.

Сучасні дизельні силові установки здебільшого допускають комплексну діагностику із застосуванням електронного сканера, оскільки ключові параметри, зокрема тиск у магістралях та дані з численних сенсорів, доступні для моніторингу в реальному часі. Найхарактернішими проявами порушень у роботі двигуна є:

Утруднений запуск у штатних умовах.

Повна відсутність можливості запуску (режим no start).

Значне збільшення тривалості прокручування колінчастого вала стартером

Втрата потужності або нестабільність динамічних характеристик

У випадках, коли двигун не запускається, особливу увагу приділяють порівнянню фактичних значень тиску в системі палива з мінімально необхідними параметрами, за яких можливе формування стабільного впорскування та займання.

Деталізацію процедури наведено на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Манометр, під'єднаний для контролю тиску палива, що подається підкачувальним насосом на дизельному двигуні.

Вимірювання тиску компресії є одним із ключових методів визначення ресурсу та загального механічного стану дизельного силового агрегату. Коректно виконана процедура дозволяє виявити зношення циліндропоршневої групи, негерметичність клапанів або інші дефекти, що впливають на якість згоряння.

Для проведення компресійного аналізу необхідно:

Демонтувати елемент доступу до камери згоряння – свічку розжарювання або форсунку (залежно від конструкції).

Використовувати манометр, спеціально розрахований на високі значення тиску, характерні для дизельних двигунів, оскільки обладнання для бензинових моторів не витримує необхідного діапазону вимірювань.

Нормативним вважається тиск не нижче 300 PSI (≈ 2068 кПа), а розбіжність між циліндрами має знаходитись у межах до 50 PSI (≈ 345 кПа). Відхилення від цих значень свідчать про порушення герметичності робочого об'єму або зношення елементів ГРМ рис. 2.2.

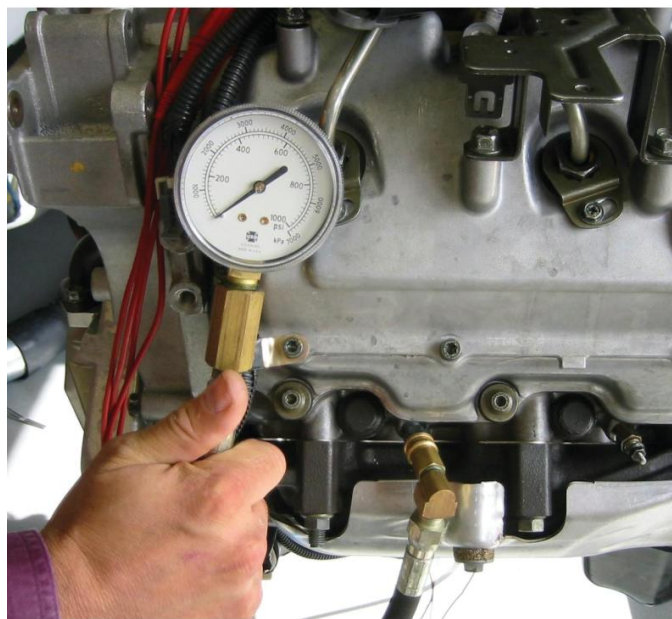


Рис. 2.2. Компресометр, спеціально призначений для вимірювання компресії в дизельних двигунах із високим ступенем стиснення, який застосовується під час перевірки технічного стану циліндро-поршневої групи.

Свічки розжарювання характеризуються зростанням електричного опору в міру підвищення їх температури. Цю закономірність можна використати як інформативний метод оцінювання рівномірності роботи циліндрів, особливо в двигунах без розвиненої електронної системи керування.

Алгоритм виконання перевірки:

Від'єднати електричні роз'єми та зафіксувати базові значення опору всіх свічок.

Запустити двигун при відключених свічках і забезпечити його роботу протягом кількох хвилин.

Після виходу на тепловий режим повторно виміряти опір кожного елемента.

Усі свічки мають продемонструвати однакову тенденцію зростання опору. Значно менший приріст сигналізує про циліндр, у якому процес згоряння відбувається некоректно.

Як альтернативний підхід застосовується температурний аналіз вихлопного колектора за допомогою пірометра – циліндр із пропусками займання завжди формує нижчу температуру газів.

2.3 Стендова перевірка форсунок (Pop-testing)

Для визначення технічного стану розпилювача та коректності геометрії факела застосовують спеціалізований стенд – рор-тестер. Під час ручного нагнітання тиску відтворюється момент відкриття форсунки, а манометр фіксує тиск, за якого голка піднімається.



Рис. 2.3. Типовий рор-тестер, призначений для перевірки факела розпилення дизельної форсунки.

У процесі перевірки оцінюють:

Тиск початку впорскування (відповідність заводським параметрам).

Форму та рівномірність факела розпилення (зазвичай – порожнистий конус).

Герметичність – підтікання палива при статичному тиску неприпустиме.

2.4 Випробування викидів дизельних двигунів

Тест на димність. Найпоширенішим методом контролю токсичності вихлопу дизельних двигунів, який застосовується в державних або локальних програмах технічного огляду, є тест на димність вихлопу.

Під димністю розуміють частку світлового потоку, який блокується частинками вихлопного диму.

■ 0% димності означає, що вихлоп повністю прозорий, не містить видимого диму і не перешкоджає проходженню світлового променя, спрямованого через потік газів.

У разі виявлення слідів дизельного пального на зовнішніх поверхнях двигуна існує ймовірність негерметичності в елементах паливної системи високого тиску. Оскільки такі витіки становлять підвищену небезпеку, під час огляду необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту: захисні окуляри, прозорий щиток, термостійкі рукавички та щільний одяг із довгими рукавами.

Для первинної локалізації місця пошкодження рекомендовано використовувати лист картону, який обережно підносять до ділянки, де підозрюється витік. У дизельних двигунах типу Duramax тиск у рампі Common Rail та форсуночних трубопроводах може перевищувати 20 000 PSI, тому пальне виходить у вигляді високодисперсного аерозолю, який:

не помітний візуально,

має здатність проникати крізь шкіру, що може спричинити тяжкі травми та токсичне ураження тканин.

Наявність витоку визначається появою локального потемніння на картоні. Після фіксації характерної плями двигун негайно зупиняють і проводять точну ідентифікацію дефектної ділянки вже на нерухомому силовому агрегаті.

100% непрозорості означає, що вихлопний дим настільки густий і темний, що повністю блокує проходження світлового променя, спрямованого через потік вихлопу.

Непрозорість на рівні 50 % означає, що димові гази знижують інтенсивність світлового променя, пропущеного крізь вихлоп, удвічі. Тобто половина світлового потоку поглинається або розсіюється частинками, що містяться у вихлопі, що характеризує середній рівень димності.

Тест різкого прискорення. У процесі цього випробування автомобіль утримується на місці за допомогою противідкотних упорів, гальма відпущені, а двигун різко прискорюють до режиму підвищеного холостого ходу. Коробка передач перебуває в нейтральному положенні, тоді як рівень димності вихлопу фіксується вимірювальною апаратурою. Тест виконується щонайменше шість разів; три найбільш стабільні результати усереднюють для отримання кінцевого показника.

У минулі роки при діагностиці несправного циліндра практикували перестановку дизельних форсунок між циліндрами. Однак у сучасних дизельних двигунах з системами високого тиску Common Rail застосовуються форсунки з індивідуальним високоточним калібруванням, тому їх не можна змінювати місцями під час сервісного обслуговування. Кожна форсунка має власний калібрувальний номер.



Рис. 2.3. Позначення, нанесені на бічній поверхні форсунки дизельного двигуна Cummins робочим об'ємом 6,7 л, містять її індивідуальний калібрувальний код.

Цей код використовується електронною системою керування для точного коригування паливоподачі відповідно до характеристик конкретної форсунки.

Тест розгону на ходу. Для автомобілів, оснащених механічною трансмісією, процедура контролю димності передбачає інтенсивний розгін на нижчій передачі – від частоти обертів холостого ходу до граничних обертів, які встановлені регулятором частоти обертання двигуна. У процесі розгону реєструються параметри димності вихлопу, що дозволяє оцінити якість згоряння палива під навантаженням.

Тест розгону з упором. Для транспортних засобів з автоматичною коробкою передач застосовується стендове випробування в нерухомому стані. Автомобіль фіксується робочою та стоянковою гальмівними системами, селектор трансмісії переводиться у положення «Drive». Після цього проводиться короткочасне повне натискання на педаль акселератора, під час якого фіксується рівень димності вихлопних газів.

Нормативні вимоги. Регламентовані показники димності для дизельних двигунів залежать від категорії транспортного засобу, його маси та екологічного стандарту. У більшості діючих методик приймається, що допустимий рівень непрозорості вихлопу не повинен перевищувати приблизно 40 %, якщо інше не встановлено спеціальними нормативами.

Дизельні силові установки реалізують процес займання палива виключно за рахунок теплоти, що виникає від значного стискання повітря в циліндрі. Уприскування дизельного палива відбувається в момент, коли температура стисненого повітря досягає значень, достатніх для самозаймання паливно-повітряної суміші.

У конструкції дизельних двигунів застосовують два принципово різні типи камер згоряння:

Камера з непрямым упорскуванням (IDI), де займання ініціюється у передкамері, з якої продукти згоряння надходять до основного об'єму циліндра;

Камера з прямим упорскуванням (DI), де форсунка подає паливо безпосередньо у головний простір згоряння.

Загальна кінетика дизельного згоряння включає три етапи:

Фаза затримки займання, коли паливо вже введене в циліндр, але реакція самозаймання ще не розпочалася;

Фаза інтенсивного тепловиділення, що супроводжується різким зростанням тиску в камері згоряння;

Фаза керованого згоряння, під час якої продовжується упорскування та дозоване окиснення решти порції палива.

Стандартна система живлення дизельного двигуна містить паливний бак, підкачувальний насос низького тиску, сепаратор для видалення води та фільтрувальний елемент тонкого очищення.

Подача палива під високим тиском забезпечується плунжерним або роторним насосом високого тиску, який приводиться від колінчастого або розподільчого валу та формує тиск, необхідний для роботи форсунок.

У сучасних дизельних двигунах найширше застосовують дві архітектури упорскування:

Розподільчі паливні насоси (VE-типу), що подають імпульс високого тиску до кожної форсунки окремою магістраллю;

Системи Common Rail, де всі форсунки живляться від спільної акумулюючої рампи, а момент і тривалість уприскування контролюються електронним блоком керування.

Відкриття форсунок може здійснюватися як механічно – завдяки тиску палива, сформованому розподільчим насосом, – так і електронно, за допомогою соленоїдів або п'єзоелементів у системах Common Rail.

Свічки розжарювання виконують роль допоміжного джерела тепла під час запуску холодного двигуна, а також сприяють зменшенню утворення білого диму в режимі прогрівання.

Комплекс систем очищення відпрацьованих газів сучасних дизельних двигунів включає дизельний окиснювальний каталізатор (DOC), фільтр твердих частинок (DPF), систему рециркуляції газів EGR та технологію селективного каталітичного відновлення SCR.

Оцінювання технічного стану дизельних двигунів здійснюють як засобами електронної діагностики (читання показників датчиків і параметрів системи), так і методами прямого контролю – вимірюванням опору свічок розжарювання, перевіркою компресії та аналізом роботи окремих циліндрів.

2.5 Розроблення ТП технічного обслуговування системи живлення дизельних та форсунок

Технічне обслуговування системи живлення повинно виконуватися за регламентом виробника і включає комплекс профілактичних та діагностичних операцій, особливо щодо форсунок, які є найвідповідальнішими елементами системи.

Необхідне обладнання та інструмент.

Стенд діагностики форсунок Common Rail (Bosch EPS 205, Hartridge Sabre CRi, Delphi YDT-35 або аналог).

Блок живлення та модуль керування форсунками.

Установки для ультразвукового очищення (40–60 кГц).

Установка для промивання паливної системи (Liqui Moly JetClean Tronic, Wynn's FuelServe тощо).

Компресометр дизельний (до 70 бар).

Манометр для вимірювання тиску підкачувального насоса (0–10 бар).

Підйомне обладнання, ключі, спеціальні знімачі форсунок.

Спеціалізований інструмент.

Динамометричний ключ (до 100 Н·м для затягування притискних скоб).

