

НУБІП України

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

01.11 – КМР. 385 “С” 2021.03.01. 008 ПЗ

КУЗЬМІН АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ

2021 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

УДК 631.3:621.43

ПОГОДЖЕНО

Декан механіко-технологічного факультету

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені М.П. Момотенка
(назва кафедри)

В. Братішко

(підпис)

Роговський І.Л.

(ПІБ)

“ ” 2021 р.

“ ” 2021 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Удосконалення ультразвукової очистки електромагнітних форсунок двигунів автомобілів в АПК

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітня програма: «Автомобільний транспорт»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, професор

(підпис)

В.Д. Войтюк

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

Доктор технічних наук, с.н.с.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Роговський І.Л.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Кузьмін Андрій Андрійович

(ПІБ студента)

КНІВ – 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технічного сервісу та
інженерного менеджменту імені М.П. Момотенка
докт. тех. наук, с.н.с. Роговський І.Л.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
2021 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Кузьміна Андрія Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітня програма: «Автомобільний транспорт»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Удосконалення ультразвукової очистки
електромагнітних форсунок двигунів автомобілів в АПК

затверджена наказом ректора НУБіП України від "01" березня 2021 р. №385

Термін подання завершеної роботи на кафедру 10.11.2021 року
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи технічні засоби ультразвукової
очистки електромагнітних форсунок двигунів автомобілів в АПК, математична модель,
проведення експерименту, прилади
вимірювання

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Стані аналіз питання. Мета дослідження
2. Теоретичне дослідження ультразвукової очистки електромагнітних форсунок двигунів автомобілів в АПК
3. Експериментальні дослідження. Методика проведення.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання " " 2021 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Роговський І.Л.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Кузьмін А.А.

(прізвище та ініціали студента)

ВСТУП

Актуальність теми. Посилення вимог до автотранспорту, пов'язаних зі зниженням витрати палива без втрати потужності двигуна та поліпшенням їх екологічних показників призводить до пошуку заходів, що дозволяють вирішити такі завдання. Одним з основних способів рішень, що впливають на витрату палива і токсичність газів, що відпрацювали, є використання керованих електронікою систем упорскування палива. Фермерські господарства агропромислового комплексу (АПК) мають у своєму розпорядженні різні види сільськогосподарської техніки, серед яких особливе місце займають транспортні засоби малої та середньої вантажопідйомності з бензиновими двигунами з розподіленим упорскуванням палива.

Одним з основних елементів системи упорскування є електромагнітна форсунка (ЕМФ). Постійне поліпшення конструкції форсунок дозволило на сьогоднішній день отримати пристрій, що відповідає високим вимогам, що пред'являються не тільки до подачі палива в камеру згоряння, але і до сумішоутворення.

При експлуатації систем живлення двигуна технічний стан електромагнітних форсунок змінюється, величини їх робочих показників знижуються. Причинами такого погіршення роботи форсунок є забруднення та зношування конструктивних елементів пристрою, зокрема, зношування замикаючого елемента. Безперечно, все це впливає на енергетичні та екологічні показники двигуна. Слід зазначити, що на робочі параметри електромагнітних форсунок, крім зношування складових частин, впливає і якість палива. Наприклад, у сільських районах вплив на інтенсивність смолоутворення може надавати паливо, яке довго зберігається в ємностях. Як правило, споживання палива циклічне, що позначається на збільшенні часу зберігання палива у ємностях на АЗС. Це призводить до окиснення палива. Збільшення вмісту фактичних смол у паливі призводить до збільшення інтенсивності смолоутворення у паливній системі двигуна автомобіля. Тобто, при

експлуатації транспортних засобів необхідно використовувати якісний бензин та встановлювати норми періодичності проведення робіт з очищення ЕМФ ультразвуком, оскільки нормативно-технічною документацією не передбачені роботи з технічного обслуговування, очищення ЕМФ протягом усього терміну служби транспортного засобу.

Для відновлення робочих параметрів форсунок застосовують як хімічний, і ультразвуковий спосіб очищення від забруднень. Робочі параметри після цих процедур іноді досягають вихідних значень параметрів. Однак, таке очищення ЕМФ дозволяє покращити енергетичні та екологічні показники двигуна.

При експлуатації транспортних засобів виникають складнощі у контролі роботи двигуна за його показниками, що залежать від електронних систем керування двигуном (ЕСКД), інтегрованих із системою подачі палива.

Найбільш навантаженим елементом цієї системи є форсунка, на неї припадає до 13% несправностей.

Рекомендована виробником після 100-120 тисяч кілометрів (тис. км.) пробігу автомобіля заміна форсунок не передбачає їх очищення до цих значень, хоча необхідність періодичного обслуговування ЕМФ, черговість застосування різних способів очищення при нижчому напрацюванні очевидна.

Великий парк транспортних засобів, оснащених розподіленими системами упрорскування палива, потребує відновлення робочих параметрів форсунок для підтримки енергетичних та екологічних показників двигуна з урахуванням його природного зношування, що на сьогодні є дуже актуальним.

Мета роботи – Поліпшення енергетичних та екологічних показників двигунів автомобілів АПК з розподіленим упрорскуванням палива ультразвуковим очищенням ЕМФ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналітично обґрунтувати залежність зміни середніх значень витрати палива при забрудненні соплових отворів ЕМФ від пробігу.
2. Оцінити вплив ультразвукового очищення ЕМФ на покращення

енергетичних та екологічних показників двигунів у процесі експлуатації.

3. Розробити склад та послідовність робіт при ультразвуковій
очистці ЕМФ.

4. Розрахувати економічний ефект запропонованих заходів.

Об'єкт дослідження - ЕМФ сучасних двигунів автомобілів
агропромислового комплексу.

Предмет дослідження - зміна середнього відхилення значень
витрати палива в залежності від технічного стану ЕМФ на різних
режимах двигуна.

Наукова новизна:

1. Аналітично обгрунтовано залежність зміни середніх значень
витрати палива при забрудненні соплових отворів ЕМФ від пробігу.

2. Обгрунтовано збільшення потужнісних та покращення
екологічних показників двигунів внутрішнього згоряння після
ультразвукового очищення ЕМФ у процесі експлуатації.

3. Обгрунтовано перелік та послідовність операцій періодичного
ультразвукового очищення ЕМФ для покращення показників двигунів у
процесі експлуатації.

Теоретична значимість роботи полягає в отримання аналітичної
залежності зміни середніх значень витрати палива, в обгрунтуванні впливу
технічного стану ЕМФ на екологічні та енергетичні показники двигуна.

Методологія та методи дослідження. При виконанні роботи
використовувалися положення теорії надійності, методи математичного аналізу
та статистичної обробки експериментальних даних. Експериментальні
дослідження виконані з використанням сучасних методик, приладів та
обладнання, що пройшли метрологічний контроль. Обробка результатів
експериментів проводилася за допомогою програм Excel, Statistika 10.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз технічного стану паливної апаратури двигунів

Ускладнення автомобілів та посилення вимог до його агрегатів та систем призвели до того, що проблема підвищення їх надійності набула величезного значення. Ненадійний автомобіль не може ефективно функціонувати, оскільки кожна його відмова тягне за собою значні матеріальні втрати, а сумарні щорічні витрати на підтримання автотранспортних засобів у працездатному стані постійно зростають. Все це повною мірою відноситься і до основного агрегату автомобіля, його силової установки. Аналіз показників надійності двигунів показує, що можливість виникнення відмов і несправностей у тому конструктивних елементах досить велика (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Розподіл відмов двигуна ЗМЗ-4062.10

Найменування елементів силового агрегату	Частка відмов, %	Середнє напрацювання на відмову, км	Коефіцієнт варіації	Витрати ремонт, грн.			
				За послуги		На запчастини	
				Середнє значення	Коеф. варіації	Середнє значення	Коеф. варіації
1. Система живлення з розподіленням упорскуванням палива	25,59	35990	1,027	2331	0,947	3722	0,983
2. Підшипники кочінчастого валу, датчик	18,32	36586	1,193	5703	0,259	93458	1,051
3. Циліндропоршнева група	14,05	36670	1,273	4622	0,712	16934	0,714
4. Система охолодження	5,42	14243	1,073	532	0,673	1753	1,012
5. Головка блоків циліндра	7,89	35613	1,102	1416	0,498	2385	0,593
6. Газорозподільний механізм	5,50	36627	1,147	750	0,342	745	0,508
7. Система мастила	6,95	29526	0,887	572	0,525	3310	0,651
8. Стартер	4,71	62342	0,741	2105	0,357	1107	0,458
9. Генератор	4,86	77132	0,611	686	0,295	2826	0,402
10. Блок циліндрів	6,71	167347	1,178	10370	0,371	105000	0,272
Силовий агрегат загалом	100	23140	1,021	1613	1,138	11272	2,414

Аналіз елементів паливної апаратури (ПА) бензинових двигунів, що

встановлюється на транспортні засоби малої та середньої вантажопідйомності, показав, що найбільша частка відмов припадає на систему живлення з розподіленим упорскуванням.

В даний час найбільшого поширення набули системи живлення з розподіленим упорскуванням палива та електронним управлінням [11, 34]. Систему такого типу (рисунок 1.1) має і двигун ЗМЗ-4062.10, який встановлюється на автомобілі сімейства ГАЗ, які активно використовуються в агропромисловому комплексі [82].

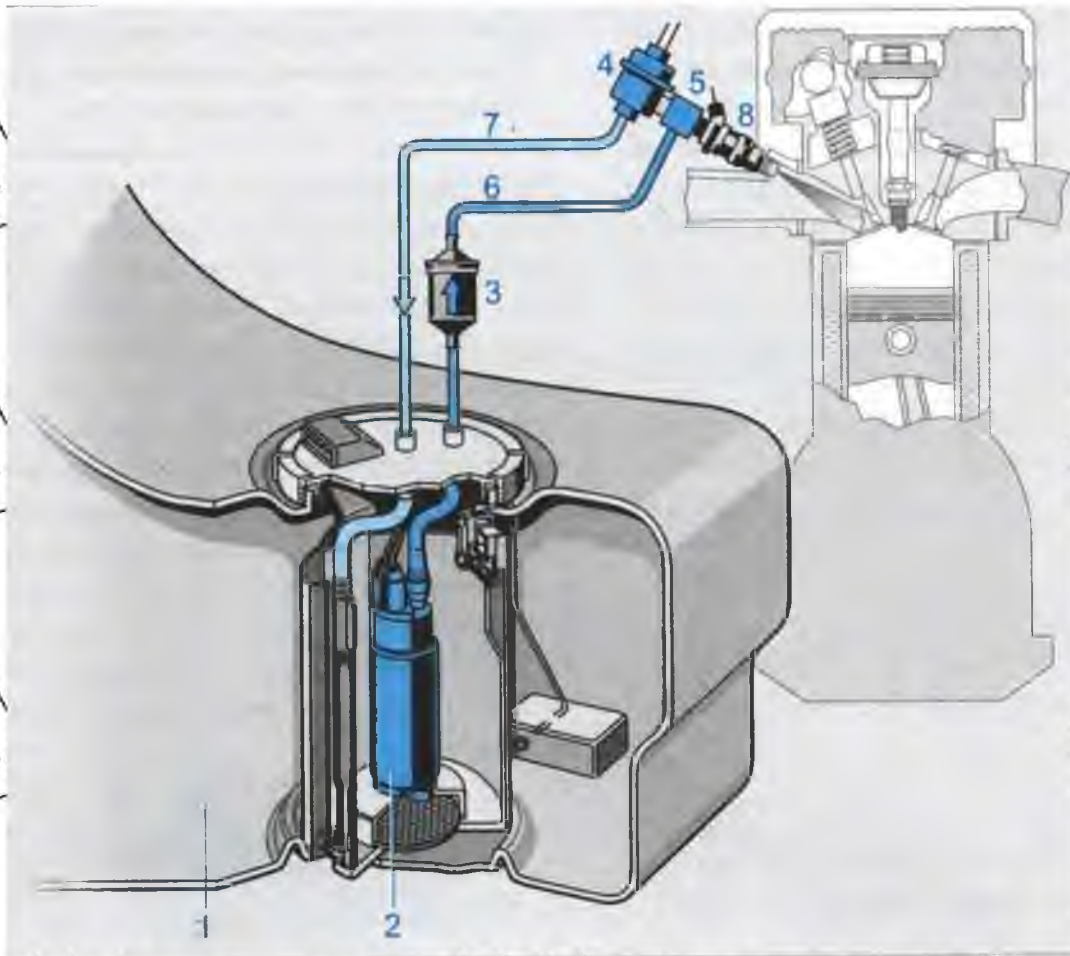


Рисунок 1.1 Схема системи упорскування палива:

1 - паливний бак; 2 - електробензонасос; 3 - паливний фільтр тонкого очищення палива; 4 - регулятор тиску палива; 5 - паливна рампа; 6 - лінія подачі палива; 7 - лінія повернення палива; 8 - електромагнітні форсунки.