Знімачі форсунок (механічні або інерційні).

Універсальні набори для відновлення посадочних місць форсунок.

Ендоскоп для огляду камери згоряння.

Лінійка калібрів для вимірювання шайб компенсації.

Тестер розпилу форсунок (pop-tester) для механічних систем.

Послідовність виконання технічного обслуговування.

1 Підготовчі роботи.

Розмістити автомобіль на посту технічного обслуговування, забезпечити фіксацію коліс.

Від'єднати мінусову клему АКБ.

Очистити зони з'єднань ПНВТ, паливопроводів та форсунок від забруднень стисненим повітрям.

Перевірити рівень і стан дизельного палива.

2 Контроль та обслуговування паливних фільтрів.

Операції:

Демонтувати фільтр тонкого очищення.

Замінити фільтрувальний елемент.

Перевірити роботу водовідділювача, злити конденсат.

Перевірити герметичність корпусу фільтра.

Обладнання: ключі для фільтрів, ємність для палива, лійка, герметик.

3 Діагностика підкачувального насоса і тиску в низькому контурі

Операції:

Під'єднати манометр у магістраль після фільтра тонкого очищення.

Запустити двигун, зафіксувати тиск (норма 3–6 бар залежно від системи).

При відхиленнях:

перевірити пропускну здатність фільтра;

оцінити продуктивність насоса.

Обладнання: манометр низького тиску, перехідники.

4 Демонтаж і первинна оцінка стану форсунок

Операції:

Демонтувати декоративні кожухи.

Від'єднати роз'єм електричного керування форсунками.

Демонтувати обратні паливопроводи.

Відкрутити форсунки спеціальним торцевим ключем.

Провести візуальний огляд:

наявність сажі, нагару;

пошкодження корпусу;

підтікання по шайбі ущільнення;

стан розпилювача.

Обладнання: знімач форсунок, торцеві ключі, ендоскоп.

5 Відновлення посадочного місця форсунки (за потреби)

Операції:

Очистити місце встановлення спеціальною фрезою.

Перевірити глибину посадки.

Замінити мідну шайбу на нову.

Обладнання: набір для фрезування посадочних місць, мікрометр.

6 Ультразвукове очищення форсунок

Операції:

Розібрати форсунку, якщо конструкцією передбачено (механічні системи).

Помістити деталі у ванну з очищувальним розчином:

температура 50–60 °C,

тривалість 10–20 хв.

Продути стисненим повітрям, зібрати деталі.

Обладнання: ультразвукова ванна, очищувальний розчин, компресор.

7 Діагностика форсунок на стенді

Основні перевірки:

Тиск відкриття (для механічних форсунок):

норма 180–220 бар (залежить від конструкції).

Факел розпилення – рівномірний, конічний, без краплеутворення.

Подача палива в режимах:

холостого ходу;

часткового навантаження;

номінального тиску;

зворотний злив (return flow test).

Електронні форсунки Common Rail:

вимір корекцій;

контроль імпульсу;

тест герметичності голки;

тест зворотного витоку.

Обладнання: стенд EPS/CRi, калібрувальні пляшки, датчики тиску, електронний модуль керування.

8 Відновлення або заміна форсунок

Залежно від результатів діагностики:

Відновлення розпилювача (для механічних форсунок).

Заміна голки або прецизійних елементів (якщо конструкція допускає).

У разі значного зносу – заміна форсунки в зборі.

Прописування коду форсунки (IMA/ISA/C2I):

виконується через діагностичний сканер.

9 Встановлення форсунок і перевірка герметичності

Операції:

Встановити нову ущільнювальну шайбу.

Затягнути притискні планки з дотриманням моменту (25–35 Н·м залежно від двигуна).

Під'єднати зворотні паливопроводи і роз'єми.

Запустити двигун, перевірити:

відсутність підтікання по з'єднаннях;

стійкість роботи на холостому ходу;

корекції форсунок.

Контрольні параметри після ТО.

Параметр	Норма / Коментар
Тиск у рейці (CR)	250–350 бар на холостих обертах
Зворотній витік форсунки	не перевищує норму виробника
Балансування корекцій	± 2 мм ³ /хв (для більшості моторів)
Димність	в межах нормативів ($\leq 40\%$ opacity)

Завершальні операції.

Очистити моторний відсік, встановити всі кожухи.

Провести контрольний тест-драйв.

Зробити запис про проведення ТО в сервісній документації.

2.6 Розрахунок трудомісткості та вартості ТО системи живлення дизельного двигуна

Нормативний розрахунок трудомісткості ТО системи живлення дизельного двигуна

Прийняті позначення:

t_i – час виконання операції, год

n – кількість форсунок (беремо $n = 4$ для легкового автомобіля; за потреби можу перерахувати для 6 або 8)

$T_{\text{заг}}$ – загальна трудомісткість, год

K_d – коефіцієнт додаткових витрат часу (підготовчо-оздоблювальний, організаційні втрати) = 1.15

Таблиця 2.1. Трудомісткість поопераційно.

№	Операція	Час на 1 операцію	Кількість	Підсумок
1	Підготовчі роботи (очистка, демонтаж захистів, доступ)	0.30 год	1	0.30
2	Перевірка фільтру тонкого очищення, заміна	0.25 год	1	0.25
3	Вимірювання тиску в низькому контурі	0.20 год	1	0.20
4	Демонтаж форсунок	0.25 год	4 шт	1.00
5	Чистка посадочних місць, заміна шайб	0.15 год	4 шт	0.60
6	Ультразвукове очищення форсунок	0.20 год	4 шт	0.80
7	Діагностика на стенді (Common Rail)	0.30 год	4 шт	1.20
8	Монтаж форсунок на двигун	0.25 год	4 шт	1.00
9	Прописування кодів форсунок, діагностика	0.30 год	1	0.30
10	Контроль герметичності після запуску	0.20 год	1	0.20

Сумарна трудомісткість без коефіцієнтів:

$$T_{\text{без}} = 0.30 + 0.25 + 0.20 + 1.00 + 0.60 + 0.80 + 1.20 + 1.00 + 0.30 + 0.20 \\ = 5.85 \text{ год}$$

З урахуванням коефіцієнта додаткових витрат часу:

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{без}} \cdot K_d = 5.85 \cdot 1.15 = 6.72 \text{ год}$$

Вартість робіт:

$$S_{\text{робіт}} = T_{\text{заг}} \cdot S_1 = 6.7 \cdot 250 = 1675 \text{ грн}$$

Загальна вартість ТО:

$$S_{\text{заг}} = S_{\text{робіт}} + S_{\text{мат}}$$

$$S_{\text{заг}} = 1675 + 550 = 2225 \text{ грн}$$

Підсумок розрахунку

Показник	Значення
Загальна трудомісткість	6.7 нормо-год
Вартість робіт	1675 грн
Вартість матеріалів	550 грн
Загальна вартість ТО	2225 грн

Розроблений технологічний процес технічного обслуговування системи живлення дизельного двигуна з акцентом на форсунках характеризується загальною трудомісткістю 6.7 нормо-годин, що відповідає рівню складності робіт із демонтажем, діагностикою, очищенням та відновленням форсунок.

Сумарна вартість ТО становить 2225 грн, включаючи роботу та витратні матеріали.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Стенди для перевірки паливних насосів високого тиску (ПНВТ)

Одним із ключових елементів технологічного оснащення дільниці з ремонту паливної апаратури є стенд для випробування та регулювання паливних насосів високого тиску (ПНВТ). Це найбільш вартісний та технологічно складний прилад у майстерні, до якого висуваються підвищені вимоги щодо точності, надійності та стабільності роботи. На сучасному ринку представлений широкий спектр стендів різних виробників і модифікацій, що дає змогу формувати комплект обладнання відповідно до специфіки робіт та профілю ремонтної дільниці.

Вибір конкретної моделі стенда визначається обсягом діагностичних операцій, типами насосів, з якими працює підприємство, а також необхідною продуктивністю та функціональністю. У подальшому викладі буде детально розглянуто різновиди стендів, призначених для діагностування й настроювання ПНВТ, а також додаткове обладнання, яке є обов'язковим для забезпечення повноцінної та достовірної перевірки технічного стану паливних насосів.

Одним із базових елементів технологічного оснащення дільниці з ремонту паливної апаратури є стенд для діагностування та регулювання паливних насосів високого тиску (ПНВТ). Це найбільш складний і матеріаломісткий прилад у майстерні, а тому до його точності, надійності та функціональних можливостей висуваються особливо жорсткі вимоги. Сучасний ринок пропонує значну кількість стендів різних виробників – від компактних малопотужних установок до високотехнологічних комплексів промислового класу.

Діапазон вартості таких стендів коливається приблизно від 5 000 до 150 000 у.о., і вибір конкретної моделі визначається не стільки ціною, скільки профілем ремонтної дільниці, спектром насосів, що підлягають обслуговуванню, та очікуваним строком окупності. Оптимальним у більшості випадків є підхід, заснований на критерії «ціна – функціональність – універсальність», тобто придбання стенда, який дозволяє працювати з максимально широкою номенклатурою насосів як вітчизняного, так і імпортного виробництва. Це

особливо важливо з огляду на різні вимоги до режимів випробування, характеристик регуляторів та конструкційних особливостей ПНВТ різних типів.

За допомогою таких стендів можливо виконувати широкий спектр діагностичних і регулювальних операцій, зокрема:

- визначення продуктивності секцій ПНВТ та рівномірності подачі палива;
- установлення частоти обертання приводного вала у момент спрацювання регулятора та у момент повного припинення подачі;
- вимірювання тиску відкриття нагнітальних клапанів;
- визначення кута початку і закінчення нагнітання палива за положенням вала насоса;
- перевірку правильності чергування подачі секціями;
- установлення фактичних кутів початку та завершення упорскування під час діагностування;
- оцінювання характеристик автоматичної муфти випередження упорскування;
- підтримання стабільної температури робочої рідини та елементів системи під час випробувань.

Завдяки такому комплексу можливостей стенд забезпечує високоточне відтворення робочих режимів ПНВТ та дозволяє проводити їх регулювання відповідно до технічних вимог виробника.



Рис. 3.1. Стенд для діагностики й регулювання ПНВТ мод. ДД-1000.

Визначення та точне встановлення кута початку впорскування палива форсункою належить до критично важливих технологічних процедур у процесі регулювання паливного насоса високого тиску дизельного двигуна. Саме цей параметр визначає синхронізацію подачі палива з положенням поршня, впливає на тривалість процесу згоряння, теплове навантаження елементів камери згоряння та загальні показники паливної економичності й екологічності двигуна.



Рис. 3.2. Стенд для діагностики й регулювання ПНВТ мод. ДД-1001.



Рис. 3.3. Стенд ДД-1002 для вбудованої перевірки ПНВТ1.



Рис. 3.4. Стенд для діагностики й регулювання ПНВТ мод. ДД-1005.

3.2 Датчик початку впорскування палива

Для фіксації моменту початку впорскування палива форсункою (далі – моменту початку впорскування) на паливних стендах виробництва Красноуфімського дослідно-експериментального заводу (КОЕДЗ), зокрема моделях КИ-921М, КИ-921МТ, КИ-22205, КИ-22205-01, застосовуються контактні датчики початку впорскування. Конструктивна схема такого датчика подана на рисунку 3.5.

Попри відносну простоту конструкції, яку можна вважати єдиною перевагою контактного датчика, його експлуатація супроводжується низкою істотних недоліків:

незручність кріплення форсунок у притискній скобі стендів моделей КИ-921М, КИ-921МТ та КИ-22205, що ускладнює монтаж і демонтаж під час багаторазових випробувань;

недостатня якість ущільнення форсунок за допомогою прокладок (поз. 4 або 13): під дією притискного зусилля ущільнювальні елементи деформуються без опору, швидко втрачають форму та виходять з ладу;

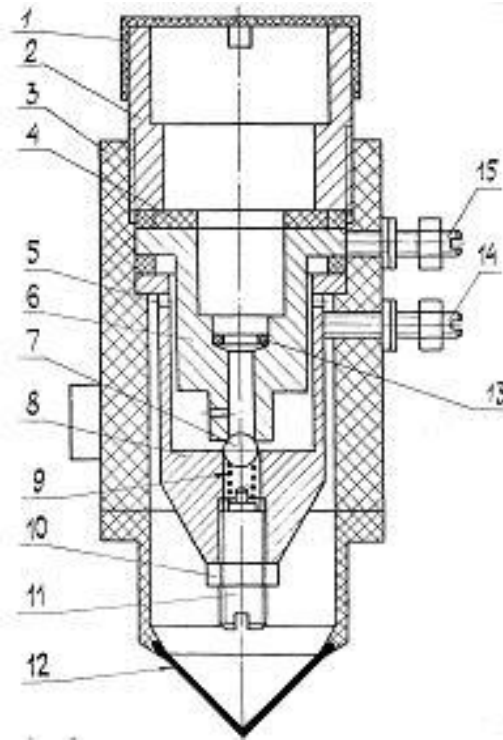


Рис. 3.5. Контактний датчик початку упорскування:

1 – кришка; 2 – гайка; 3 – стакан; 4, 13 – прокладки; 5 – зливальний отвір; 6 – воронка; 7 – контактна куля; 8 – склянка; 9 – пружина; 10 – гайка; 11 – регулювальний гвинт; 12 – сітка; 15, 14 – контактні гвинти.

передчасне зношування посадкового місця кульки 7 у вирві 6, яке особливо інтенсивно проявляється під час діагностики ПНВТ стандарту ЄВРО; пошкодження цієї поверхні призводить до втрати працездатності датчика;

часті збої у роботі електричного кола, що зумовлює нестабільність сигналу та порушує точність визначення моменту початку впорскування.

У сукупності ці фактори значно знижують надійність та відтворюваність вимірювань, що є критично важливим при регулюванні паливних насосів високого тиску.

Електричне коло контактного датчика формується послідовністю елементів: перший контактний гвинт 15 – вирва 6 – куля 7 – пружина 9 – регулювальний гвинт 11 – склянка 8 – другий контактний гвинт 14. Така багатоланкова схема містить значну кількість механічних і електричних з'єднань, які мають схильність до розхитування, окиснення або зміни

контактного опору під час експлуатації. У результаті електричне коло працює нестабільно, що негативно впливає на точність та повторюваність показань датчика і, відповідно, на загальну надійність вимірювальної системи.

Разом із тим, за умови повної справності всіх контактних поверхонь датчик здатний забезпечувати досить прийнятну точність визначення моменту початку впорскування палива. Однією з ключових експлуатаційних вимог до таких приладів є ідентичність показань різних екземплярів за однакових умов випробування. Практика свідчить, що досягти такої відповідності для контактних датчиків складно через конструктивні особливості та різну ступінь зношування їхніх елементів.

З огляду на це пропонується застосування датчика іншої, більш надійної конструкції, схематичне зображення якого наведено на рисунку 3.6.

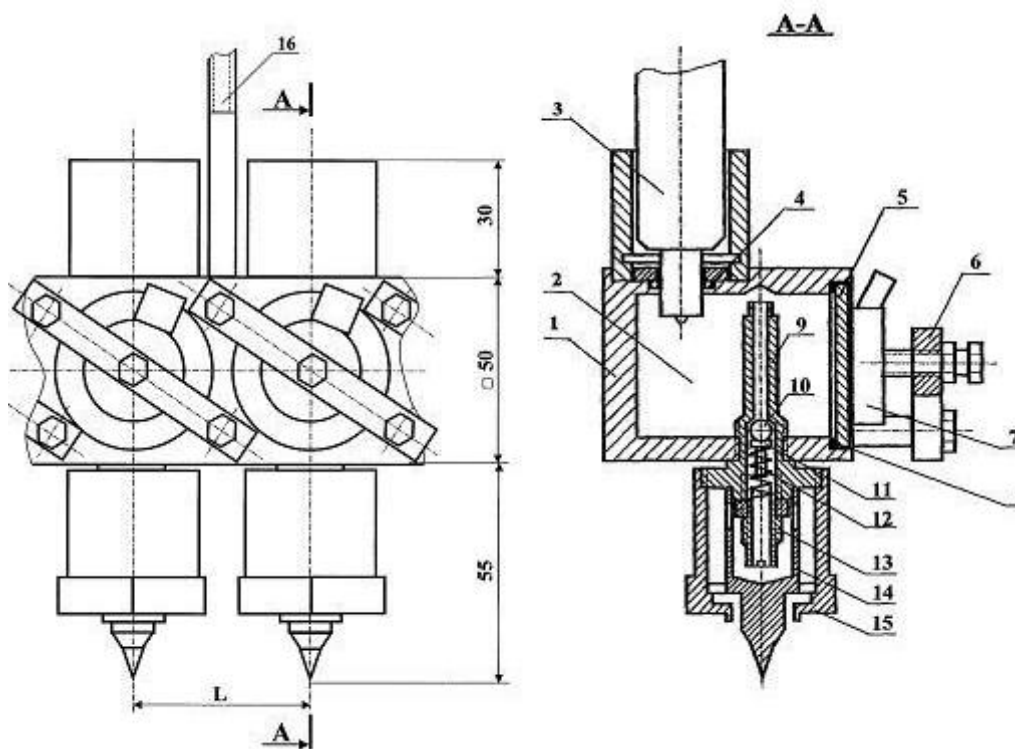


Рис. 3.6. П'єзоелектричний датчик початку упорскування палива форсункою:

1 – корпус; 2 – камера упорскування; 3 – форсунка; 4 – ущільнювальне кільце; 5 – кришка; 6 – притиск; 7 – п'єзодатчик; 8 – ущільнювальна прокладка; 9 – клапан-обмежник тиску; 10 – кулька; 11 – грибок; 12 – пружина; 13 – регулювальний гвинт; 14 – внутрішня склянка; 15 – зовнішня склянка; 16 – шпилька кріплення форсунок.

Принцип дії датчика ґрунтується на реєстрації раптового зростання тиску в герметичній камері упорскування. У вихідному стані камера заповнена паливом та утримує невеликий надлишковий тиск у межах 0,1–0,3 МПа. Запірний елемент клапана-обмежувача тиску перебуває в закритому положенні, забезпечуючи герметичність внутрішнього об'єму.

На початку впорскування форсунка подає невеликий об'єм палива в камеру, що спричиняє різке зростання тиску – характерний ефект гідравлічного удару. Клапан-обмежувач відкривається не миттєво, а з певною часовою затримкою, зумовленою інерційністю рухомих елементів (кульки, грибка та частково пружини). Упродовж цього короткого періоду камера залишається герметичною, що дає змогу зареєструвати максимальну динаміку наростання тиску.

Підвищений тиск передається через кришку 5 на п'єзоелемент 7, який зв'язаний із блоком формування вихідного сигналу. Останній генерує імпульс у момент, коли напруга на п'єзоелементі досягає порогового значення, встановленого з певним запасом відносно рівня завад. Саме фронт цього імпульсу приймається за момент початку упорскування палива.

Після відкриття клапана-обмежувача надлишкове паливо витісняється крізь канал регулювального гвинта 13 у внутрішню склянку 14, звідки через отвори у її стінках переходить у міжстінковий простір. Далі паливо спрямовується в кільцеву щілину між днищем зовнішньої склянки 15 та напрямним конусом внутрішньої склянки 14 і витікає назовні у вигляді стабільного ламінарного струменя.

Важливою особливістю роботи системи є ефективне видалення газових включень: оскільки вихід палива відбувається з верхньої зони камери, бульбашки газу гарантовано вимиваються потоком, що підвищує точність вимірювань.

Після завершення упорскування запірний елемент клапана-обмежувача знову перекриває канал, зберігаючи в камері попередній рівень надлишкового тиску. Завдяки цьому початкові умови для наступних циклів упорскування залишаються стабільними навіть при значних змінах величини циклової подачі.

Експериментальні дослідження показали, що розкиди параметрів п'єзоелементів, характерні для датчиків детонації, практично не впливають на точність роботи датчиків початку упорскування. Це дозволяє замінювати їх без проведення додаткових налаштувань або корекцій.

На стендах моделей КИ-921М, КИ-921МТ, КИ-22205, КИ-22205-01 заміна контактних датчиків на п'єзодатчики здійснюється без будь-якого доопрацювання конструкції стенда, що спрощує модернізацію та підвищує точність діагностичних операцій.

3.3 Розрахунок тиску в камері впорскування для п'єзодатчика початку упорскування

Під час діагностування ПНВТ на стенді визначальним параметром є динаміка наростання тиску в камері впорскування, оскільки саме цей показник реєструє п'єзоелектричний датчик і формує вихідний сигнал, що відповідає початку упорскування. Для забезпечення коректної роботи датчика необхідно, щоб тиск у камері досягав мінімального спрацьованого значення – близько:

$$p_{\min} = 0,1 \dots 0,3 \text{ МПа.}$$

а під час імпульсу впорскування створювався різкий стрибок тиску (ефект гідроудару), значення якого визначає чутливість та точність датчика.

1. Вихідні дані для розрахунку

Діаметр камери упорскування:

$$d = 14 \text{ мм.}$$

Площа поперечного перерізу камери:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Швидкість наростання тиску під час імпульсу впорскування:

$$\frac{dp}{dt} = 12 \dots 20 \text{ МПа/мс}$$

Початковий надлишковий тиск у камері (до впорскування):

$$p_0 = 0,2 \text{ МПа}$$

Оціночний приріст тиску під час гідроудару:

$$\Delta p = 6 \dots 10 \text{ МПа}$$

2. Розрахунок сили, що передається на п'єзоелемент

Під дією тиску на кришку датчика формується сила:

$$F = p \cdot A$$

2.1. Площа камери

$$A = \frac{\pi \cdot (0,014)^2}{4}$$

$$A = 1,539 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

2.2. Максимальний тиск у момент імпульсу

$$p_{\max} = p_0 + \Delta p$$

$$p_{\max} = 0,2 + 8 = 8,2 \text{ МПа}$$

2.3. Сила, що діє на п'єзоелемент

$$F = 8,2 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 1,539 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$F = 1262 \text{ Н}$$

Отже, на п'єзоелемент у момент початку впорскування діє сила приблизно 1,26 кН.

3. Оцінка вихідної напруги п'єзоелемента

Для п'єзокераміки характерний коефіцієнт:

$$k_p = 2 \dots 4 \frac{\text{мВ}}{\text{Н}}$$

Візьмемо середнє значення:

$$k_p = 3 \frac{\text{мВ}}{\text{Н}}$$

Тоді вихідна напруга датчика:

$$U_{\text{out}} = F \cdot k_p$$

$$U_{\text{out}} = 1262 \cdot 0,003 = 3,786 \text{ В}$$

Вихідний сигнал $\approx 3,8 \text{ В}$, що повністю відповідає вимогам електронного формувача сигналу.

Отримане значення сили та напруги свідчить про те, що:

п'єзодатчик працює в оптимальному режимі;

стрибок тиску є достатнім для чіткої фіксації моменту початку упорскування;

різкі перепади тиску не перевищують допустимого навантаження для корпусу камери;

вихідний сигнал має високий рівень завадостійкості навіть на стендах зі значним шумовим фоном.

Розрахунок підтверджує, що конструкція п'єзодатчика забезпечує формування вимірюваного імпульсу під час впорскування палива, а отриманий рівень напруги дозволяє стабільно та з високою точністю реєструвати момент початку подачі палива.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Рідини для очищення паливної системи та методи

Усю різноманітність хімічних засобів, призначених для обслуговування паливної апаратури, можна впорядкувати за функціональним призначенням. До основних груп належать: препарати для очищення елементів паливної системи, засоби для видалення нагару та відкладень у камері згоряння, а також присадки, що коригують фізико-хімічні властивості палива. З огляду на характер дії, такі засоби поділяють на концентровані комплексні очищувачі, «м'які» очисники, а також препарати цільового (спрямованого) впливу, які останніми роками виділено в окрему категорію.

Подібна деталізована класифікація зумовлена потребою диференційованого підходу до очищення паливної системи, який враховує загальний технічний стан автомобіля, пробіг, умови експлуатації, а також конструктивні особливості встановленої системи живлення – зокрема тип паливного насоса, форсунок та конфігурацію паливопроводів. Правильний вибір хімічного засобу дає змогу забезпечити ефективне очищення без ризику пошкодження компонентів та з мінімальним втручанням у працездатність системи.