Система подачі палива з розподіленим упорскуванням палива у впускний трубопровід містить наступні елементи:

НУБІП України

- паливний бак;
- електробензонасос;
- паливний фільтр тонкого очищення палива;

- регулятор тиску палива;

- паливна рампа;

- електромагнітні форсунки.

НУБІП України

Паливний бак є резервуаром для зберігання палива. Корпус паливного бака має корозійно-стійкі властивості і зберігає герметичність при перевищенні робочого тиску [3, 39]. Електричний бензиновий насос (ЕБН) повинен постійно

НУБІП України

подавати до двигуна достатню кількість палива за будь-яких умов роботи з низьким рівнем шуму, під необхідним тиском і протягом усього терміну служби автомобіля [3, 39]. Основні вимоги до паливного насоса:

- величина подачі палива при номінальній електричній напрузі повинна

становити 60-200 л/год;

- тиск у паливній магістралі має становити 300-450 кПа (3,0-4,5 бар);

- забезпечення підвищення тиску під час падіння напруги до 50-60%

від номінального рівня.

НУБІП України

Паливний фільтр тонкого очищення палива здійснює фільтрацію палива, що надходить у паливну систему. Корпус фільтра містить елемент, що фільтрує, затримує частинки бруду. Як фільтруюче середовище використовується спеціальний, просочений смолою папір з целюлозного волокна. Ефективність фільтрації та опір фільтра потоку визначається пористістю паперу та розподілом пір. Фільтруючий елемент для систем із впорскуванням палива у впускний трубопровід має середню ширину пор приблизно 10 мкм [3, 39, 54].

НУБІП України

Регулятор тиску палива повертає таку кількість палива назад у паливний бак, що перепад тиску на форсунці залишається постійним. Регулятор встановлений на паливній рампі, призначений для підтримки постійного перепаду тиску між паливом та повітрям у впускному колекторі при розширенні палива ЕМФ [3, 39, 54, 82, 95].

НУБІП України

Паливна рампа служить для накопичення палива, яке потрібно для впорскування палива, згладжування пульсації тиску форсунками та рівномірного розподілу палива по всіх форсунках [3, 39, 54, 82, 95].

Електромагнітна форсунка служить для впорскування дозованих порцій палива у впускний трубопровід під тиском. Управління форсункою здійснюється за рахунок зміни тривалості сигналу, що подається з електронного блоку управління [3, 39, 82, 95].

У процесі експлуатації бензинових двигунів відбуваються зміни робочих показників паливної системи [36, 75].

Основними причинами цього є, як знос деталей та вузлів, так і забруднення магістралей та механізмів паливної системи.

Знос:

- електричний бензиновий насос (щітки та клапани);
- сілце та голка електромагнітної форсунки;
- регулятор тиску палива (знос мембрани).

Вище перелічені та інші фактори призводять до зміни робочого тиску в системі (зниження та пульсація), що призводить до погіршення експлуатаційних показників автомобіля.

Забруднення:

- на пропуску здатність паливопроводів та фільтрів впливає наявність механічних домішок у паливі, що призводить до зменшення їх пропускну здатності;

лакові та смолисті відкладення зменшують прохідний переріз клапанів та фільтрів, а також призводять до зміни форми струменя електромагнітної форсунки.

На забруднення палива впливають, у тому числі й механічні домішки, що потрапляють під час транспортування, продукти корозії емностей для зберігання (наприклад, у емностях підприємств АПК) та вода, що потрапляє у паливо внаслідок конденсації парів під час зберігання.

Кількість та склад домішок у паливі залежить від умов, термінів

зберігання та транспортування до місця реалізації.

Аналіз статистичних даних показує, що в основному на роботу паливної системи впливають смолисті відкладення на елементах електромагнітної форсунки, тоді як відкладення у магістралях та фільтрах не вносять змін у роботу паливної системи [36, 37, 54].

На процес утворення відкладень електромагнітної форсунки впливає те, що розпилювач форсунки розташовується в безпосередній близькості від впускних клапанів і на розпилювачі впливає підвищена температура. На них осідає частина палива, яка під впливом підвищеної температури піддається інтенсивному окисленню вуглеводнів та смолистих речовин з утворенням ущільнених, нерозчинних у бензині продуктів.

Зазначені відкладення негативно позначаються на формі розпилювання палива, яка відповідає початковим параметрам струменя, зазначеним заводом виробником [13, 38, 74].

Розпорошення струменя палива призводить до утворення крапель (тонкість розпилу), які надалі дробляться на дрібніші (рис. 12) [3, 71].

Методики усунення вищезазначених недоліків у форсунках не передбачені нормативною документацією [15, 82].

НУБІП України

НУБІП України

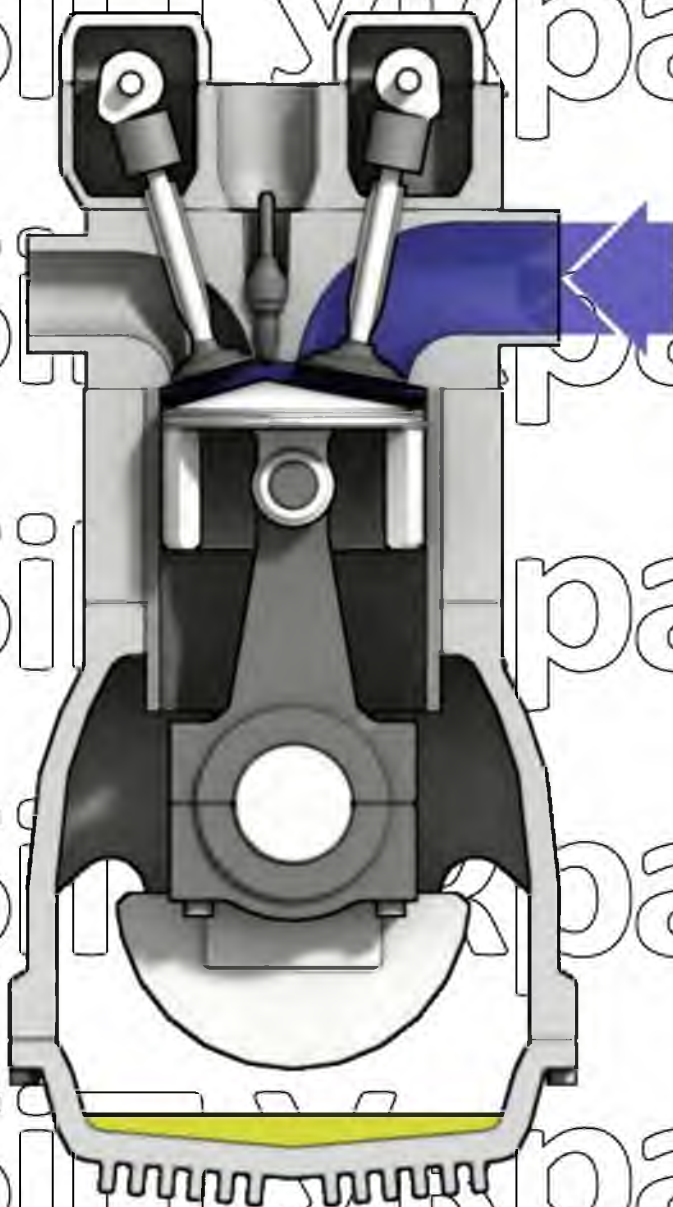
НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

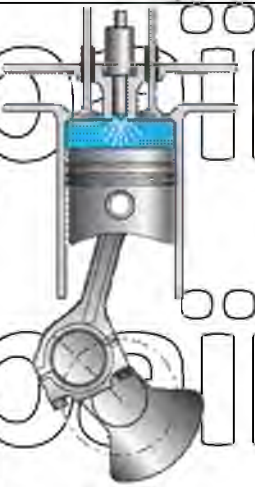


Впуск

Поршень рухається від ВМТ до НМТ і, діючи як насос, створює розрідження у циліндрі. Під впливом різниці тиску з навколишнього середовища у порожнину циліндра через відчинений впускний клапан засмоктується повітря, впускний клапан зачинений. Після досягнення НМТ поршень йде до ВМТ, впускний клапан зачиняється (впуск закінчено). Тиску в циліндрі наприкінці такту становить $0,08 - 0,09$ МПа, температура повітря внаслідок стикання з нагрітими деталями і змішування з продуктами згоряння підвищується до $30 - 50$ °С.

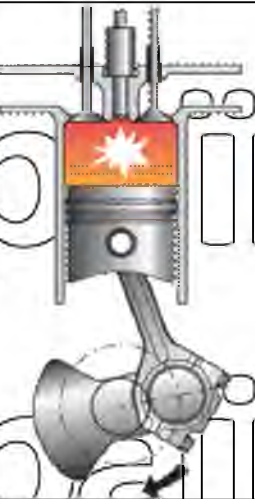
**Стиск**

Обидва клапани зачинені. Поршень рухається до ВМТ, стискуючи повітря у циліндрі. У разі наближення поршня до ВМТ тиск у циліндрі підвищується до $3,5 - 4$ МПа, температура – до $600 - 700$ °С. Доза дизельного палива, що впорскується форсункою під тиском $12 - 18$ МПа, змішується з повітрям, тобто створюється суміш, яка одразу ж спалахує, оскільки її температура значно вища за температуру самозаймання дизельного палива. Температура газів підвищується до $1800 - 2000$ °С, тиск – до $6 - 9$ МПа.

**Робочий хід**

Обидва клапани залишаються зачиненими. Під дією тиску газів, що згоряють, поршень рухається до НМТ і, тиснувши через шатун на кривошип колінчастого вала, обертає його, тобто виконується робота.

Наприкінці ходу поршня, біля НМТ, тиск газів знижується до $0,4 - 0,5$ МПа, температура – до $700 - 900$ °С. У цей час відчиняється впускний клапан б, через значний перепад тиску в циліндрі та зовні починається вихід газів.