Комплексні концентровані засоби для очищення паливної системи вирізняються підвищеною активністю щодо видалення вуглеводневих відкладень. Їхня дія спрямована на очищення всіх елементів паливотранспортного маршруту – від бака та магістралей до розпилювачів форсунок. Значна частина препаратів цієї групи здатна також усувати нагар та смолисті відкладання в зоні камери згоряння, на поверхнях клапанних тарілок і стрижнів.

Застосування концентрованих очищувачів є доцільним лише для паливних систем автомобілів з невеликим пробігом або тих, що регулярно проходять профілактичне очищення. У протилежному випадку використання таких засобів може спричинити небажані наслідки. Інтенсивна формула препарату здатна відділити значні обсяги забруднень, що накопичилися в баку, паливопроводах та

інших елементах системи за тривалий період експлуатації. Вивільнені частинки твердої фракції разом із паливом потрапляють у фільтрувальний елемент, що може викликати його прискорене засмічення, а в окремих випадках – вихід із ладу елементів паливної апаратури внаслідок абразивної дії частинок.

Щоб уникнути подібних ризиків, виробники комплексних очищувачів рекомендують використовувати їх на постійній основі, додаючи препарат при кожному заправленні. Такий підхід забезпечує поступове, контрольоване очищення та попереджає різке відділення великої кількості забруднень. Крім того, регулярне застосування засобів цієї групи є економічно доцільним, оскільки сприяє зменшенню витрати палива і стабілізації параметрів роботи паливної апаратури.

До найпоширеніших представників комплексних присадок, доступних на вітчизняному ринку, належать очищувальні засоби компаній LIQUI MOLY (комплексна присадка в бензин, арт. 3903), STP (концентрований очищувач інжекторів ST-2075) та інші аналогічні продукти.

Наступну групу становлять так звані «м'які» очищувачі, дія яких спрямована на поступове видалення лакових, смолистих та желеподібних відкладань із паливної системи без порушення структури твердих осадів. Завдяки помірній хімічній активності такі засоби є найбільш безпечними для використання в автомобілях із тривалим строком експлуатації та значним пробігом, де накопичення забруднень є типовим явищем.

Разом з тим слід враховувати, що «м'які» препарати не забезпечують миттєвого ефекту. Результативність очищення залежить від ступеня забруднення системи, хімічної природи відкладень та якості конкретного засобу. У більшості випадків позитивні зміни в роботі паливної апаратури стають помітними лише після проходження декількох тисяч кілометрів пробігу, коли активні компоненти препарату накопичують достатній ефект.

На відміну від виробництва концентрованих універсальних очищувачів, розроблення «м'яких» засобів є набагато складнішим технологічним процесом. Він потребує глибоких фундаментальних досліджень, випробувань на сумісність із різними матеріалами паливної системи та багатоступеневого тестування ефективності сформульованого складу. Такий обсяг робіт можуть забезпечити

лише виробники, що мають відповідну науково-технічну базу та досвід у галузі паливної хімії.

При цьому покупець часто стикається з тим, що за назвою продукту складно визначити, до якої категорії він належить – до «м'яких» очищувачів або до концентрованих комплексних засобів. Офіційна класифікація присадок не містить чітких визначень, тож для визначення типу препарату необхідно ознайомитися з описом його дії та принципом впливу на відкладення вуглеводневого походження.

Серед «м'яких» очистників, які найбільш часто представлені на українському ринку, можна виділити такі продукти:

очищувач паливної системи STP (78340US);

очищувач карбюраторів та інжекторів STP (ST-2088);

присадка для очищення бензинових систем упорскування LIQUI MOLY (арт. 1993);

«Комплексний очищувач паливної системи з каталізатором горіння» LAVR (Ln 2101);

Injektor-Reiniger компанії BIZOL;

очищувач паливної системи PINGO (арт. 00373 7) та інші засоби подібного призначення.



Рис. 4.1. М'які очисники фірми LIQUI MOLY.

До категорії хімічних засобів спрямованої дії належать препарати, формула яких передбачає контрольований момент активації. У процесі змішування з бензином та циркуляції в баку чи паливопроводах такі присадки

залишаються хімічно інертними. Їх активні компоненти починають працювати лише після потрапляння у зону підвищених температур, що зазвичай перевищують $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Саме в цих умовах ініціюється розклад або активація спеціальних реагентів, що запускає процес інтенсивного очищення.

Завдяки температурно-керованому механізму дії засоби цього типу демонструють високу ефективність у видаленні вуглеводневих нашарувань, лакових плівок та смолистих відкладань. Їх застосування доцільне для очищення важкодоступних і термічно навантажених елементів, таких як:

- поверхні камери згоряння;
- тарілки та стрижні впускних клапанів;
- канали та розпилювачі форсунок;
- зони утворення нагару в ділянках активного теплообміну.

Оскільки присадки активуються лише за робочих температур двигуна, вони не створюють ризику відшарування великих фрагментів забруднень у паливній магістралі, що підвищує загальну безпечність їх використання.

На українському ринку препарати спрямованої дії представлені низкою виробників, серед яких можна виокремити:

- присадку для фінального очищення бензинових систем упорскування LIQUI MOLY (арт. 5153);
- очищувач інжекторів LAVR (Ln 2109);
- «Наноочиститель інжекторів бензинового двигуна» FENOM (FN 1236);
- інші продукти аналогічного принципу дії.



Рис. 4.2. Очистники форсунок FENOM.

Методи промивання дизельних форсунок. Одним із найбільш доступних, проте водночас найменш результативних способів очищення дизельних форсунок є використання спеціальних присадок, що додаються безпосередньо до палива. Подібні засоби містять розчинники органічного походження (так звані сольвенти), які подаються разом із паливом і мають на меті поступово розм'якшувати й видаляти забруднення з елементів паливної системи.

Такий підхід має суто профілактичний характер. Очищення відбувається не лише у форсунках, а й по всіх ділянках паливопроводу, що суттєво знижує концентрацію активних компонентів у зоні, де фактично потрібна максимальна дія. У результаті ефективність методу залишається невисокою, особливо у випадках, коли на поверхнях форсунок уже сформувалися щільні, високоміцні смолисті або коксові відкладення.

З огляду на механізм дії, додавання промивної рідини до паливного бака доцільніше розглядати як попереджувальний захід, що дозволяє зменшити швидкість накопичення забруднень. Проте навіть у профілактичному режимі цей метод не гарантує повного запобігання утворенню нагару чи лакового шару, оскільки його результативність суттєво залежить від якості палива, режимів експлуатації та конструктивних особливостей паливної апаратури.

У разі значної забрудненості системи застосування присадки може мати небажані наслідки. Інтенсивна дія розчинника на старі відкладення може призвести до масового відшарування твердих фрагментів, які разом із паливом потрапляють у фільтруючі елементи, а іноді – навіть у камеру згоряння. На стінках циліндрів у такому випадку можуть формуватися додаткові відкладення, що порушують тепловідведення від робочих поверхонь, сприяють локальному перегріву та підвищують ризик пошкодження поршневої групи.

Суттєвий недолік цього методу полягає у тому, що ступінь можливих ушкоджень передбачити складно, оскільки характер відкладень, їхня адгезія та кількість залежать від тривалості експлуатації, якості пального та технічного стану двигуна. Саме тому використання присадок у забруднених паливних системах потребує обережності та не може розглядатися як основний метод очищення форсунок.



Рис. 4.3. Рідина для очистки форсунок.

4.2 Стендове промивання дизельних форсунок без демонтажу

Більш технологічно досконалим способом очищення дизельних форсунок є застосування спеціалізованих установок, які підключаються безпосередньо до паливної системи двигуна. Таке підключення забезпечує подачу мийного реагенту в обхід штатної системи живлення, що дає змогу проводити очищення без демонтажу форсунок.

Суть методу полягає у тому, що активна промивна рідина циркулює виключно в ділянках, де формуються основні вуглецеві та лаково-смолисті відкладення – у зоні форсунок та на поверхнях клапанів. Завдяки цьому хімічний склад не взаємодіє з магістралями низького тиску та паливним баком, що мінімізує ризик відшарування великої кількості забруднень у системі.

Зосереджена дія на локальні ділянки підвищує ефективність очищення: інтенсивно видаляються відкладення саме з робочих зон форсунки; очищуються фаски та поверхні клапанів, які безпосередньо впливають на якість сумішоутворення;

ризик потрапляння значної кількості змитих частинок у циліндри є мінімальним, оскільки очищенню підлягає лише обмежена ділянка.

Внаслідок цього метод вважається значно безпечнішим у порівнянні з промиванням присадками через бак, яке діє на всю систему й може спровокувати неконтрольоване відшарування великих фрагментів забруднень.

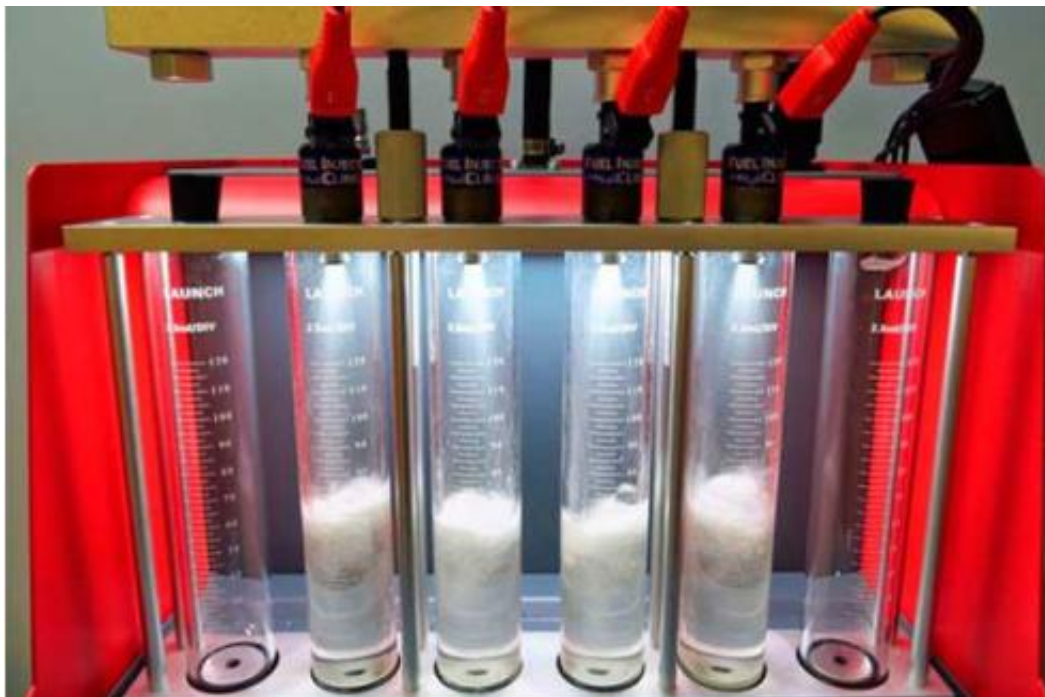


Рис. 4.4. Очистка форсунок на спец. Стенді.

Обмеження та недоліки стендового очищення без демонтажу

Попри очевидні переваги, метод має низку суттєвих недоліків, що обмежують його застосування:

Відсутність можливості точно оцінити результат.

Оскільки процедура не передбачає використання спеціалізованого діагностичного стенда, неможливо визначити, наскільки якісно очищено розпилювач форсунки та чи відновлено форму паливного факела.

Неможливість встановити ступінь забруднення окремих форсунок.

Процедура виконується комплексно, і немає можливості оцінити технічний стан кожної форсунки окремо – включаючи герметичність запірного конуса, тиск початку упорскування та рівномірність подачі.

Відсутність гарантії відновлення працездатності.

Навіть після якісного промивання форсунка може не працювати належним чином унаслідок природного зношування голки, пошкодження розпилювача, деформації сідла або кавітаційних руйнувань.

Висока ймовірність, що після очищення знадобиться заміна форсунок.

У випадках, коли елемент має критичне зношення, промивання лише підкреслює проблему й виявляє реальний стан компонентів, після чого все одно доводиться виконувати заміну.

Серед наявних методів очищення форсунок найбільш результативним та технологічно досконалим є застосування ультразвукових установок, принцип роботи яких ґрунтується на явищі акустичної кавітації. Для проведення процедури форсунки необхідно демонтувати, після чого їх занурюють у спеціальний реактор, де під дією високочастотних коливань у рідині формуються та імплodують мікроскопічні бульбашки. Імплозія створює локальні зони високого тиску, що ефективно руйнують та відшаровують нагар, смолисті й коксові відкладення з поверхонь елементів розпилювача.

Метод характеризується високою селективністю: очищення відбувається саме на робочих поверхнях форсунки, при цьому сусідні конструктивні елементи двигуна залишаються неушкодженими. Однією з ключових переваг ультразвукового очищення є те, що змиті забруднення не потрапляють у камеру згоряння, оскільки процес здійснюється поза двигуном у контрольованому середовищі.

Важливою складовою процедури є можливість проведення діагностики на спеціальному стенді. Після очищення визначають:

ступінь та характер забруднення кожної форсунки;

рівномірність і форму паливного факела;

величину циклової подачі та відповідність тиску відкриття нормативним значенням;

наявність дефектів сидла, голки або розпилювача, що не піддаються ремонту.



Рис. 4.5. Рис. 2.3 Метод ультразвукової очистки форсунок.

Якщо в паливній системі дизельного двигуна спостерігаються системні порушення – деградація роботи насоса високого тиску, забруднення магістралей, фільтрів або регуляторних елементів – застосування локального очищення лише форсунок не дає очікуваного результату. У таких ситуаціях доцільніше виконати комплексну ревізію всієї системи живлення, а форсунки з критичним зношуванням або незворотними дефектами замінити новими чи відновленими згідно з технічними вимогами.

4.3 Очищення форсунок гідродинамічним методом

Гідродинамічна кавітація належить до найбільш делікатних і безпечних методів очищення дизельних форсунок. Особливість цього способу полягає в тому, що форсунки попередньо демонтуються, що дає змогу оцінити їхню пропускну здатність як до, так і після очищення. Утворення кавітаційних зон у внутрішніх каналах форсунки забезпечує ефективне руйнування відкладень без ризику пошкодження металевих та неметалевих елементів конструкції.

Основні переваги методу. Локалізована дія в критичних зонах. Кавітаційна область формується безпосередньо у каналах розпилювача, у зоні голки та соплових отворах, що забезпечує високоточне очищення найважливіших елементів гідравлічної системи форсунки.

Сумісність із керамічними й тефлоновими компонентами.

На відміну від ультразвукового очищення, гідродинамічна кавітація практично не впливає на матеріали з підвищеною крихкістю, що розширює сферу її застосування.

Технологічна простота виконання.

Операції зводяться до монтажу форсунки на спеціалізований стенд, виконання процедури та подальшого демонтажу. Метод не потребує складної підготовки або тривалого налаштування обладнання.

Мінімальна витрата очищувальної рідини.

Для однієї форсунки достатньо приблизно 25 г робочого реагенту, що робить метод економічно доцільним.

Можливість очищення без запуску двигуна.

У низці випадків гідродинамічну кавітацію можна реалізувати без знімання форсунок, на неробочому двигуні, використовуючи тиск стисненого повітря для створення гідравлічних імпульсів.

Ефективність і обмеження. Метод показує високу результативність у випадках, коли відкладення мають м'яку або середню міцність. Однак для форсунок зі значним коксовим ураженням або ерозійними дефектами кавітаційне очищення може виявитися недостатнім, і тоді необхідна механічна обробка або заміна вузла.

Сучасні стенди для очищення та діагностики паливної апаратури широко застосовують технологію гідродинамічної кавітації для обробки електроклапанних форсунок бензинових двигунів, включаючи системи FSI та GDI. Завдяки універсальності конструкції такі установки придатні для роботи практично з будь-якими типами інжекторів.

У порівнянні з традиційними ультразвуковими установками, гідродинамічні стенди демонструють низку істотних переваг:

- скорочення часу очищення та тестування до 50 %;

- зменшення витрати очищувальної рідини у 2–3 рази;

- повне усунення ризику деформації голки або сідла форсунки, що може виникати під час інтенсивного ультразвукового впливу.

Принцип дії та особливості реалізації. Ключовою особливістю гідродинамічної технології є формування кавітаційної зони безпосередньо всередині каналу форсунки. Унаслідок цього енергія схлопування кавітаційних порожнин концентрується саме в тих ділянках, де утворюються відкладення, а не розсіюється по об'єму очищувальної ванни. Така локалізація забезпечує значно вищу ефективність руйнування забруднень.

Оскільки процес кавітації відбувається лише у внутрішніх каналах, зовнішня поверхня форсунки залишається недоторканою. Це особливо важливо для моделей із керамічними компонентами або тефлоновими покриттями, які можуть бути чутливими до ультразвукового впливу.

Гнучкість застосування технології. Гідродинамічне очищення можна виконувати у двох форматах:

- Зі зняттям форсунок – оптимальний варіант, що дозволяє провести:

попереднє тестування (пропускна здатність, форма факела);
очищення форсунки в індивідуальному режимі;
підсумкове тестування без перенесення у додаткові ванни чи модулі.

Без демонтажу, без запуску двигуна – метод зручний для двигунів складної конструкції, у яких доступ до форсунок обмежений. У такому випадку стенд формує кавітаційні імпульси через паливну магістраль, забезпечуючи очищення без втручання у механічну частину двигуна.

Крім того, деякі стенди підтримують режим промивання форсунок на працюючому двигуні, що дозволяє оцінити роботу інжекторів у реальних умовах навантаження.

Переваги стендів «повного циклу». Використання стендів, у яких тестування й очищення здійснюються в одному модулі, дає змогу:

- уникнути повторного забруднення форсунок під час перенесення;
- зменшити витрату промивних рідин;
- скоротити загальний час процедури;
- отримати високу точність порівняльної діагностики «до» та «після» очищення.

4.4 Розроблення схемних рішень системи очищення форсунок методом гідродинамічної кавітації

Проектування системи очищення форсунок із використанням гідродинамічної кавітації потребує визначення оптимальної структури обладнання, що забезпечує формування кавітаційних режимів, контроль параметрів очищення та безпечну експлуатацію системи. Розробка схемних рішень передбачає вибір конфігурації гідравлічних елементів, виконавчих механізмів і датчиків, які забезпечуватимуть стабільність процесу та високу ефективність видалення відкладень з робочих поверхонь форсунок.

Система очищення форсунок, призначена для відновлення працездатності розпилювачів дизельного палива, складається з низки функціональних вузлів і агрегатів, що працюють у комплексі для створення контрольованих кавітаційних

потоків та циркуляції очищувальної рідини. До її основних структурних компонентів належать (рис. 4.6):

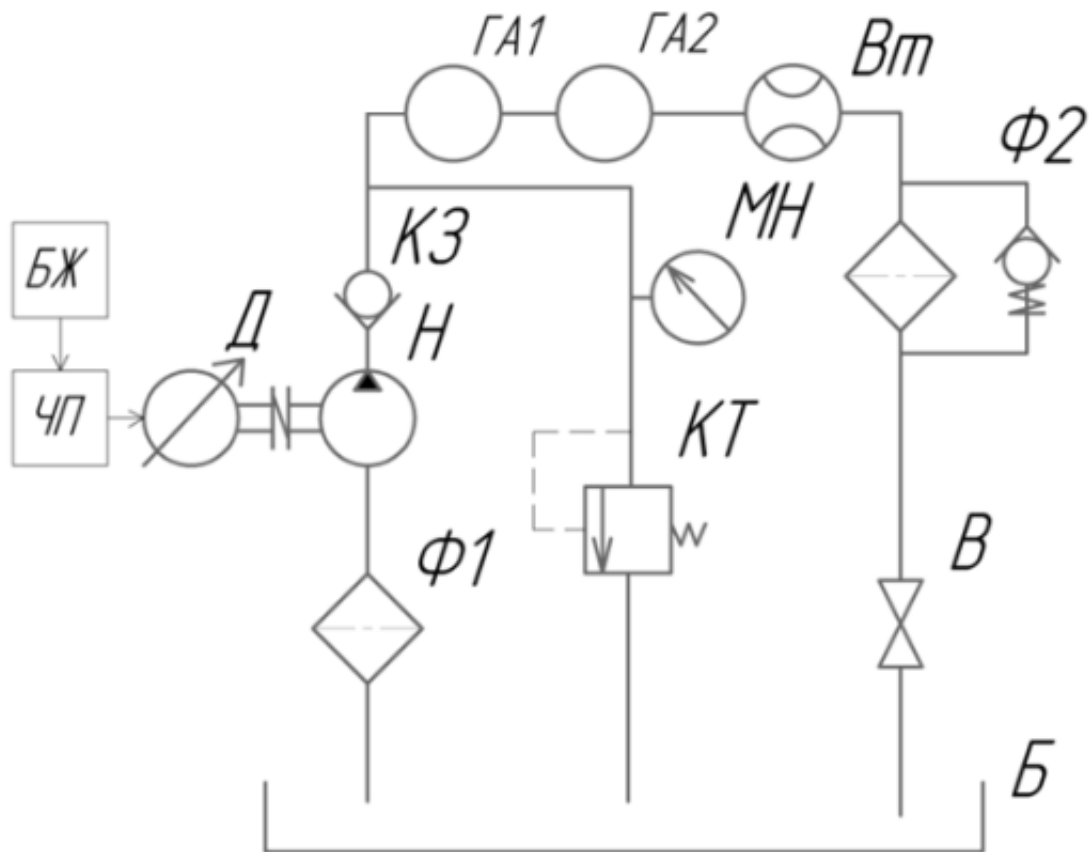


Рис. 4.6. Система очистки форсунок для розпилення дизельного палива.

Принцип роботи системи очищення форсунок методом гідродинамічної кавітації. Функціонування системи очищення розпочинається з активації процесу оператором через панель керування шляхом натискання кнопки «Пуск». Після цього контролер формує командний сигнал, який передається на частотний перетворювач. Останній забезпечує плавний запуск асинхронного електродвигуна, вал якого жорстко з'єднаний з приводом насоса.

З моменту виходу насоса на робочий режим у системі створюється надлишковий тиск, необхідний для циркуляції очищувальної рідини. На початковому етапі потік проходить через фільтрувальний елемент Ф1, який утримує механічні домішки та запобігає їхньому потраплянню до форсунок. Очищена рідина надходить до гідравлічного апарата ГП1 та вимірювального блока з манометром М, що дає змогу контролювати тиск у реальному часі.

Гідравлічний апарат ГП1 виконує функцію генератора кавітаційних коливань. При проходженні рідини через його конструктивні елементи формується зона із змінним тиском, у якій виникають та миттєво схлопуються

кавітаційні бульбашки. Далі сформовані кавітаційні структури спрямовуються до гідравлічного модуля ГП2, де вони потрапляють безпосередньо у робочі камери форсунок.

У процесі проходження крізь соплові канали форсунки кавітаційні бульбашки імплodують, створюючи локальні мікроудари по внутрішніх поверхнях. Саме ця дія забезпечує руйнування смолистих, лакових і нагарних відкладень на розпилювачі, у голковому вузлі та в каналах подачі палива. Таким чином досягається глибоке очищення форсунки зсередини без механічного впливу на її елементи.

Після впливу кавітації очищувальна рідина надходить до механічного витратоміра, що забезпечує візуальний контроль витрати та дозволяє оцінити рівномірність пропускної здатності форсунок. Процес очищення вважається завершеним у тому випадку, коли:

витрата рідини через кожен форсунку стабілізується та вирівнюється;

форма розпилення відповідає встановленим критеріям і демонструє відновлену геометрію паливного факела.

На завершальному етапі потік проходить через фільтр Ф2, який затримує частинки, відокремлені під час очищення, та запобігає їх потраплянню назад у бак із робочим реагентом.

Формування ефективної системи очищення форсунок дизельних двигунів передбачає добір апаратури, здатної забезпечити стабільні гідродинамічні режими, необхідні для інтенсивного утворення кавітаційних зон і надійної циркуляції очищувального реагенту. До складу такої системи входять основні агрегати, серед яких ключову роль відіграє насосне обладнання.

Одним із оптимальних рішень для систем гідродинамічного очищення є дозувальний насос Seko Tekna Evo APG 800, технічні характеристики якого відповідають вимогам до створення необхідного гідравлічного тиску та витрати рідини.