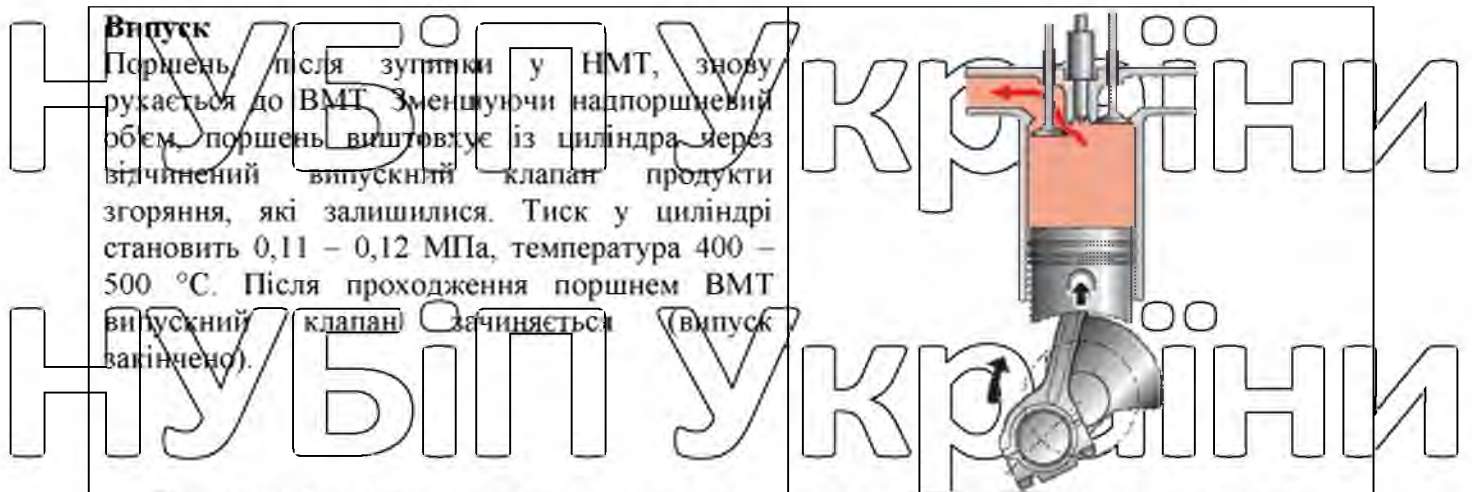
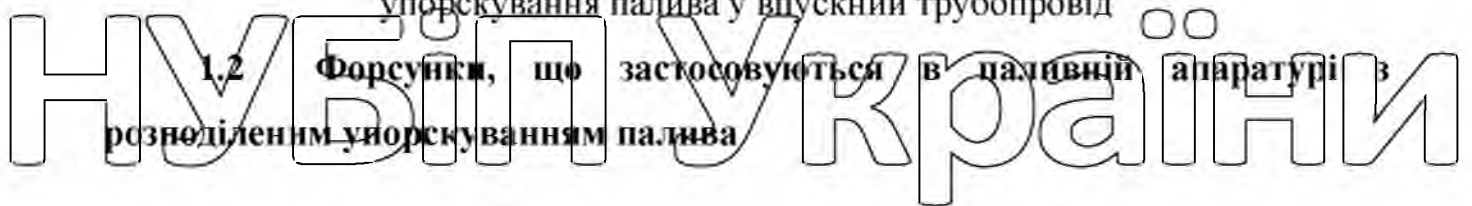


Рис. 1.2 Механізми та фактори, що впливають на сумішоутворення під час

упорскування палива у впускний трубопровід



Компоненти системи сумішоутворення повинні забезпечувати належне утворення паливно-повітряної суміші при використанні тієї чи іншої системи упорскування палива. У системі з упорскуванням палива у впускний колектор це переважно завдання електромагнітної форсунки [3, 34, 95].

Електромагнітна форсунка містить такі основні компоненти (рисунок

1.3):

- корпус клапана з електричним та гідравлічним з'єднаннями;
- електромагнітна когушка;
- голчастий клапан з якорем електромагніту та кулькою клапана;
- сідло клапана з діафрагмою;
- пружина клапана.

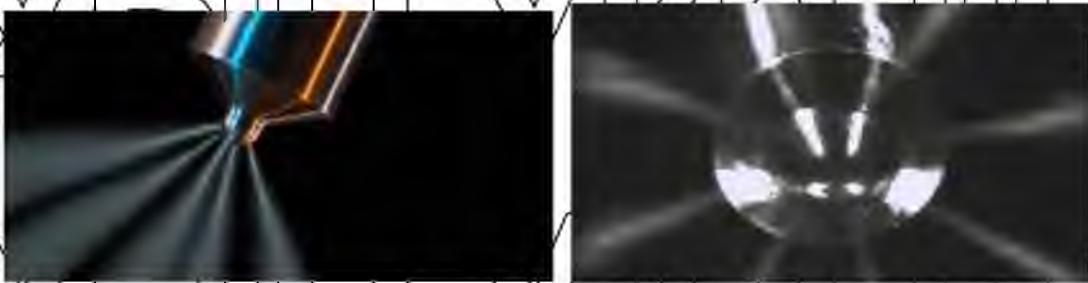
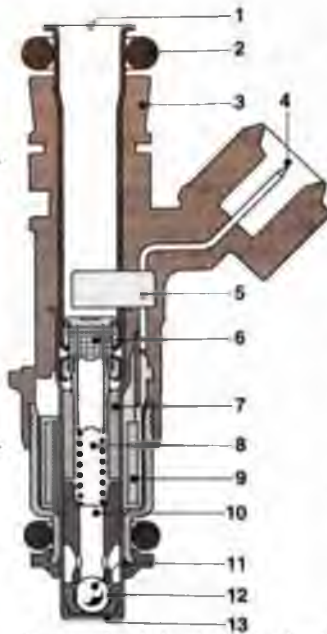


Рис. 1.3 – Електромагнітна форсунка: 1 – гідравлічний канал; 2 - кільце ущільнювача; 3 – корпус клапана; 4 – електричний висновок; 5 - пластмасовий затискач зі штифтами; 6 - сітчастий фільтр; 7 – внутрішній канал; 8 – пружина клапана; 9 – котушка електромагніту; 10 - голка клапана з якорем; 11 - кулька клапана; 12 – сідло клапана; 13 – розпилювальна пластина з отворами.

Фільтр на впуск палива захищає форсунку від забруднень. Кільце ущільнювача 2 (круглого перерізу) на гідравлічному з'єднанні служить для ущільнення форсунки в паливній рампі. Нижнє кільце ущільнювача забезпечує ущільнення між форсункою і впускним трубопроводом.

Коли котушка електромагніту знеструмлена, кулька голчастого клапана 11 притискається до сідла 12 конічної форми пружиною 8 із зусиллям, створюваним тиском палива. При цьому система подачі палива ізольована від впускного трубопроводу. Коли на котушку електромагніту подається електричне живлення, створюється магнітне поле, що притягує якор електромагніту клапана голки. Кулька клапана піднімається над сідлом, і

відбувається впорскування палива. Коли котушка знеструмлена голковий клапан закривається під дією зусилля пружини.

Паливо розпорщується пластиною 13 з отворами. Для кращого розпилення палива розпилювальні пластини, що раніше використовувалися, з чотирма отворами були замінені на розпилювальні пластини з великою кількістю отворів (до дванадцяти). Штамповані дифрагми забезпечують якісну стабільність кількості палива, що впорскується. Форма струменя палива, що виходить із форсунки, визначається кількістю отворів у розпилювальній пластині та їх конфігурацією.

Кількість палива, що впорскується за одиницю часу, визначається в основному попереднім тиском у системі подачі палива, протитиском у впускному трубопроводі та геометрією області впуску палива.

Процес утворення струменя палива, тобто, його форма, кут розсіювання та розмір крапель палива впливають на утворення паливно-повітряної суміші. Різна геометрія впускного трубопроводу і головки блоку циліндрів викликають необхідність створення струменів палива різної форми (рисунки 1.4) [3, 34, 95].

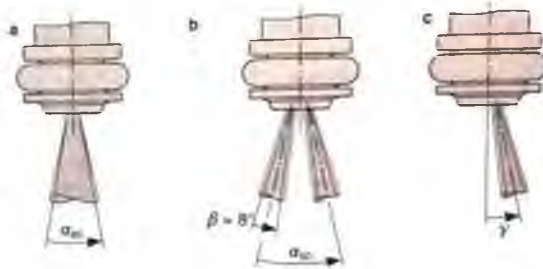


Рис. 1.4 Форми струменів палива: а - конусні струмені; б - подвійний струмінь; в - зміщений струмінь

Конусна форма розпилення. Окремі струмені палива, що виходять із отворів розпилювальної пластини, разом утворюють конусний струмінь.

Форсунки, що забезпечують конусну форму струменя палива, зазвичай встановлюються на двигунах з одним впускним клапаном на кожен циліндр. Однак вони можуть використовуватися і на двигунах із двома впускними

клапанами на одному циліндрі.

Двоструменева форсунка. Двострумні форсунки часто використовуються на двигунах з двома впускними каналами на одному циліндрі. Отвори в розпилувальній пластині розташовані таким чином, що з форсунки виходять два конусні струмені, спрямовані до відповідних впускних клапанів або на перегородку між впускними клапанами.

Форсунка з кутовим відхиленням струменя. Струмні палива виходить з форсунки під кутом до її осі.

Такі форсунки в основному використовуються, коли конструктивні особливості камери згоряння не дозволяють використовувати форсунку із співвісним напрямком струменя.

Електрична активація форсунки. Вихідний модуль у блоці керування двигуном приводить форсунку в дію, подаючи на неї сигнал (рисунк 1.5, а).

При подачі напруги електричний струм у котушці електромагніту зростає (рис. 1.5, б), що викликає підйом голкового клапана (рис. 1.5, с). Максимальний підйом клапана досягається після закінчення часу підйому. Упорскування палива починається, як тільки кулька клапана виходить із сідла. Залежність кількості палива, що впорскується, від часу наведена на малюнку 1.5, d.

Оскільки після знеструмлення котушки магнітне поле не зникає миттєво, клапан повністю закривається після часу розмагнічування (відпадання) [3, 34, 95].

Нелінійність характеристики на ділянках відкриття та відпадання клапана форсунки повинна бути компенсована протягом періоду відкритого стану форсунки (час упорскування). Швидкість підйому кульки клапана залежить від напруги акумуляторної батареї. Вплив напруги компенсується за допомогою корекції тривалості упорскування.

1.3 Несправності та порушення справногo стану електромагнітних форсунок

Несправність - стан технічного пристрою, у якому хоча б одне з його основних чи додаткових параметрів відповідає вимогам, зумовленим технічної

документації [62].

Для стійкої роботи двигуна від електромагнітних форсунок потрібно, щоб вони працювали без збоїв, точно дозували кількість палива, необхідного силовим агрегатом [8, 12, 23]. З'єднання форсунки з паливним колектором, як і сам пристрій упорскування, повинні бути герметичними. Нормативний робочий тиск форсунок та рівні об'єму упорскування при подачі палива у впускний трубопровід становлять 250-300 кПа та 132-503 см³/хв відповідно [23, 69].

Дуже важливим для досягнення нормативних енергетичних та екологічних показників двигуна є форма, напрямок факела палива та якість його розпилу [23, 69]. Слід зазначити, що опис розпаду струменів, що формуються форсунками в системі безпосередньо впорскування, також як обчислення розміру крапель у потоці палива пов'язане зі складністю процесів, що протікають при впорскуванні паливної суміші [59].

Несправності та порушення справного стану електромагнітних форсунок пов'язані не тільки з природним зношуванням елементів пристрою упорскування, але і з їх забрудненням. До несправностей, обумовлених забрудненням, відносяться зміни подачі палива в циліндри двигуна, зміна форми та напрямку факела розпилу палива, погіршення однорідності розпилювання пального [5, 14, 16, 59, 69].

Пально-мастильні матеріали, взаємодіючи з металами, утворюють поверхневі забруднення у вигляді нагару, лаків та опадів. Механізм утворення останніх залежить від температури деталей розпилювача, групового вуглеводневого складу бензину, присутності в паливі смолистих речовин. На виникнення відкладень впливає також час контакту палива та олії з поверхнею проточних елементів електромагнітних форсунок [14, 16, 69, 73]. Особливістю забруднень деталей двигунів є їхня висока адгезія і здатність міцно утримуватися на поверхнях деталей та вузлів. Умовно забруднення можна розділити на опади, лаки та нагари, до складу яких входять смоли, асфальтени, карбени та карбоніди. Смоли - речовини складного хімічного складу, які під впливом температури та інших факторів ущільнюються та переходять до

асфальтенів. Наявні цей вид забруднень також зазнає змін, перетворюючись на високовуглецеві сполуки - карбени та карбонди. Крім того, до складу експлуатаційних забруднень входять продукти згоряння та термічного розпаду палива – частки сажі та коксоподібних речовин.

Всі перераховані вище забруднення відкладаються на розпилювачах форсунок у вигляді липких високомолекулярних з'єднань (плівок). Плівка, у свою чергу, утримує на своїй поверхні мікрочастинки олії та палива. Уся ця маса з часом спікається, товщина шару збільшується. Цей процес відбувається циклічно, в умовах змінних параметрів роботи двигуна в цілому. Особливо цей процес проявляється після зупинки двигуна, коли температура корпусу форсунки зростає за рахунок нагрівання від гарячого двигуна, а складна дія потоку бензину та повітря відсутня. Легкі фракції бензину в робочій зоні форсунки випаровуються, а важкі накопичуються у вигляді смолистих відкладень, що зменшують переріз каліброваного каналу [9, 23, 35, 107, 109].

Інтенсивність нагароутворення залежить від якості робочих рідин, режимів експлуатації, стану двигуна та виражається у вигляді нагару, який буває пухкий, щільний та маслянистий.

Існують основні три групи забруднень, що відрізняються фізико-хімічними та механічними властивостями.