Основні параметри насоса:

Номінальна подача: 15 л/год.

Це забезпечує достатній об'ємний потік очищувальної рідини для стабільного формування кавітаційних структур та рівномірного промивання форсунок.

Максимальний робочий тиск: 20 бар.

Такий тиск дозволяє підтримувати інтенсивний гідродинамічний режим у каналах форсунки та гарантує ефективність процесу очищення навіть для форсунок зі складною геометрією.

Споживана потужність: 0,024 кВт.

Низький рівень енергоспоживання робить насос економічним у експлуатації та дозволяє інтегрувати його в системи з невеликим енергетичним бюджетом.

Завдяки поєднанню компактності, високої надійності та точності дозування насос Seko Tekna Evo APG 800 є придатним для використання в лабораторних та сервісних стендах, що працюють за принципом гідродинамічної кавітації.

Комплектування системи очищення форсунок: добір основних елементів.

Для забезпечення стабільної роботи системи гідродинамічного очищення форсунок необхідним є ретельний підбір обладнання, яке визначає ефективність кавітаційного процесу, безпеку експлуатації та точність контролю параметрів. До складу системи входять наступні агрегати та прилади.

Електродвигун ПЛ-072 УЗ ІМ1001 застосовується як основний приводний елемент насоса та характеризується такими параметрами:

частота обертання – 3000 об/хв, що забезпечує створення стабільного потоку рідини у гідравлічному контурі;

номінальна потужність – 0,2 кВт, що відповідає енергетичним потребам системи;

робоча напруга – 220 В, що дозволяє використовувати двигун у стандартних електромережах.

Для стабілізації напруги, живлення контролера та допоміжних модулів застосовується Kenweiірс KW-1600WPF:

потужність – 1,6 кВт, що дає достатній резерв для живлення виконавчих і вимірювальних елементів;

коефіцієнт корисної дії – 90 %, що забезпечує економічність і знижені теплові втрати.

Контрольно-вимірювальні прилади. Манометри 63R16.MGE:

максимальний робочий тиск – 16 бар, що відповідає параметрам кавітаційного генератора та насосної частини системи.

Манометри дозволяють здійснювати оперативний контроль тиску в різних точках гідравлічної схеми та є ключовим елементом забезпечення безпечної експлуатації.

Для підтримання чистоти робочої рідини застосовується кілька ступенів фільтрації:

Фільтр MP Filtri MPF0301:

пропускна здатність – 40 л/хв;

ступінь фільтрації – 25 мкм, що забезпечує очищення рідини від дрібнодисперсних частинок, небезпечних для кавітаційного генератора та форсунок.

Фільтр Resideo (Honeywell) FF06-3/4AA:

пропускна здатність – 46 л/хв;

ступінь фільтрації – 100 мкм, призначений для попереднього очищення рідини від грубих механічних домішок.

Такий багатоступеневий підхід підвищує ресурс системи та забезпечує коректність роботи витратоміра і гідроапаратів.

Контроль витрати

Витратомір FI750-30 ABOT:

діапазон вимірювань – 0,2–30 л/хв.

Прилад дає змогу контролювати рівномірність подачі очищувальної рідини крізь кожну форсунку, що є індикатором відновлення їхньої пропускної здатності.

Вентиль 15×1/2 ВР використовується для регулювання або повного перекриття потоку рідини у відповідних ділянках системи. Надійність і простота конструкції роблять його оптимальним рішенням для локального управління гідравлічними потоками.

4.5 Розрахунок економічної доцільності застосування комплексної очисної присадки

Потрібно оцінити, чи є економічно доцільним регулярне використання комплексної присадки для очищення паливної системи (бак – магістралі – форсунки) за умови її постійного додавання до пального.

Розрахунок виконуємо за такими вихідними даними (умовний приклад для легкового дизельного автомобіля):

Річний пробіг автомобіля:

$$L_p = 25\,000 \text{ км}$$

Середня витрата палива:

$$q = 7,0 \text{ л/100 км}$$

Середня ціна дизельного палива:

$$p_{\pi} = 60 \text{ грн/л}$$

Дозування присадки: 1 флакон $V_{\phi} = 0,25$ л на 60 л палива

питомий витрат присадки:

$$k = \frac{0,25}{60} \approx 0,0042 \text{ л присадки/л пального}$$

Вартість одного флакону присадки:

$$C_{\phi} = 250 \text{ грн}$$

Очікуване зниження витрати палива завдяки очищенню системи: відносна економія палива $\varepsilon = 3\% = 0,03$ (типове значення, яке заявляють виробники).

Розрахунок річної витрати палива.

Загальний річний об'єм споживаного палива:

$$Q_{\pi} = \frac{L_p \cdot q}{100}$$

Підставляємо числові значення:

$$Q_{\pi} = \frac{25\,000 \cdot 7,0}{100} = 1\,750 \text{ л/рік}$$

Розрахунок витрат на паливо без застосування присадки

Річні витрати на паливо без присадки:

$$C_{\Pi} = Q_{\Pi} \cdot p_{\Pi} \cdot C_{\Pi} = 1\,750 \cdot 60 = 105\,000 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок річної витрати присадки.

Об'єм присадки, необхідний на рік:

$$V_{\text{пр}} = Q_{\Pi} \cdot k \cdot V_{\text{пр}} = 1\,750 \cdot 0,0042 \approx 7,29 \text{ л/рік}$$

Кількість флаконів:

$$n_{\text{ф}} = \frac{V_{\text{пр}}}{V_{\text{ф}}} = \frac{7,29}{0,25} \approx 29,2 \approx 30 \text{ флаконів/рік}$$

Річні витрати на присадку:

$$C_{\text{пр}} = n_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} \cdot C_{\text{пр}} = 30 \cdot 250 = 7\,500 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок економії палива від застосування присадки.

Річний об'єм палива, що зекономлений за рахунок зменшення витрати:

$$Q_{\text{ек}} = Q_{\Pi} \cdot \varepsilon \cdot Q_{\text{ек}} = 1\,750 \cdot 0,03 = 52,5 \text{ л/рік}$$

Вартість зекономленого палива:

$$C_{\text{ек}} = Q_{\text{ек}} \cdot p_{\Pi} \cdot C_{\text{ек}} = 52,5 \cdot 60 = 3\,150 \text{ грн/рік}$$

Порівняння витрат і вигоди.

Чистий економічний ефект від застосування присадки:

$$\Delta C = C_{\text{ек}} - C_{\text{пр}} \cdot \Delta C = 3\,150 - 7\,500 = -4\,350 \text{ грн/рік}$$

Отримали від'ємний результат, тобто за прийнятих умовних вихідних даних застосування присадки економічно не вигідне, попри потенційне зниження витрати палива.

Визначення граничної (критичної) економії палива.

Знайдемо, при якому значенні відносної економії палива $\varepsilon_{\text{кр}}$ витрати на присадку будуть рівні економії від зменшення витрати пального (точка беззбитковості):

$$C_{\text{ек}} = C_{\text{пр}} \cdot Q_{\Pi} \cdot \varepsilon_{\text{кр}} \cdot p_{\Pi} = C_{\text{пр}}$$

Звідси:

$$\varepsilon_{\text{кр}} = \frac{C_{\text{пр}}}{Q_{\Pi} \cdot p_{\Pi}} = \frac{C_{\text{пр}}}{C_{\Pi}}$$

Підставимо числові значення:

$$\varepsilon_{\text{кр}} = \frac{7\,500}{105\,000} \approx 0,0714 = 7,14\%$$

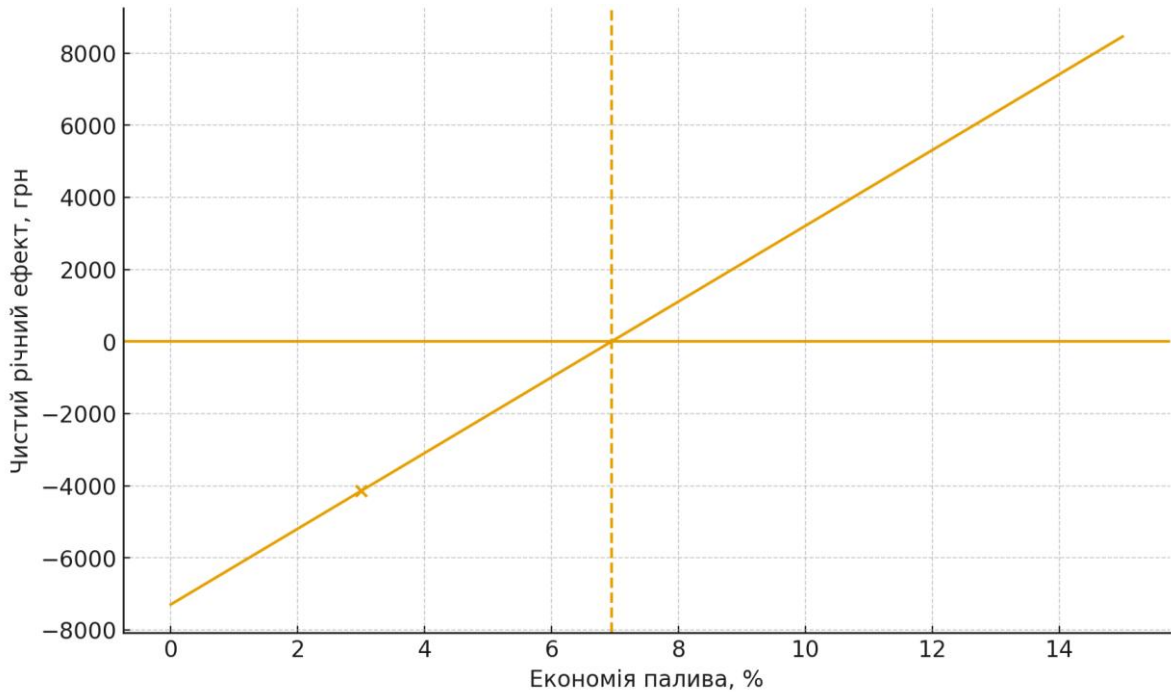


Рис. 4.7. Залежність економічного ефекту від відносної економії палива:

По осі X – економія палива, % (від 0 до 15). По осі Y – чистий річний економічний ефект, грн. Пряма лінія показує, як змінюється економічний ефект при зростанні економії палива. Горизонтальна лінія $Y=0$ – це межа беззбитковості. Пунктирна вертикальна лінія показує критичну економію $\approx 7,1$ %, за якої присадка починає окупуватися. Точка на 3 % показує, що при такій економії маємо від’ємний ефект (близько -4350 грн/рік).

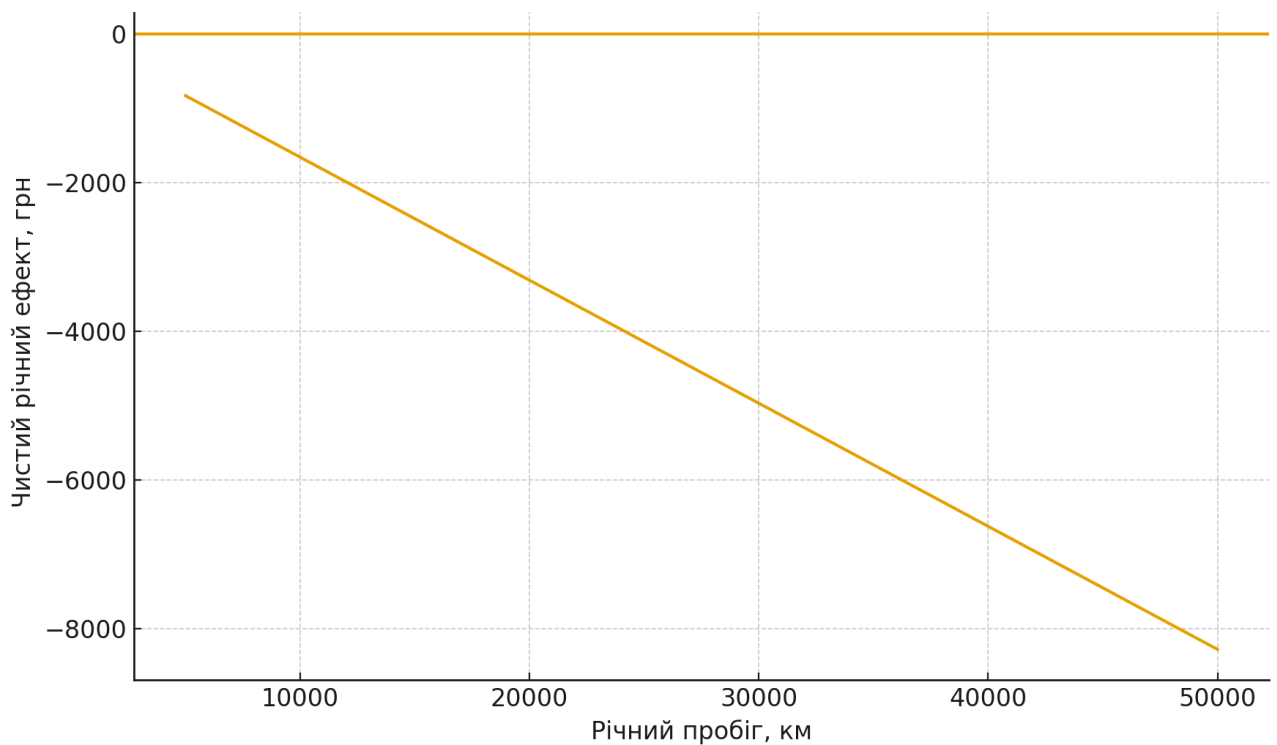


Рис. 4.8. Залежність економічного ефекту від річного пробігу (економія палива 3 %).