I група - адгезійно-пов'язані (слабозв'язані) забруднення;

II група - Поверхнево-адсорбційно-пов'язані забруднення;

III група - міцно (глибинно) пов'язані забруднення.

IV група - III групи забруднень найбільш характерні для паливної апаратури бензинового двигуна. (рис. 1.6)

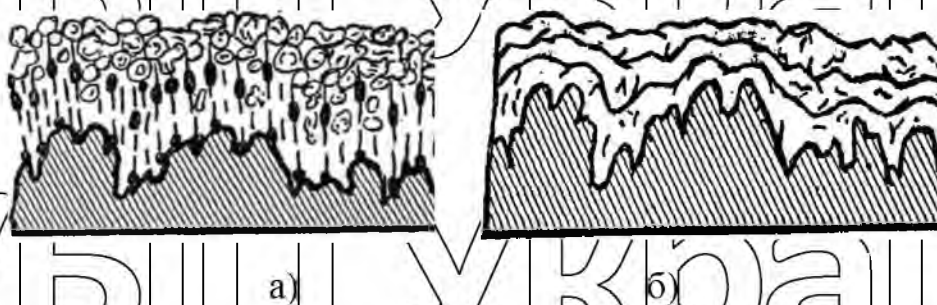


Рис. 1.6 Схема утворення забруднень на деталях паливної апаратури.

а-поверхнево-адсорбційно-пов'язані, б-міцно (глибинно) пов'язані

До I групи відносяться забруднення, які безладно розташовані у вигляді частинок пилу різної природи з невеликим вмістом органічних речовин, що слабо утримуються на поверхні за рахунок молекулярних та електростатичних сил.

До II групи відносяться забруднення у вигляді масел, смолистих відкладень з великим вмістом органічних речовин. Ці забруднення, на відміну I групи, утримуються на поверхні ще й з допомогою часткового поглинання забруднень твердою поверхнею.

До III групи відносяться забруднення у вигляді лакових відкладень, продуктів корозії, окалин тощо. Усі ці забруднення утримуються на поверхні виключно за рахунок міцного погашення твердою поверхнею.

Проведений аналіз показав, що найбільш характерними забрудненнями деталей паливної апаратури (особливо розпилювачів форсунок) є нагари, лакові та полімеризовані смолисті відкладення, які важко видаляються та стійкі до впливу миючих середовищ та розчинників.

1.4 Способи очищення електромагнітних форсунок

Одним із способів, що запобігають утворенню відкладень на поверхні форсунок, що відновлюють їх працездатність, видаляють з інжекторів вугільний пил смоли і мастило, є введення в бензин (безпосередньо виробником) миючих присадок або препаратів, що додаються в паливо автомобілістами [14, 24, 23, 57, 69, 73, 92]. Присутність миючих присадок регламентується нормативами та ГОСТами. Так, у сучасних марках бензину, що випускаються в Росії, застосування миючих присадок допускається, у вимогах Світової паливної хартії до якості палива використання цих препаратів є обов'язковим лише у розвинених країнах [21, 57].

Ефективність дії присадок, що мають миючі властивості різна. До цього часу спеціалістами проводяться дослідження, метою яких є синтез композитів, що дозволяють отримати від хімічного реагенту максимальну віддачу не лише

у запобіганні утворення грязьових відкладень, а й у відновленні праездатності електромагнітних форсунок [113].

Асортимент присутніх у торгових мережах препаратів - очисників інжекторів, що додаються в бензин, дуже великий. Для підтвердження їх ефективної дії проводять випробування, знімаючи показники стендового двигуна під час роботи на базовому бензині та бензині, що містить такий препарат [46, 113].

Заходи, пов'язані з очищенням форсунок без їх зняття з двигуна, проводять за допомогою введення в бензин препаратів, що мають миючу дію.

Існує спосіб, при якому застосовують промивну рідину (сольвент-декорбанайзер), що є також як і бензин для двигуна паливом [16, 23, 37, 69, 73, 92, 111]. При цьому як і в першому випадку форсунки з паливної рампи не демонтують. Промивання проводять протягом 20-25 хв на працюючому двигуні. Штатну систему подачі палива відключають, а замість неї використовують спеціальну установку, при використанні якої очищення проводять без циркуляції сольвенту (палива) або з циркуляцією палива [23, 37].

В даний час на СТО найбільш популярна рідина відомої бельгійської фірми WYNN'S.

Аналізуючи дані щодо оцінки технічного стану паливної системи автомобілів VW Tiguan до та після очищення рідиною WYNN'S, виробничу перевірку якої ми проводили на СТО ТОВ «АВТОРУСЬ ІЗМАЙЛОВО» у м. Москві можна зробити наступний висновок.

Сучасні паливні системи мають дуже точне налаштування, і тому вони дуже чутливі до різноманітних негативних впливів від хімічних реакцій, що відбуваються в паливі. Вони призводять до засмічення паливної системи, поганого мастила, корозії та інших несправностей. На автомобілях з пробігом виникають проблеми з отриманням правильної паливної суміші (співвідношення повітря/паливо) та ефективністю її згоряння. Це відбувається за рахунок накопичення відкладень у паливній системі та зносу деталей. Однак склад рідини WYNN'S ефективно очищає форсунки від забруднень, видаляє

воду, захищає деталі паливної системи від корозії. Результати нашого аналізу наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Результати виробничої перевірки

VIN номер автомобіля VW Tiguan	Пробіг	Рік випуску	Причина звернення	Проведені роботи	Результат
XW8ZZZ5NZCG1260 34	94 327	2012	Висвітлюється індикація несправності ДВЗ "Check Engine"	Очищення рідиною WYNN'S	Індикація несправності ДВЗ "Check Engine" не відображається
XW8ZZZ5NZCG1234 93	97 289	2012	Висвітлюється індикація несправності ДВЗ "Check Engine"	Очищення рідиною WYNN'S	Індикація несправності ДВЗ "Check Engine" не відображається
XW8ZZZ5NZEG1183 81	48 243	2014	Висвітлюється індикація несправності ДВЗ "Check Engine"	Очищення рідиною WYNN'S	Індикація несправності ДВЗ "Check Engine" не відображається
XW8ZZZ5NZDGI066 39	64 137	2013	Висвітлюється індикація несправності ДВЗ "Check Engine"	Очищення рідиною WYNN'S	Індикація несправності ДВЗ "Check Engine" не відображається
XW8ZZZ5NZCG1152 97	123 894	2012	Висвітлюється індикація несправності ДВЗ "Check Engine"	Очищення рідиною WYNN'S	Індикація несправності ДВЗ "Check Engine" не відображається

Очищення інжекторів після їх зняття з двигуна здійснюють в ультразвукових ваннах, якими комплектують діагностичні стенди, або на самих стендах, використовуючи в режимі вимірювання продуктивності форсунок промивну рідину [7, 16, 23]. В основі технології очищення форсунок із застосуванням високочастотних хвиль лежить ультразвукова кавітація [17, 31].

У процесі експлуатації сільськогосподарської техніки, серед яких

особливе місце займають транспортні засоби малої та середньої вантажопідйомності з бензиновими двигунами з розподіленим упрскуванням палива, на зовнішніх та внутрішніх поверхнях деталей відкладаються технологічні забруднення у вигляді мастил, олій, рідких вуглеводнів та продуктів корозії. У ремонтному виробництві на автотранспортних підприємствах для очищення забрудненої поверхні деталей застосовують синтетичні миючі засоби (СМЗ). Аналіз науково-технічної літератури показує, що підвищення технологічних властивостей СМЗ до них додають різні присадки. протикорозійних властивостей додають борати, фосфатики які характеризуються високим інгібуючим ефектом по відношенню до сталі в водно-сольових середовищах і умовах атмосфери. Відомо також, що комплексні сполуки мають, як правило, більш високі миючі та протикорозійні властивості, ніж їх складові окремо. Тому дослідження впливу боратфосфатних з'єднань на технологічні властивості водних розчинів МЛ-52, МС-8, Лабомід-203 та розробка на їх основі ефективних боратфосфатних миючих засобів (БФМЗ), становлять науково-практичний інтерес.

В таблиці 1.3 відображені переваги та недоліки способів видалення забруднень. Найменша кількість забруднень спостерігається при ультразвуковій очистці на частотах 20...40 кГц. При такому способі кількість забруднень, що залишилися, не перевищує 0,5%.

Аналізуючи способи очищення, найбільш перспективним є використання ультразвукового очищення, яка дозволяє видаляти забруднення, що важко видаляються, з електромагнітних форсунок і деталей паливної апаратури [17, 26, 31, 50]. Даний спосіб очищення найперспективніше використовувати на підприємствах, що експлуатують транспортну техніку.

Таблиця. 1.3

Порівняльний аналіз різних способів видалення забруднень з деталей паливної апаратури

Найменування методу	Очищувані деталі	Застосовується обладнання	Переваги	Недоліки
Механічний ручний	Корпуси, прецизійні деталі	КИ-5319, щітки, скребки	Універсальність, простота	Низька продуктивність праці та культура виробництва
Струменевий	Всі деталі, крім прецизійних	ОМ-12077 ОМ-1418А ОМ-1459А ОМ-12139 та ін. ОМ-5287 ОМ-5288 та ін.	Доступність, використання водних розчинів екологічно безпечних миючих засобів, висока продуктивність	Недостатня якість очищення при видаленні твердих забруднень та очищення замкнутих порожнин, кишень
Занурювальний	Всі деталі	ОРГ-4990В та ін. ОМ-7АН8 та ін.	Доступність, універсальність	Пожежонебезпечність, токсичність, шкідливий вплив на навколишнє середовище
Ультразвуковий	Усі деталі, крім корпусних	ОР-15702 УЗВ-16М та ін.	Можливість видалення різних груп та видів забруднень, очищення деталей різної форми та конфігурації, використання водних розчинів екологічно безпечних миючих засобів, висока продуктивність та культура праці	Потреба в кваліфікованому обслуговуванні ультразвукового обладнання, утруднене очищення великогабаритних корпусних деталей

1.5. Механізм видалення забруднень миючим розчином в ультразвуковому полі

У науковій праці Мачалкіна Ю.М., автором зазначено, що «ультразвук – пружні коливання та хвилі, частота яких перевищує 15...20 кГц. Нижня межа області ультразвуку визначається суб'єктивними властивостями людського слуху, а верхня – фізичною природою пружних хвиль, які можуть поширюватися лише у матеріальному середовищі, за умови, що довжина хвилі значно більша за довжину вільного пробігу молекул у газах або міжатомних відстаней у рідинах та твердих тілах. Ультразвукові хвилі застосовуються як у наукових дослідженнях вивчення будови і властивостей речовин, так вирішення найрізноманітніших технічних завдань, зокрема, видалення різних забруднень» [60, з. 17].

Основним фактором впливу ультразвуку, що очищає, є явище кавітації.

Кавітація - це процес утворення в рідині бульбашок (каверн, порожнин), заповнених газом, паром або їх сумішшю, та їх подальшого захоплення. Кавітаційні бульбашки утворюються в результаті сильного локального зниження тиску в рідині і закриваються внаслідок його підвищення [17, 31, 93, 106].

Розрізняють гідродинамічну та акустичну кавітацію. Гідродинамічна кавітація виникає внаслідок зниження тиску в потоці рідини, що відбувається при різкому збільшенні швидкості потоку.

Гідродинамічна кавітація здійснюється за рахунок пристроїв, що перетворюють частину енергії турбулентного струменя миючої рідини в енергію акустичних коливань.

Акустична кавітація виникає внаслідок зниження тиску в рідині, яке відбувається при проходженні в рідині високоінтенсивної звукової хвилі під час напівперіоду розрядження. Переміщуючись із потоком в область із підвищеним тиском (у разі гідродинамічної кавітації) або під час напівперіоду стиснення (у разі акустичної кавітації) бульбашки закриваються.

Акустико-кавітаційне очищення здійснюється за допомогою

ультразвукового мийно-очисного обладнання, основними вузлами якого є ультразвуковий генератор, призначений для перетворення струму промислової частоти в струм ультразвукової частоти, і ультразвукова коливальна система, що забезпечує перетворення енергії електричних коливань, що надходять від,

Підсилення сформованих механічних коливань та їх введення в мийочу рідину [17, 93, 106]. Безпосередньо очищення проводиться у робочій ємності, що заповнюється мийочною рідиною. Розрізняють два типи ультразвукового (УЗ) мийно-очисного обладнання: УЗ ванни та занурювальні УЗ випромінювачі.

Занурювальний УЗ випромінювач, на відміну від УЗ ванни, не містить у штатному комплекті спеціальної робочої ємності, в процесі роботи його занурюють у будь-яку відповідну ємність з мийочною рідиною. Розрізняють модульні занурювальні випромінювачі та випромінювачі з занурювальними хвилеводами-концентраторами.

Пухирці утворюються в тих місцях, де тиск у рідині виявляється нижче деякого критичного значення, що відповідає порогу кавітації [17]. Для спонтанного утворення бульбашок в ідеальній однорідно чистій рідині потрібні великі напруги, що розтягують. У реальних умовах розриви суцільності рідини відбуваються при тисках, які лише трохи менші від тиску насиченої пари при даній температурі, що пояснюється наявністю зародків кавітації - мікроскопічних газових бульбашок, присутніх в обсязі рідини або в тріщинах і порах на поверхні твердих тіл (часток), що знаходяться в рідині. Ці зародки, опинившись у ділянці зниженого тиску, втрачають свою стійкість і починають швидко зростати в розмірах. Їх розширення обумовлено дифузією газу з рідини в пляшечку і винаровуванням рідини в пляшечку.

Процес ультразвукового очищення обумовлений низкою гідродинамічних явищ, що виникають в ультразвуковому полі значної інтенсивності: кавітацією, акустичними течіями, радіаційним тиском та ін [20, 29, 36]. Ефективність очищення залежить від параметрів звукового поля, визначається джерелами акустичної енергії - частоти та амплітуди коливань, інтенсивності звуку, звукового тиску та від фізико-хімічних властивостей мийочної рідини - в'язкості,

пружності насиченої пари, поверхневого натягу, щільності, газоутримання. Вибір параметрів звукового поля та рідин з певними властивостями дозволяє керувати явищами, що зумовлюють ультразвукове очищення [17]. На ефективність очищення впливають також температура та концентрація миючого розчину. У процесі очищення відбувається руйнування поверхневих плівок забруднень, відшаровування та видалення забруднень їх емульгування та розчинення.

1.6. Постановка мети та завдань дослідження

Проведений аналіз причин забруднень систем паливної апаратури двигунів з розподіленим уприскуванням палива та особливостей експлуатації дозволяє сформулювати мету та завдання даної роботи.

Мета роботи – Поліпшення енергетичних та екологічних показників двигунів автомобілів АПК з розподіленим уприскуванням палива ультразвуковим очищенням ЕМФ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналітично обґрунтувати залежність зміни середніх значень витрати палива при забрудненні соплових отворів ЕМФ від пробігу.
2. Оцінити вплив ультразвукового очищення ЕМФ на покращення енергетичних та екологічних показників двигунів у процесі експлуатації.
3. Розробити склад та послідовність режіт при ультразвуковій очистці ЕМФ.
4. Розрахувати економічний ефект запропонованих заходів.

1.7. Висновки з першого розділу

Виконано науковий аналіз процесів забруднення та наслідків зношування елементів електромагнітної форсунки, виявлено їх вплив на роботу автомобільного бензинового двигуна. Для запобігання та усунення забруднень ЕМФ існують способи очищення, які поділяють залежно від завдань подальшої експлуатації та виявлених порушень у роботі двигуна. Як профілактичні заходи використовують різні хімічні добавки в паливо, що дозволяють знизити схильність форсунок до забруднень. Результати проведеного дослідження

НУБІП У КРАЇНИ

дозволяють зробити висновок, що існуючі миючі присадки до бензину не забезпечують повного очищення форсунок. Вони можуть застосовуватись як профілактичний засіб проти забруднення форсунок у процесі експлуатації. А ультразвукове очищення дозволяє повністю видалити органічні відкладення.

НУБІП У КРАЇНИ

НУБІП У КРАЇНИ

НУБІП У КРАЇНИ

НУБІП У КРАЇНИ

НУБІП У КРАЇНИ

НУБІП У КРАЇНИ

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ПРИ ЗМІНІ ПРОХІДНОГО ПЕРЕКАЗУ РОЗШИРЮВАЧА ФОРСУНКИ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1 Математична модель об'єкта моделювання

Математичну модель зазначай представляють схемою (рисунок 2.1)

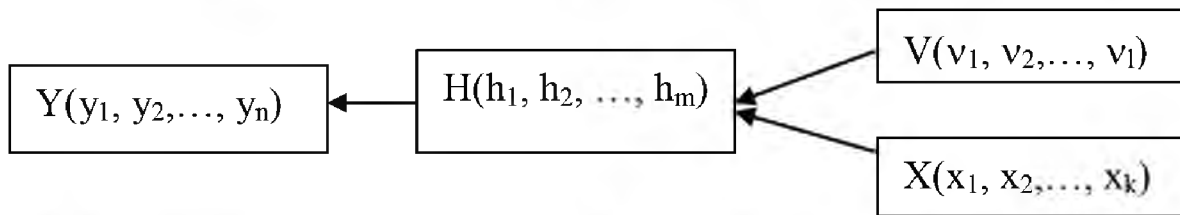


Рис. 2.1 Схема математичної моделі

Прямокутником позначений об'єкт (процес) моделювання, $X(x_1, x_2, \dots, x_k)$

- безліч зовнішніх впливів на об'єкт, що моделюється, $V(v_1, v_2, \dots, v_1)$ - безліч впливів зовнішнього середовища, $H(h_1, h_2, \dots, h_m)$ - безліч внутрішніх станів об'єкта, $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ - безліч вихідних параметрів об'єкта, що моделюється

Безліч зовнішніх впливів $X(x_1, x_2, \dots, x_k)$ містить керовані параметри. У загальному випадку всі множини X, Y, V, H можуть містити як детерміновані, і стохастичні змінні. Розглядають ці множини як деякі формальні вектори $Y = F(\bar{X}, \bar{V}, \bar{H}, \bar{Y}, t)$ параметр t - час. Параметр F - деякий оператор, визначення структури якого є метою моделювання.

Рівність

$Y = F(\bar{X}, \bar{V}, \bar{H}, \bar{Y}, t)$ - формальна математична модель (динамічна модель).

Якщо рівності відсутня t , то модель називається статичною. Структура оператора F може бути аналітичною, чисельною чи статистичною. Тому математичні моделі поділяють на аналітичні, чисельні та статистичні моделі

2.2 Схема створення математичної моделі

Математична модель створюється на основі змістовної моделі, яка відображає суттєві властивості об'єкта або процесу, що моделюється, і містить опис вхідних параметрів (керованих або стохастичних), внутрішніх параметрів і

вихідних параметрів). Створення математичної моделі відбувається шляхом формалізації змістовної моделі як рівнянь, систем рівнянь різних видів, нерівностей чи відносин [40, 48, 63]. Робота із створеною моделлю містить:

1) якісний аналіз моделі з метою розробки методів вирішення або можливих спрощень, а також тестування для окремих випадків з використанням точних рішень;

2) обґрунтування вибору конкретного алгоритму отримання кількісних результатів, зокрема обов'язково оцінку точності обчислювального методу. Реалізація вибраних чисельних методів потребує використання комп'ютерних програм, таких як MathCAD, Mathematica. Наявність конкретних комп'ютерних програм уможливує проведення обчислювального експерименту, метою якого є перевірка адекватності даної моделі та отримання додаткової інформації [2, 25, 32, 33, 65].

2.3 Типові математичні схеми моделювання

До типових математичних схем моделювання відносяться: безперервно-детерміновані D-схеми. Ці схеми застосовуються для опису різних моделей теорії управління. Математичною моделлю є завдання Коші для звичайного диференціального рівняння або системи звичайних диференціальних рівнянь, а також рівнянь у приватних похідних із різними початковими та крайовими умовами. У моделях оптимального керування та деяких інших моделях оптимізації рішення знаходяться при обмеженнях на функції, що мають лінійний, нелінійний чи диференціальний характер;

1) дискретно-детерміновані E-схеми (кінцеві автомати). З допомогою цих схем описуються моделі механізмів контролю та управління, мають дискретний характер роботи у часі. Математична модель складається із завдання початкового стану автомата і з рівнянь, що задають значення вихідних параметрів в даний час залежно від значень вхідних параметрів і внутрішніх станів в даний або попередній моменти. Замість рівнянь можна

використовувати таблиці чи графіки.

2) стохастичні моделі. У стохастичних моделях всі або частина змінних множин X, Y, H є випадковими величинами. Моделі регресійного типу, що мають велике значення при статистичному аналізі спостережень та безперервно-стохастичні моделі (Q-схеми), що застосовуються для опису систем масового обслуговування [2, 60, 40, 48, 63].

2.4 Регресійні моделі

Регресійні моделі застосовуються при статистичному аналізі результатів експерименту. Зазвичай такого типу досліди проводяться при одній або кількох безперервних керованих змінних x_1, x_2, \dots, x_n (вхідні сигнали) і вимірної випадкової величини y (вихідний сигнал). Регресійні моделі пропонують функціональні залежності $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, які виводяться з певних принципів оптимальності та використовуються для прогнозування значень y при тих значеннях x_1, x_2, \dots, x_n , які важко задати або за яких виміри y важко здійсненні або взагалі неможливі. Регресійні моделі узагальнюють і випадки, коли вхідні змінні також є випадковими змінними [2, 40, 48, 63].

2.5 Регресійний аналіз похибки вимірювання продуктивності форсунок залежно від пробігу автомобіля

У сучасних поршневих двигунах з розподіленим упорскуванням палива електромагнітні форсунки є основним типом систем подачі та розпилювання палива. До струменевого форсунок паливо також подається під деяким тиском. Внутрішній пристрій струминних форсунок є послідовною системою каналів, колекторів, простору навколо клапанів, пружин і т.п. На останній ділянці течії через форсунку паливо з великою швидкістю протікає через сопло малого діаметра і після вильоту з форсунки струмінь на деякій відстані від зрізу сопла розпадається на безліч дрібних крапель, створюючи вузький факел розпиленого палива (факел розпилу) з малим кутом розбіжності [55, 69].

Основним параметром режиму роботи електромагнітних форсунок є

перепад тиску палива Δp^* на форсунці:

$$\Delta p_{T,0}^* = p_{T,0}^* - p_K^*, \quad (2.1)$$

де: $p_{T,0}^*$, p_K^* - абсолютні повні значення тиску палива перед Т.ОК форсункою та в камері згорання, Н/м².

Якість роботи форсунок оцінюється за групою видаткових, геометричних та дисперсних характеристик форсунки та факела розпилу.

Витратні характеристики форсунки - це залежність загальної витрати палива - масового, кг/с або об'ємного, м³/с від величини перепаду тиску палива Δp^* у форсунці.

Геометричні характеристики факела розпилу - це залежність форми струменя або факела від перепаду тиску палива Δp^* . Як правило, їх форма описується одним або двома параметрами - кутом розкриття γ факела, град. і далекобійністю струменя L , м.

Витратно-геометричні характеристики струменів або смислосків розпилу - це залежність деякого параметра, що визначають закон розподілу маси розпиленого палива в просторі або нерівномірність його розподілу по масі, наприклад, місцевої витрати палива $\Delta GT(x, y)$ через малий майданчик ΔS або щільності зрошення $\sigma = \Delta GT / x$, Δ режимних параметрів роботи форсунки.

Дисперсні характеристики - це залежність величини середнього діаметра крапель (ЦДК, в мікрометрах) від перепаду тиску палива Δp^* у форсунці.

Використовують різні за змістом ЦДК - середній арифметичний, середній по масі всіх крапель, середній по бічній поверхні випаровування та інші. Для характеристики неоднорідності крапель за розмірами використовують форму спектру або функції розподілу крапель по діаметрах $f(d_k)$ [69, 55].