По осі X – річний пробіг, км (5 000–50 000). По осі Y – чистий річний економічний ефект, грн. Лінія показує, що при фіксованій економії 3 % чистий ефект залишається негативним в усьому діапазоні пробігів (витрати на присадку ростуть пропорційно витраті палива).

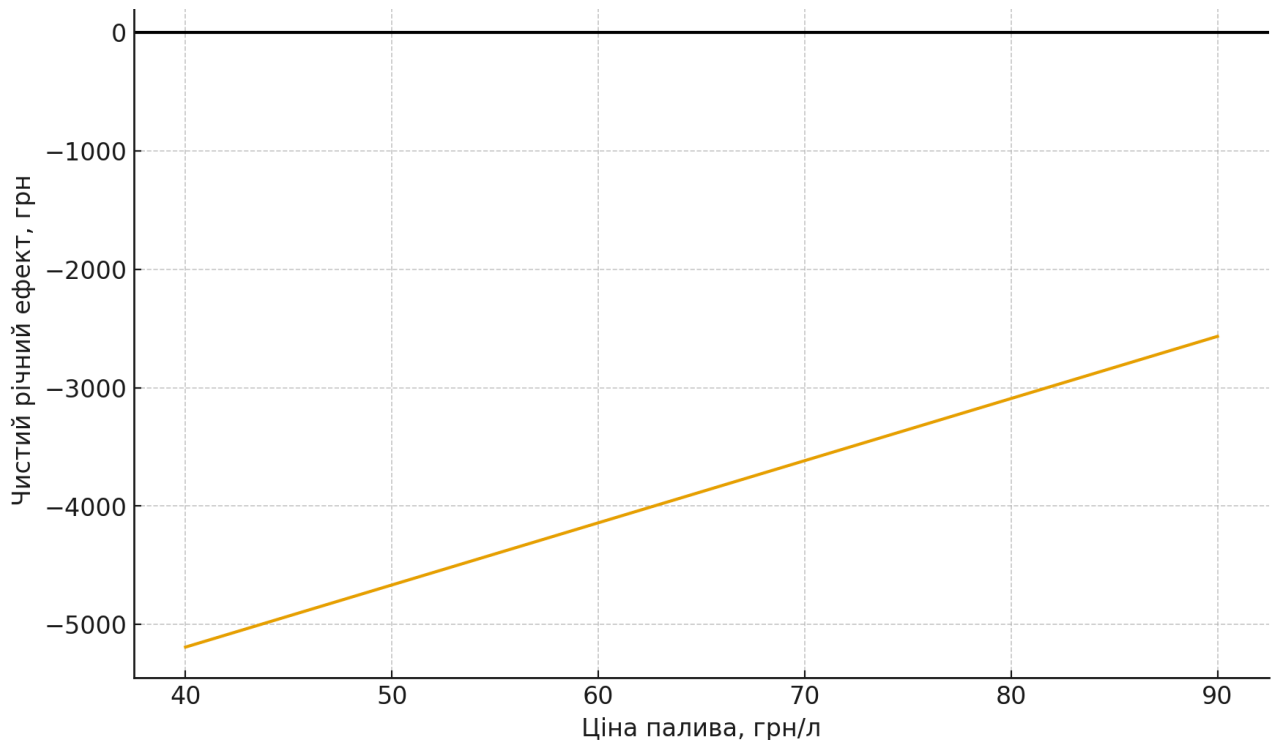


Рис. 4.9. Графік чиста економія vs ціна палива.

Лінія має додатний нахил - що дорожче паливо, то вигіднішою потенційно стає економія палива.

Проте навіть при ціні 90 грн/л економія 3% не перекриває річних витрат на присадку - чистий ефект лишається негативним (≈ -2650 грн/рік).

Щоб система ставала економічно доцільною лише за рахунок інфляції, ціна палива мала би зрости до ~ 170 грн/л (для 3% економії) – це впливає з аналітичної точки перетину.

Отже, присадка буде економічно виправданою лише в тому випадку, якщо завдяки регулярному її використанню вдається знизити витрату палива щонайменше на 7,1 %. Для реальних умов експлуатації це досить високий показник, який на практиці досягається рідко.

На підставі наведеного прикладу можна зробити такі висновки:

При річному пробігу 25 000 км та середній витраті 7 л/100 км автомобіль споживає близько 1 750 л дизельного палива на рік.

Регулярне використання комплексної присадки з указаною нормою дозування потребує близько 7,3 л препарату на рік (приблизно 30 флаконів), що еквівалентно витратам 7 500 грн/рік.

За умови зниження витрати пального на 3 % економія коштів на паливі становить близько 3 150 грн/рік, що не перекриває витрат на присадку.

Економічна доцільність застосування такої присадки настає лише при зниженні витрати палива понад 7,1 %, що для більшості експлуатаційних режимів є завищеним очікуванням.

Отже, рішення щодо використання комплексних присадок для очищення паливної системи має обґрунтовуватися не лише маркетинговими заявами виробників, а й інженерно-економічним аналізом з урахуванням реальних умов експлуатації автомобіля.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Оглядові канали та естакади

Планування та розміщення оглядових каналів і естакад на виробничій території або в закритих приміщеннях повинно забезпечувати безпечний та безперешкодний заїзд і виїзд транспортних засобів, а також створювати умови для виконання регламентних та ремонтних робіт. Геометричні параметри конструкцій визначаються типорозмірами обслуговуваних автомобілів, вимогами до ергономіки робочої зони та специфікою технологічного обладнання, що використовується.

Габаритні параметри та вимоги до геометрії.

Довжина робочої ділянки оглядової каналу або естакади повинна бути не меншою за повну габаритну довжину транспортного засобу. Для тупикових каналів важливо забезпечити можливість повного встановлення автомобіля без перекриття входних сходів та аварійного виходу.

Ширина каналу та естакади встановлюється з урахуванням колії автомобіля і передбачає наявність внутрішніх або зовнішніх реборд, що запобігають зсуву коліс.

Глибина оглядових каналів і висота естакад повинні гарантувати вільний доступ до компонентів ходової частини, трансмісії та елементів силового агрегату, що розташовані знизу, і відповідати таким орієнтовним значенням: для легкових автомобілів та автобусів малого класу – 1,3–1,5 м; для вантажних автомобілів та автобусів – 1,1–1,2 м; для великовантажних самоскидів – 0,5–0,7 м.

Організація підземної інфраструктури. Під час паралельного розміщення тупикових оглядових каналів передбачається їх об'єднання траншеями. Ширина траншеї приймається: 1,2 м – без розміщення технологічного обладнання, 2,0–2,2 м – якщо в траншеї встановлюються агрегати та апаратура.

Проїзні оглядові канали об'єднуються між собою тунелями, які забезпечують можливість безпечного переміщення персоналу. У разі відсутності

стаціонарних переходів допускається використання пересувних сходів із робочою платформою, що може виконувати функцію перехідного містка.

Мінімальні габарити тунелю: висота – не менше 2 м, ширина – не менше 1 м.

Вимоги до евакуаційних виходів та сходів. Оглядові канали повинні бути обладнані сходами шириною не менше 0,7 м, кількість яких визначається типом каналу:

для тупикових, об'єднаних траншеями – одна на три канали;

для проїзних, з'єднаних тунелями – одна на чотири канали;

для потокових ліній – не менше двох на пост, розташованих з протилежних боків (максимальна відстань до виходу – 25 м);

для окремих тупикових каналів без об'єднання – по одній на кожен канал.

Усі сходи, виходи з тунелів і траншей, а також площадки естакад мають бути обладнані металевими огороженнями висотою не менше 0,9 м.

Входи та виходи до каналів і тунелів заборонено розміщувати під транспортними засобами або на їхніх траєкторіях руху. На тупикових каналах вихід облаштовується з боку, протилежного напрямку заїзду автомобіля. За наявності лише одного виходу передбачають додаткові скоби на стінці каналу, які виконують функцію аварійних сходів.

Вимоги до естакад. Для забезпечення безпечної посадки та виходу водія з кабіни естакади комплектуються бічними площадками шириною не менше ширини дверного отвору плюс 0,3 м, але не менш як 1,2 м.

Огороження встановлюються: на тупикових естакадах – з трьох боків, на прямоточних – з двох боків.

Підйом та спуск здійснюється за стаціонарними сходами.

Експлуатаційні вимоги. Оглядові канали, тунелі та естакади повинні бути захищені від проникнення ґрунтових і поверхневих вод, утримуватися в чистому стані, вільними від сторонніх предметів і деталей, облаштовані дерев'яними міцними настилами (трапами) на підлозі для запобігання ковзанню та забезпечення безпечної роботи персоналу.

Оглядові канали та естакади повинні бути оснащені поздовжніми напрямними ребордами по всій їхній довжині, що забезпечує запобігання

випадковому сходженню коліс та падінню транспортного засобу під час маневрування або його переміщення в зоні обслуговування. Висоту реборд установлюють відповідно до категорії автомобілів:

для транспортних засобів I категорії – не менше 0,10 м;

для автомобілів II та III категорій – не менше 0,15 м.

На ділянці в'їзду до оглядової канави встановлюється розсікач (обмежувальний поріг) висотою 0,15–0,20 м, який слугує додатковим елементом безпеки та спрямовує колеса автомобіля під час заїзду.

У зонах переходу через оглядові канави або технологічні траншеї необхідно передбачати знімні перехідні містки шириною не менше 0,8 м. Кількість таких містків визначається залежно від пропускної спроможності канави: їх слід встановлювати на один менше, ніж загальна кількість можливих місць розташування автомобілів над канавою.

5.2 Планування заходів із протидії небезпечним хімічним речовинам

Надзвичайно швидке формування та розвиток уражальних чинників під час аварій з викидом небезпечних хімічних речовин зумовлюють необхідність своєчасного та оперативного впровадження комплексу захисних заходів. Вони мають бути спрямовані на збереження життя і здоров'я персоналу хімічно небезпечного об'єкта, а також населення, що проживає поблизу.

Організація системи захисту від НХР повинна здійснюватися завчасно, а реагування на аварійні ситуації має проводитися у максимально стислі терміни, що мінімізує масштаби можливих уражень.

Захист від небезпечних хімічних речовин являє собою комплекс взаємопов'язаних організаційних, технічних і оперативних дій, спрямованих на зниження рівня ризику для персоналу та населення, а також на забезпечення їх стійкості до впливу хімічних чинників.

До складу цього комплексу входять такі основні заходи:

Інженерно-технічні рішення, що регламентують правила безпечного зберігання, транспортування й експлуатації НХР.

Формування та підготовка аварійно-рятувальних сил, обладнання та матеріальних ресурсів для оперативної ліквідації можливих хімічних інцидентів.

Навчання персоналу й населення, що проживає в зоні можливого впливу, правилам поведінки та алгоритмам дій під час хімічних аварій.