Теоретичний опис руху рідини через струменеві форсунки базується на двох рівняннях:

а) Рівняння витрати пального (GT , г, кг/с):

$$G_{T,t} = \rho_T \cdot w_t \cdot F_c, \quad (2.2)$$

де: ρ_T - щільність палива, кг/м³;

w_t - теоретична швидкість витікання палива із сопла форсунки, м/с (це швидкість у площині вихідного перерізу сопла);

$$F_c = \pi \cdot r_c^2;$$

F_c - площа вихідного поперечного перерізу каналу сопла, м². Якщо сопло з поперечним перерізом у формі кола радіусом r_c , то

б) Рівняння Бернуллі для ідеальної стисливої рідини:

$$p_{T,0}^* = p_{T,0} + \rho \cdot \frac{w_t^2}{2g} \quad (2.3)$$

де: $p_{T,0}$ - тиск палива у потоці рідини перед форсункою, Н/м²;

З рівняння (2.3) у припущенні рівності тиску в потоці на зрізі сопла $p_{T,0}$

тиску газу в камері згоряння отримаємо теоретичну швидкість витікання палива

$$w_t = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T,0}^*}{\rho_T}}, \quad (2.4)$$

Після підстановки цього виразу для w_t - у формулу для витрати пального (2.2) отримаємо:

$$G_{T,t} = F_c \cdot \rho_T \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T,0}^*}{\rho_T}} = (\pi \cdot r_c^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_T \cdot \Delta p_{T,0}^*}, \quad (2.5)$$

Насправді, через наявність при перебігу реальної рідини через форсунку різних завихрень, прикордонних шарів, в'язкого гідралічного і поверхневого тертя, що створюють гідралічні опори і через що дійсна швидкість витікання $w < w_t$, фактична витрата палива

$$G_T = \mu \cdot G_{T,t} = \mu \cdot (\pi \cdot r_c^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_T \cdot \Delta p_{T,0}^*}, \quad (2.6)$$

де: μ - коефіцієнт витрати палива форсунки, за допомогою якого враховують усі перераховані вище гідралічні втрати, $\mu < 1$.

Величина μ як правило, не розраховується, а визначається експериментально, за так званих «проливко» форсунок.

Однак, у рівнянні витрати пального через форсунку (2.6), відсутній коефіцієнт, який враховував витрати палива при забрудненні соплових отворів в залежності від пробігу.

Нами запропоновано враховувати зміну середнього відхилення значень витрати пального залежно від забруднень соплових отворів та пробігу.

У ході експериментальних досліджень було отримано характерні точки середнього відхилення значень витрати палива (q_{cp}) залежно від пробігу до та після очищення ультразвуком (рисунок 1). Зі збільшенням пробігу (напрацювання) при забрудненні соплових отворів ЕМФ, зростає відхилення витрати палива до 25,2% у всьому інтервалі зміни пробігу. Що підтверджує необхідність ультразвукового очищення ЕМФ.

Аналіз поданих у таблиці 2.1. даних проведено з використанням табличного процесора Microsoft Office Excel та Statistika 10 [27].

Таблиця 2.1

Середнє відхилення значень витрати пального (Δq_{cp}) залежно від пробігу $L(x_i)$

Параметр	$L(x_i)$, км					
	20 000	40 000	60 000	80 000	100 000	120 000
Δq_{cp} , (уі), мл·хв ⁻¹ (ДО ОЧИЩЕННЯ УЗ)	1.2	1.3	1.6	2.0	2.3	3.5
Δq_{cp} , мл·хв ⁻¹ (ПІСЛЯ ОЧИЩЕННЯ УЗ)	1.1	1.2	1.4	1.7	1.8	2.0

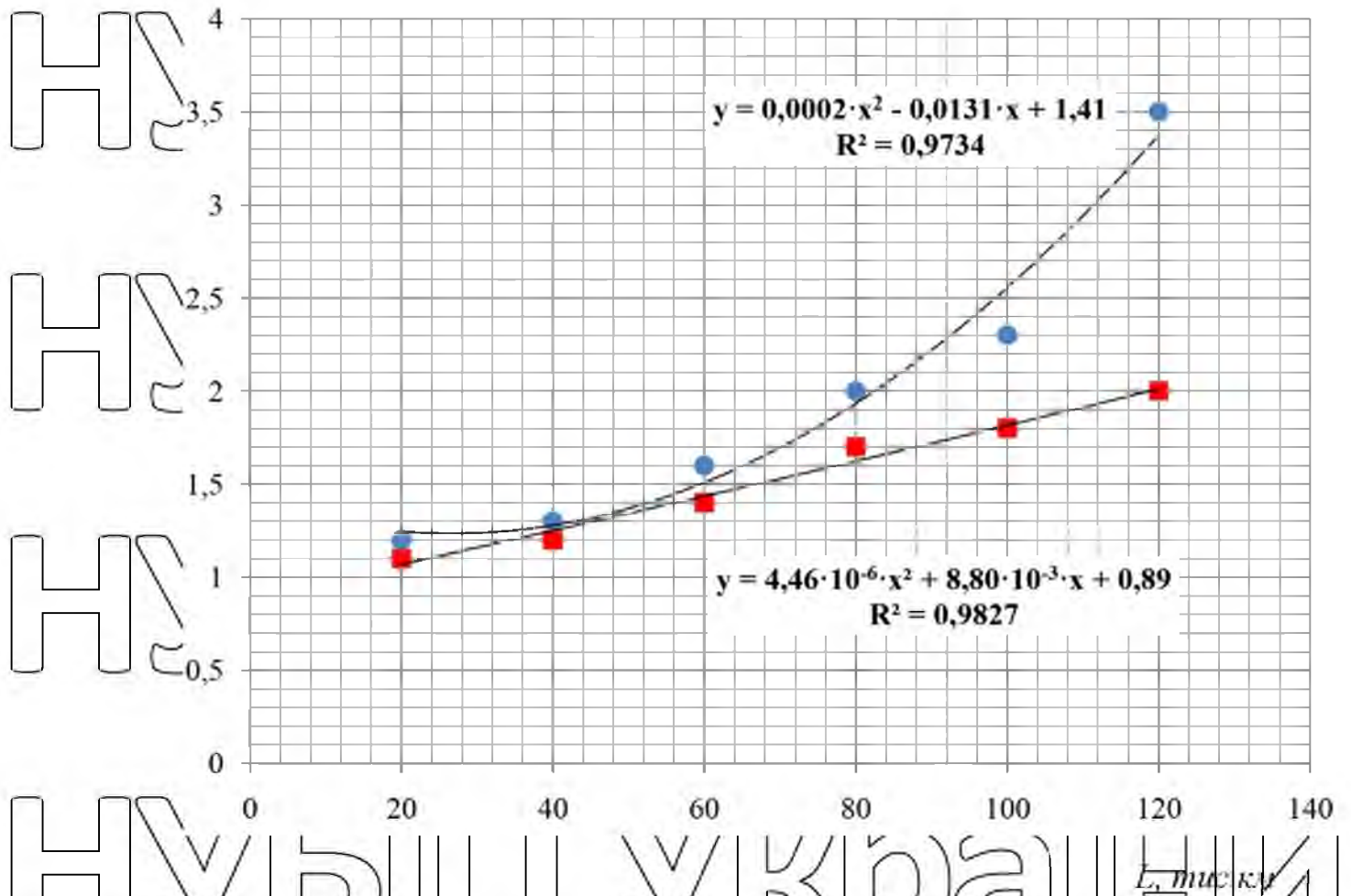


Рис. 2.2 Середнє відхилення значень витрати пального (Δq_{cp}) залежно від пробігу (L): - до очищення ультразвуком; - після очищення ультразвуком

За результатами обробки статистичних даних проведено апроксимацію отриманих значень до очищення ультразвуком з метою визначення характеру залежностей (рисунки 2.3 - 2.6).

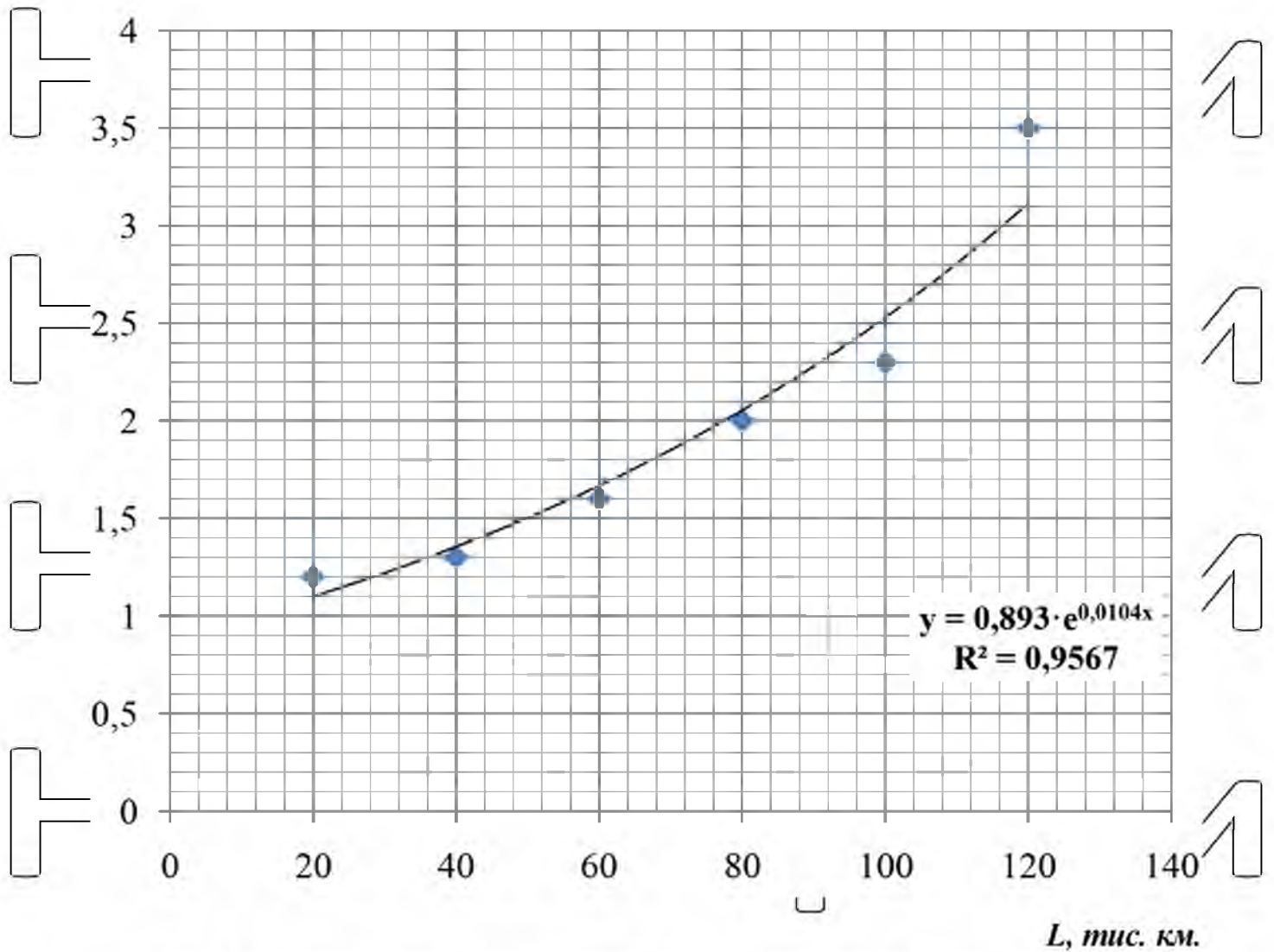


Рис. 2.4. Експонентна апроксимація даних середнього відхилення значень витрати пального ($\Delta_{\text{ср}}$) залежно від пробігу (L)

Зі зіставлення значень коефіцієнтів детермінації (таблиця 2.2) слід, що найбільше значення параметра R^2 , спостерігається рівняння регресії, отриманого апроксимацією даних поліномом другого ступеня. Отже, це квадратичне рівняння найповніше відображає зміну $\Delta_{\text{ср}}$ від пробігу автомобіля (L). Регресія як квадратичного рівняння, нелінійна щодо пояснюючих змінних і лінійна щодо параметрів моделі. Тому оцінки методу найменших квадратів перетвореної лінійної моделі, отримані за допомогою функції «Регресія» табличного процесора Microsoft Office Excel є оцінками параметрів нелінійної моделі.

Таблиця 2.2

Рівняння отриманих побудованої лінії тренду регресії та коефіцієнти детермінації (R²)

№ п/п	Рівняння	R ²
1	Лінійна апроксимація $y = 0,0213 \cdot x + 0,4933$	0,8741
	$y = 2 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0,4933$	0,8741
2	Експонентна апроксимація $y = 0,893 \cdot e^{0,0104 \cdot x}$	0,9567
	$y = 0,893 \cdot e^{1 \cdot 10^{(-5)} \cdot x}$	0,9567
3	Поліноміальна апроксимація $y = 0,0002 \cdot x^2 - 0,0131 \cdot x + 1,41$	0,9734
	$y = 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1,41$	0,9734
4	Ступенева апроксимація $y = 0,1998 \cdot x^{0,5439}$	0,8192
	$y = 0,0047 \cdot x^{0,5439}$	0,8192

Для оцінки можливості практичного використання поліноміального рівняння необхідно перевірити його адекватність за допомогою критерію Фішера, і навіть оцінити точність математичної моделі. Критерієм статистичної значущості (адекватності) рівнянь регресії є умова, за якої $F_{розр} > F_{крит}$.

2.6 Висновки з другого розділу

1. Аналітично обґрунтовано залежність витрати палива від пробігу при забрудненні соплових отворів ЕМФ, що характеризує технічний стан сучасних двигунів внутрішнього згорання.

2. Зі збільшенням напрацювання при забрудненні соплових отворів ЕМФ збільшується відхилення витрати палива до 25,2%. Отримано поліноміальне рівняння середнього значення витрат палива (2.9) від пробігу.

Отримано рівняння, що описує витрати пального через форсунку при врахуванні зміни середнього відхилення значень витрати палива з урахуванням забруднень соплових отворів та пробігу.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Завдання дослідження

Для оцінки впливу ультразвукового очищення ЕМФ на покращення енергетичних та екологічних показників двигунів у процесі експлуатації було проведено низку експериментів на метрологічно довіреному обладнанні. Вимірювання здійснювалися до та після ультразвукового очищення ЕМФ:

- для оцінки вилучення поверхневих забруднень з елементів форсунки використовували прилад Reanimator Injector Reanimator v 2.0 (Реаніматор форсунок);

- для оцінки технічного стану ЕМФ використовували установку HP-6B фірми AE&T;

- для очищення паливних форсунок використовували ультразвукову ванну "Ultrasonic Cleaner" фірми AE&T;

- для підтвердження факту зношування елементів форсунки та їх забруднення був проведений аналіз фотографій розпилювачів форсунок, отриманих за допомогою цифрового мікроскопа Levenhuk DTX 90;

- порівняльні випробування енергетичних характеристик двигуна ЗМЗ-4062.10 автомобіля Газель 27040V з комплектом форсунок до та після ультразвукового очищення, проводилися на роликовому потужнісному стенді CARTEC LPS 2510 для однієї провідної осі;

- з метою оцінки екологічних показників використовувався газаналізатор Інфракар М2Т.

Об'єктами дослідження були ЕМФ бензинових двигунів із розподіленим упорскуванням палива SIMENS DEKA ZMZ 6354. Форсунки експлуатувалися у силових агрегатах автомобілів ГАЗ-27040 V (Газель). Випробування проводили на 150 комплектах форсунок (у кожному комплекті 4 форсунки), знятих із двигунів автомобілів з пробігом від 0 до 170 тис. км.

2.2. Методика оцінки очищення поверхневих забруднень з елементів форсунок

Відомо [68, 70, 85, 108], що зміни робочих параметрів форсунок впливають на якість розпилу палива і, в кінцевому рахунку – на енергетичні та екологічні показники двигуна, його пускові якості та динаміку транспортного засобу.

Для оцінки очищення поверхневих забруднень із внутрішніх та зовнішніх елементів форсунок було розроблено лабораторну установку з використанням приладу Reanimator Injector v 2.0 (Реаніматор форсунок) (Рис. 3.1).



Рис. 3.1 Прилад Reanimator Injector v 2.0 (Реаніматор форсунок)

Реаніматор форсунок дозволяє перевірити продуктивність форсунок у режимі «Перевірка», а в режимі «Очищення» витягти забруднення в рідину, що знаходиться в контакті з форсункою. Технічні характеристики приладу представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Технічні характеристики приладу Reanimator Injector $\sqrt{20}$

Кількість імпульсів відкриття форсунок	10 - 2550
Час відкриття форсунок	1,5 - 9,9 мс
Тимчасовий інтервал між імпульсами	10 - 100 мс

У режимі "Перевірка" на форсунки подаються однакові керуючі імпульси (обмотки всіх форсунок підключені паралельно). У режимі очищення програмне забезпечення автоматично визначає резонансну частоту голки форсунки. У цьому режимі роботи після "захоплення" проводиться девіація цієї частоти в невеликому діапазоні. У такому режимі форсунка, опущена в розчин, що чистить, починає прокачувати рідину, що чистить, у зворотному напрямку. Це сприяє інтенсивній взаємодії хімічного очисника із забрудненнями всередині форсунки.

Оскільки конструкція сучасної електромагнітної форсунки є безрозбірною, то для доступу до її проточної частини та дослідження на предмет забруднень потрібно використовувати ріжучий інструмент, що зрештою призведе до непридатності форсунки. Тому була розроблена лабораторна установка, яка дозволяє оцінити рівень переходу в рідку фазу смолистих, лакових і нагарних відкладень не застосовуючи при цьому жодного ріжучого інструменту.

Заводи-виробники ДВЗ в інструкціях з експлуатації не репламентують необхідність контролю продуктивності форсунок через певні значення їх пробігу (напрацювання), оскільки на всіх АТЗ передбачені паливні фільтри, які, за задумом виробника, повинні захищати соплові отвори від забруднень. Однак фільтри, як свідчить практика, не дають повного захисту від забруднення проточної частини форсунок. Тому для перевірки присутності в соплових отворах забруднень проточної частини форсунок було проведено стендові випробування ЕМФ на установці АЕ&Т «НР-6В».

Оцінювався технічний стан паливних форсунок SIEMENS DEKA ZMZ 6354, що мають напрацювання 80...100 тис. км пробігу. При цьому частота

спрацьовування форсунок (імпульсів, що подаються на обмотку) тривалість подачі палива залежала тільки від імітованого режиму роботи двигуна, яких було три: на холостому ходу, максимальному навантаженні і високих швидкостях руху автомобіля. У першому випадку значення цих величин дорівнювали $v = 650 \text{ хв}^{-1}$, $\tau = 3 \text{ мс}$; у другому – $v = 2400 \text{ хв}^{-1}$, $\tau = 12 \text{ мс}$; у третьому – $v = 3600 \text{ хв}^{-1}$, $\tau = 6 \text{ мс}$ [53]. Кожна з форсунок випробовувалась двічі у вихідному стані та після очищення від забруднень. При такій організації випробувань очищення включало два етапи: промивання в розчині, що складається з води, етанолу і поверхнево активних речовин, і власне очищення за допомогою подачі ультразвукових імпульсів.

Процес промивань був гранично простим: форсунки поміщали в хімічну склянку, заповнену 20 мл розчину для промивання так, щоб при перемішуванні магнітною мішалкою омивалася тільки нижня частина пристрою (Рис. 3.2).



Рис. 3.2 Загальна схема лабораторної установки

Потім включався реаніматор форсунок, який подавав на форсунку робочі імпульси. Причому це робилося двічі: спочатку протягом 30 с, потім ще протягом 1 хв. Після кожного такого впливу форсунку залишали не

виключаючи перемішування на 10 хв. у хімічній склянці і далі вимірювали водневий показник рН та електропровідність σ рідкої фази (Рис. 3.3). Як виявилось, рН (7.5 ± 0.1) рідкої фази у процесі промивання форсунок не змінюється, а електропровідність зростає. Однак такий зростання σ пов'язаний не з процесом промивання, а з випаровуванням одного з компонентів розчину, що супроводжує його, через великі перерви між промиваннями чергових форсунок. Так що цей недолік легко усунути.



Рис. 3.3 Вимірювання водневого показника рН (а) та електропровідності σ рідкої фази (б)

Зі порівняння даних таблиці 3.2 слід, що продуктивність форсунок після їх ультразвукової обробки найчастіше перевищує продуктивність до них ультразвука. Це свідчить необхідність проведення такої процедури обслуговування паливних форсунок [83].

Таблиця 3.2

Продуктивність форсунок (Ф) SIEMENS DEKA ZMZ-6354 при різних режимах випробування

Стан форсунки	Продуктивність форсунок, см ³ хв ⁻¹							
	на режимі №2				на режимі №3			
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4
До очищення	100.0	102.0	106.0	106.0	63.9	66.7	69.4	69.4
Після УЗ-очищення	106.0	106.0	106.0	106.0	66.7	68.1	69.4	69.4

Таким чином, експерименти показали: проведення контролю продуктивності форсунок після певних напрацювань – не тільки бажано, але і необхідно. Крім того, для покращення енергетичних та екологічних показників двигунів, процесу пуску, а також збереження динамічних характеристик транспортних засобів контроль та очищення форсунок від забруднень потрібно поєднувати з ультразвуковим очищенням. Ультразвукове очищення сприяє найбільш повному рятуванню форсунок від забруднень.

Отже, контролювати робочі параметри форсунок доцільно після виконання двох операцій: промивання та очищення їх ультразвуком. Слід зазначити, що різниця значень продуктивності форсунок дуже низька, всього $\pm 0,4 \dots 1\%$.

2.3 Методика оцінки технічного стану форсунок

Технічний стан пристрою упрскування палива оцінювалося з використанням установки АЕ&Т НР-6В (рис. 3.4) [96]. Дана установка дозволяє перевіряти технічний стан форсунок, якість розпилю з імітацією різних режимів

роботи двигуна та герметичність форсунок. Технічні характеристики установки представлені у таблиці 3.3.



Рис. 3.4. Установка АЕ&Т «HP-6B» для оцінки технічного стану паливних форсунок

Таблиця 3.3

Технічні характеристики установки «HP-6B»

1. Розмір установки	56*56*75 см
2. Маса нетто/маса брутто:	42/56 кг
3. Потужність:	220 У перем. струму 50Гц 200 Вт
4. Діапазон тиску:	0-90 фунтів на кв. дюйм (6.4 кг/см ²)
5. Робоча температура:	-20°C-38°C
6. Кількість форсунок:	2-6 (Не менше 2 форсунок за раз)
7. Імпульси форсунки (кількість):	0-9950 імпульсів із кроком 50 імпульсів.
8. Робоча частота форсунки (об/хв):	0-9950 об/хв з кроком 50 об/хв
9. Ширина імпульсів форсунки (ІМВ):	0-20 мс із збільшенням 0.1 мс

У процесі лабораторних досліджень оцінювалися наступні кількісні робочі показники форсунок до та після ультразвукового очищення.

Герметичність форсунок перевіряли під тиском палива. У непрацюючій форсунки, що знаходиться під тиском, не повинно утворюватися на носіку розпилювача і відриватися з неї більше однієї краплі протягом однієї хвилини.

Статична та динамічна продуктивність форсунок визначалася в автоматичному та ручному режимах налаштування частоти (ν), ширини (τ) та числа імпульсів (N_t).

Режим 1 – «Атомізація» (форсунки знаходяться у постійно відкритому стані). На даному режимі перевіряється продуктивність форсунок при їх відкритті на заданий час за кількістю рідини в кожній мірній ємності. Перевіряється форма розпилювача палива.

Режим 2 – «Холостий хід». Даний режим імітує процес роботи форсунок, що тестуються на режимі холостого ходу: $\nu=650$ хв⁻¹ («мінімум»), $\tau=3$ мс, $N_t=2000$ імпульсів;

Режим 3 – «Максимальне навантаження». Цей режим імітує процес роботи тестованих форсунок на режимі руху з підвищеним навантаженням на ДВЗ: $\nu=2400$ хв⁻¹, $\tau=12$ мс, $N_t=1000$ імпульсів;

Режим 4 – «Робота при високих швидкостях». Даний режим імітує процес роботи форсунок, що тестуються, на режимі руху на підвищеній швидкості: $\nu=3600$ хв⁻¹, $\tau=6$ мс, $N_t=2000$ імпульсів.

Витрата q_i тестової рідини при випробуванні форсунок розраховується за такою формулою:

$$q_i = \frac{Q_t}{t}, \quad (3.15)$$

де Q_t – обсяг палива за час вимірювання t , мл; t – час виміру, хв.