Забезпечення засобами індивідуального і колективного захисту, їх зберігання та підтримання у працездатному стані.

Щоденний хімічний контроль, що дає можливість оперативно виявляти відхилення в технологічних процесах.

Прогнозування можливих зон хімічного забруднення на основі характеристик НХР та умов поширення викиду.

Оповіщення персоналу та населення про загрозу ураження хімічними речовинами.

Хімічна розвідка території аварії, спрямована на уточнення масштабів і рівнів забруднення.

Тимчасова евакуація людей із небезпечної або потенційно небезпечної зони.

Пошук постраждалих та надання їм першочергової допомоги.

Локалізація та усунення наслідків аварії, включаючи нейтралізацію, збирання та утилізацію НХР.

Організація системи захисту від НХР покладається в першу чергу на адміністрацію та служби хімічно небезпечного підприємства. Усі заходи мають бути чітко структуровані та відображені у Плані дій щодо запобігання та ліквідації надзвичайних ситуацій, який розробляється завчасно. Такий план складається у текстовому вигляді з набором таблиць, карт, схем та інших інформаційних додатків.

План захисту персоналу від дії НХР обов'язково включає два ключові блоки:

Організаційні заходи – порядок дій, розподіл відповідальності, система оповіщення, підготовка персоналу.

Інженерно-технічні заходи – конструктивні рішення, технічні засоби, системи контролю та механізми локалізації аварій.

Організаційні заходи визначаються основні аспекти організації захисту персоналу та населення у разі аварій, пов'язаних із небезпечними хімічними речовинами. Зокрема, до його складу входять такі позиції:

Аналіз хімічно небезпечного об'єкта: характеристика підприємства та його структурних підрозділів, перелік НХР, що зберігаються або використовуються на виробництві, а також особливості технологічних процесів, які можуть спричинити аварійну ситуацію.

Оцінювання ймовірної обстановки при аварії: прогнозування розвитку подій у разі викиду НХР, визначення зон можливого ураження, кількості тих, хто може потрапити під вплив небезпечних факторів, та оцінка потенційних збитків.

Організація хімічного контролю та моніторингу: порядок проведення регулярних вимірювань концентрацій НХР у робочій зоні, регламент дій під час аварійної ситуації, підтримання підрозділів хімічної розвідки та контролю в режимі постійної готовності.

Система оповіщення персоналу та населення: структура і правила роботи каналів передавання сигналів безпеки, порядок доведення інформації до мешканців прилеглих територій.

Організація укриття працівників: правила застосування захисних споруд цивільного захисту, їх обслуговування, технічна готовність та порядок укриття людей у разі аварії. Організація евакуаційних заходів: маршрути, порядок виведення персоналу й населення, відповідальні особи та забезпечення транспортом. Підготовка аварійних формувань та ремонтних бригад: оснащення, алгоритми дій, порядок залучення сил для ліквідації наслідків аварії та відновлення технологічних процесів. Система управління силами і засобами під час аварії: розподіл повноважень між підрозділами, взаємодія з аварійно-рятувальними службами та правила приймання додаткових формувань, що прибувають для надання допомоги.

Порядок забезпечення засобами індивідуального захисту: накопичення, зберігання, облік та своєчасна видача протигазів, респіраторів, захисного одягу та іншого спорядження. Логістичне та матеріально-технічне забезпечення: організація транспорту, постачання ресурсів та необхідного обладнання для здійснення аварійно-рятувальних робіт.

Інженерно-технічні заходи визначаються конкретні технічні рішення, що спрямовані на мінімізацію ризику аварій та обмеження поширення НХР у разі їх витоку: Установка обладнання для попередження аварійних викидів: використання запобіжних клапанів, блоків надлишкового тиску, терморегуляторів та інших механізмів, здатних автоматично зменшити ризик викиду НХР. Підсилення та захист технологічних конструкцій: зміцнення ємностей, трубопроводів, обладнання та огорожувальних конструкцій з метою зниження їх вразливості до механічних пошкоджень, впливу вибухової хвилі або пожежі. Будівництво захисної інфраструктури: облаштування резервних ємностей для перехоплення НХР, створення аварійних пасток, лотків і напрямних каналів для відведення небезпечних рідин.

Розосередження запасів НХР: уникнення концентрації великої кількості хімічних речовин в одному місці, облаштування заглиблених чи напівзаглиблених сховищ для підвищення їхньої безпеки.

Оснащення промислових зон автоматизованими системами контролю: встановлення стаціонарних датчиків для виявлення витоків, систем аварійної сигналізації, метеостанцій для прогнозування напрямків поширення хмари НХР.

У Плані також мають бути детально описані дії щодо ліквідації наслідків аварії на кожній технологічній ділянці, де використовуються або зберігаються НХР. Для цього: визначаються конкретні відповідальні особи; формуються завдання для залучених підрозділів; розраховується час, необхідний для виконання аварійних робіт; розробляються технологічні карти дій.

План регулярно актуалізують відповідно до змін у технологічному процесі або складі НХР. Витяги з Плану повинні бути доступні в диспетчерських пунктах та в підрозділах підприємства.

На робочих місцях персоналу, що контактує з НХР, мають зберігатися аварійні картки з інформацією щодо: фізико-хімічних властивостей речовин; заходів безпеки; засобів індивідуального захисту; правил першої допомоги; методів нейтралізації чи локалізації НХР.

Органи управління цивільного захисту регіонального рівня також розробляють свої плани щодо захисту населення, враховуючи наявні хімічно небезпечні об'єкти.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра проведено комплексне дослідження процесів технічного обслуговування, діагностування та відновлення працездатності традиційної паливної апаратури дизельних двигунів із поглибленим аналізом функціонування форсунок та ефективності сучасних методів їх очищення. Робота охоплює теоретичні засади роботи паливних систем, інструментальні та функціональні особливості діагностичного обладнання, технологічні процеси відновлення вузлів, а також науково обґрунтовану оцінку альтернативних способів регенерації розпилювачів.

У рамках теоретичного аналізу узагальнено конструктивні особливості дизельних систем упорскування з акцентом на вплив параметрів розпилення на економічні та екологічні характеристики двигуна. Показано, що точність дозування, момент упорскування та геометрія факела визначають ефективність процесу згоряння, а отже й рівень токсичності відпрацьованих газів. Обґрунтовано роль форсунок як критичного елемента паливної системи, чутливого до механічних забруднень, коксування та зношення прецизійних поверхонь.

У технологічній частині розроблено детальний регламент обслуговування системи живлення дизельного двигуна, до якого включено алгоритм діагностування форсунок, контроль герметичності, стендову перевірку параметрів упорскування та технологію відновлення посадкових поверхонь. Запропонований процес охоплює використання спеціалізованого обладнання (пор-тестер, стенд CR, ультразвукові ванни, механотестери), що забезпечує достовірність оцінки технічного стану форсунок та дає змогу з високою точністю визначати параметри тиску відкриття, факела розпилення та герметичності.

У конструкторському розділі представлено аналіз існуючих стендів для діагностики ПНВТ, а також удосконалення системи визначення моменту початку впорскування шляхом заміни контактних датчиків на п'єзоелектричні. Показано, що запропонована модернізація підвищує точність, відтворюваність результатів та знижує вплив механічних зазорів і вібрацій. Проведений розрахунок динаміки

тиску в камері впорскування підтвердив працездатність та відповідність п'єзодатчика вимогам до вимірювань високої чутливості.

У науково-дослідному розділі виконано порівняльний аналіз альтернативних методів очищення форсунок — ультразвукового, хімічного та гідродинамічного. Доведено, що ультразвукове очищення є найбільш ефективним у видаленні полімеризованих відкладень та лакових забруднень без пошкодження прецизійних елементів, тоді як хімічне промивання доцільне для профілактики на працюючому двигуні. Гідродинамічні методи показали найвищу продуктивність у випадках сильного коксування, однак потребують обмеженого застосування через ризик ерозійного впливу.

Проведений розрахунок трудомісткості та економічної оцінки технологічного процесу дозволив визначити загальні витрати часу та вартості виконання обслуговування системи живлення. Отримані значення підтверджують раціональність запропонованої структури робіт та можливість її впровадження у виробничі умови сервісних підприємств.

У розділі з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях систематизовано вимоги до організації робіт із небезпечними хімічними речовинами, а також заходи щодо мінімізації ризиків для персоналу під час роботи з паливною апаратурою та високим тиском.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. О.Л. Ляшук, М.Г. Левкович, Д.В. Міронов, В.О. Тесля. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» галузі знань 27 «Транспорт». – Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2023. – 60 с.
2. Підручник з будови автомобіля. Видання третє. Виправлене й доповнене – Моноліт 2021 – 288 с.
3. Кисликов В.Ф., В.В. Лущик Будова і експлуатація автомобілів. Підручник - Либідь м.Київ, 2018 – 400с.
4. Кузьмінський Р.Д., Шарибура А.О Технічний сервіс. Ремонт електрообладнання тракторів і автомобілів Львів 2017 – 376 с.
5. Сукач М.К. Технічний сервіс машин. Навч. пос.. Гриф МОНМСУ - Ліра-К, 2017 – 288 с.
6. Форнальчик Є. Ю., Качмар Р. Я. Основи технічного сервісу транспортних засобів - Львівська політехніка 2017, - 324 с.
7. Шапко В.Ф., Шапко С.В. Основи теорії та динаміки автомобільних двигунів : підручник. – Харків : Точка, 2016. – 232 с.
8. Шапко В.Ф. Автомобільні двигуни. Основи теорії та характеристики поршневих двигунів внутрішнього згоряння: Навчальний посібник. - Кременчук: КНУ, 2011. - 194 с.
9. Коробочка О.М. Основи розрахунків, проектування і експлуатації технологічного обладнання для автомобільного транспорту: Навч. посібник / Коробочка О.М., Скорняков Е.С., Сасов О.О. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007 – 252 с.
10. Кукурудзяк, Ю. Ю. Технічна експлуатація автомобілів. Організація технологічних процесів ТО і ПР навчальний посібник / Ю. Ю. Кукурудзяк, В. В. Біліченко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 198 с.
11. Андрусенко С. І. Технологічне проектування автотransпортних підприємств: навч. посіб. / Андрусенко С. І., Білецький В. О., Бортницький П. І.; за ред. проф. С. І. Андрусенка. – К. : Каравела, 2009. – 368 с.
12. Канарчук В. Є. Основи технічного обслуговування і ремонту

- автомобілів. Книга 1 :теоретичні основи. Технологія: підручник / В. Є. Канарчук, О. А. Лудченко, А. Д. Чигиринець – К. : "Вища школа", 1994. – 342 с.
13. Канарчук В. Є. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Книга 2: організація, планування і управління : підручник / В. Є. Канарчук, О. А. Лудченко, А. Д. Чигиринець – К.: "Вища школа", 1994. – 383 с.
14. Автомобілі. Теорія : навч. посіб. / В.П. Сахно, В.І. Сирота, В.М. Поляков, В. Г. Головань, О.В. Лисий; Військ. акад. - Одеса: Військ. акад., 2017. - 412 с.
15. Кисликов В.Ф., Лущик В.В. Будова й експлуатація автомобілів: Підручник. – 8-те вид. - К.: Либідь, 2018. – 400 с.
16. Кисликов В.Ф. Лущик В.В. Будова й експлуатація автомобілів. – К.: Либідь, 2016. – 400 с. 5. Ю.А.
17. О.П. Строков, М.Г. Макаренко, В.Ф.Фролов Технічне обслуговування та ремонт вантажних і легкових автомобілів, автобусів. Підручник: У 2 кн. К.: Грамота, 2005.
18. Практикум з охорони праці. Навчальний посібник / За ред.. В.Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.
19. Стручок В.С. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»: навчальний посібник / В.С. Стручок.– Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. – 156 с.
20. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108.
21. Паливода Ю. Є., Ткаченко І. Г., Капаціла Ю. Б., Гевко Ів. Б. Технологія оброблення корпусних деталей : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 156 с.
22. Дикань С.А., Зима О.Є. Безпека в галузі та надзвичайних ситуаціях. Університетський курс [Текст]: підручник для студ. вищ. навч. закл. С.А. Дикань, О.Є. Зима. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. – 273 с.: табл., іл.