Середнє відхилення значень витрати пального ($\Delta q_{\text{ср}}$) визначалося як сума середніх значень похибок вимірювань кожного режиму, поділений на кількість режимів:

НУБІП України

$$\Delta q_{cp} = \frac{\sum \Delta q_i}{n}, \quad (3.2)$$

де $\sum \Delta q_i$ - сума похибок середньої арифметичної витрати тестової рідини всіх режимів, $\text{мл} \cdot \text{хв}^{-1}$; n - число режимів.

Як результат, у таблиці 3.4 наведені такі кількісні робочі показники форсунок до очищення, отримані на установці «HP-6B».

Таблиця 3.4

Кількісні робочі показники форсунок SIMENS DEKA ZMZ 6354 до очищення, отримані на установці «HP-6B»

Пробіг/40 тис. км. Siemens DEKA ZMZ 6354	Стат. Вироб. мл/хв	Динам. продуктивність у мл/хв		
		Режим 1 650 об/хв	Режим 2 2400 об/хв	Режим 3 3600 об/хв
Форсунка 1	126,8	13	91,7	83,3
Форсунка 2	125,6	12,7	90	81,9
Форсунка 3	125,6	13	90	84,7
Форсунка 4	126,8	13	91,7	84,7
Порівн. знач:	126,2	12,925	90,85	83,65
Стандартне відхилення:	0,69	0,15	0,98	1,34
Коеф. Стюдента (t):	3,182446305	3,182446305	3,182446305	3,182446305
Абсолютна похибка (довірчий інтервал):	1,10	0,24	1,56	2,13
Середнє відхилення значень витрати палива мл/хв				
1,26				

В результаті проведених досліджень встановлено, що витрата палива для форсунок, знятих з автомобілів з різним пробігом, не може бути узагальнюючим параметром, яким слід оцінювати технічний стан пристрою від пробігу. Це пов'язано з тим, що q відображає не тільки залежну від

напрацювання ступінь забруднення форсунок, але й різницю в пропускну здатності виробу (наприклад, при тестуванні форсунок інших автомобілів, що спочатку відрізняються продуктивністю). Тому доцільно для об'єктів випробування оцінку технічного стану проводити щодо зміни (відхилення від середньої величини) витрати пального.

Середнє відхилення значень витрати палива (Δq_{cp}) дуже важливо при оцінці працездатності комплексу форсунок, оскільки зі збільшенням пробігу автомобіля спостерігається зростання параметра Δq_{cp} і це є основною причиною нерівномірного надходження палива до різних циліндрів та відхилень у складах суміші по циліндрах.

У дисертації Овчиннікова Г.В. зазначено, що «система управління двигуном не здатна компенсувати зростаючу нерівномірність циклових подач в комплекті форсунок, оскільки вона вносить на основі сигналу λ -зонда деяку загальну, усереднену коригуючу поправку для всього комплексу форсунок. Тому, щоб контролер двигуна міг компенсувати зростаючу нерівномірність циклових подач в комплекті форсунок, в ідеалі необхідно було б використання індивідуальних зондів для кожного з циліндрів двигуна» [69, с.119]. Але через високу вартість таких датчиків цей спосіб не знаходить практичного застосування.

Дослідження на установці AE&T HP-6B проводили при тиску палива в магістралі 300 ± 5 кПа. У процесі проведення вимірювань тиск палива контролювався за допомогою вбудованого манометра.

Як тестуючу рідину використовували професійну рідину LAYR Ln 2004 (Рис. 3.5) для тестування бензинових форсунок на стендах. Ця рідина забезпечує точний контроль факела розпилу, продуктивність та герметичність форсунок при використанні її на стендах.

Рідина має еталонні параметри щільності та в'язкості, що відповідають ГОСТ Р 51866-2002 (ЄН 228-2004) «Паливо моторне. Бензин неестильований. Технічні умови (із Змінами N 1, 2, 3, 4)» [22].

Рідина підходить для тестування всіх типів форсунок: EURO, ASIA, USA,

в тому числі, в режимах з підвищеним тиском і високою частотою відкриття форсунок. Абсолютно безпечна для форсунок, гумових ущільнювачів та обладнання. Не токсична, не має вираженого запаху, важко спалахує. Не поєднується з очисниками, не випаровується і максимально довго зберігає функціональні властивості. До складу рідини входять аліфатичні вуглеводні, коректор в'язкості та барвник.



Рис. 3.5 Тестуюча рідина LAVR Ln 2004

2.4 Методика очищення форсунок в ультразвуковій ванні

Для очищення використовувалося наступне обладнання, прилади та матеріали:

- ультразвукова ванна "Ultrasonic Cleaner" (Рис. 3.6);

- установка АЕ&Т «НР-6В» для онірки технічного стану паливних форсунок;

- для видалення смолистих, лакових і нагарних відкладень

використовували професійну рідину LAVR Ln 2003, що очищає.



Рис. 3.6 Ультразвукова ванна «Ultrasonic Cleaner»

Ультразвуковий генератор ультразвукової ванни, що промиває, має функцію автопідстроювання частоти, функцію стабілізації вихідної потужності.

Ультразвукові коливання з частотою до 40 кГц сприяють проникненню миючого розчину через сопло форсунки, а кавітаційні процеси, що при цьому виникають, забезпечують очищення форсунки. Ультразвуковий генератор викликає коливання в миючому розчині і при цьому навколо поверхень, що сполучаються всередині паливної форсунки, виникають зони вакууму. Цей вакуум призводить до виникнення бульбашок пари. При руйнуванні цих бульбашок миючий розчин спрямовується в ці зони і вдаряючись про поверхню, що сполучаються, очищає їх.

Для формування електричних імпульсів, призначених для періодичного відкриття паливних форсунок при виконанні очищення, використовували установку НР-6В для оцінки технічного стану паливних форсунок.

Порядок проведення лабораторних експериментів наведено нижче.

Дія 1. Встановили робочі форсунки на підставку в УЗВ (підставка входить у комплект із ванною).

Дія 2. Перевірили рівень рідини для очищення деталей – сопло робочих форсунок має бути повністю занурене в очищувальну рідину. Якщо рідини мало, тоді її слід долити.

Дія 3. Підключили живлення до всіх форсунок через гніздо для живлення.

Дія 4. Запустили ультразвуковий випромінювач рахунок перемикач тумблера активації ванни в позицію «включено». Тумблер розташований на задній поверхні корпусу ультразвукової ванни.

Дія 5. Вибрали час для очищення за допомогою повороту спеціального тумблера, розташованого на стінці корпусу ультразвукової ванни. Час очищення становить 15 хвилин.

Дія 6. Активували кнопку "Імпульс" з метою передачі керуючого імпульсу на встановлені форсунки. У разі потреби є можливість змінити характеристики керуючого імпульсу.

Дія 7. Активували кнопку "Старт" в області панелі керування ультразвуковою ванною. Таким чином, буде задіяний зворотний тимчасовий відлік.

Дія 8. Дочекатися, коли значення таймера досягне нуля. Отже, процес очищення вважається закінченим. У разі потреби процес очищення можна перервати у будь-який момент часу за допомогою кнопки "Стоп" (вона розташована на корпусі ультразвукової ванни) або за допомогою повороту тумблера активації ванни в позицію "вимкнено".

Дія 9. Вийняти форсунки, а потім протерти дані пристрою м'якою ганчіркою з метою усунення залишків рідини для повного очищення деталей. Далі слід провести продування за допомогою компресора. Як очищувальну рідину використовували професійну рідину LAVR Ln 2003 (Рис. 3.7) для видалення смолистих, лакових та нагарних відкладень. Рідина має еталонні параметри щільності та в'язкості, що відповідають ГОСТ Р 51866-2002 (ЄН 228-2004) «Паливо моторне. Бензин нестильований. Технічні умови (із Змінами N 1, 2, 3, 4)» [22]



Рис. 3.7 Рідина для очищення форсунок LAVOR L-2003

Підходить для очищення всіх типів форсунок: EURO, ASIA, USA.

Абсолютна безпечна для форсунок. Чи не токсична, не має вираженого запаху, не запалюється. Запобігає виникненню корозії. До складу рідини входять: суміш неіоногенних та катіонних поверхнево-активних речовин (ПАВ)

< 5%, тринатрій нітрilotріацетат < 5%, компоненти хелату < 5%, ефіри гліколей 5-15%, регулятор рН < 5%, дистильована вода.

2.5 Методика дослідження елементів проточної частини форсунок за допомогою цифрового мікроскопа та оцінка якості очищення

Для підтвердження факту зношування та присутності забруднень соплових отворів форсунок були проаналізовані фотографії розпилювачів, використовувався цифровий мікроскоп Levenhuk DTX 90 [10, 20, 31].

Форсунки експлуатувалися у силових агрегатах автомобілів ГАЗ-27040 W (Газель "Фермер"). Дослідження проводили на комплекті форсунок (знятик з двигунів автомобілів з пробігом 40 тис. км), до та після очищення ультразвуком, а також на комплекті нових форсунок.

Цифровий мікроскоп Levenhuk DTX 90 – це сучасний професійний USB-мікроскоп для надточних робіт, оснащений 5-мегапіксельною камерою. Прилад дає 10-300-кратне збільшення. Комплектується спеціальним штативом,

осовою з вимірною шкалою та двома затискачами для закріплення зразка (форсунок).

Мікроскоп дозволяє стримувати знімки високої якості та роздільної здатності. Підключається до комп'ютера або ноутбука через порт USB 2.0.

Обробка зображення проводиться за допомогою програми захоплення зображення, що входить до стандартної комплектації.

Параметри мікроскопа Levenhuk DTX 90 наведено у таблиці 3.5, і зовнішній вигляд представлений рис. 3.8.

Таблиця 3.5

Технічні характеристики цифрового мікроскопа Levenhuk DTX 90

Тип мікроскопа:	цифровий
Тип насадки:	цифровий дисплей/монітор ПК
Матеріал оптики:	оптичне скло
Збільшення, крат:	10-300
Фокусування:	ручна, в межах від 0 мм до 150 мм
Підсвічування:	світлодіодна
Регулювання яскравості:	є
Джерело живлення:	5 У постійного струму через кабель USB 2.0
Число мегапікселів:	5
Можливість запису відео:	є

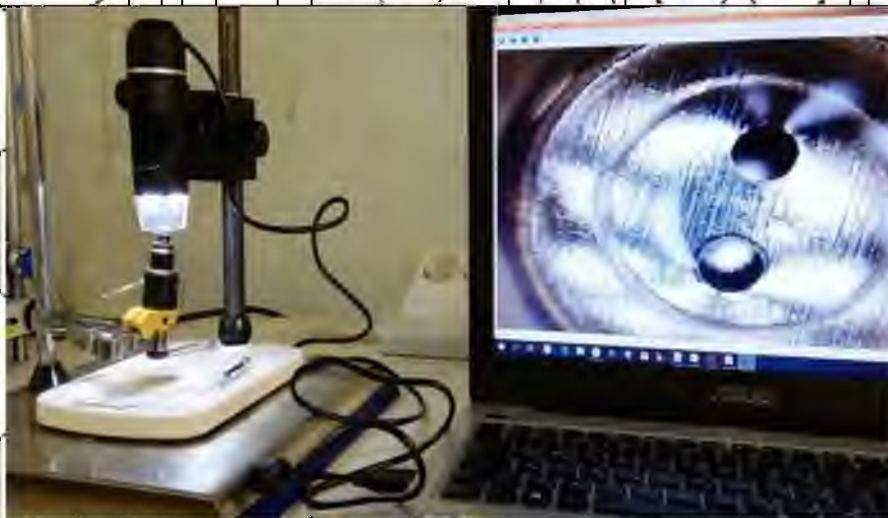


Рис. 3.8 Зовнішній вигляд цифрового мікроскопа Levenhuk DTX 90

За допомогою мікроскопа була отримана серія фотографій соплових отворів, найбільш характерні з яких представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Фотографії соплових отворів нових форсунок та форсунок з напрацюванням 40 тис. км. до та після впливу ультразвуку

Фотографії соплових отворів нових форсунок



Фото соплових отворів форсунок із пробігом 40 тис. км. до очищення в УЗВ

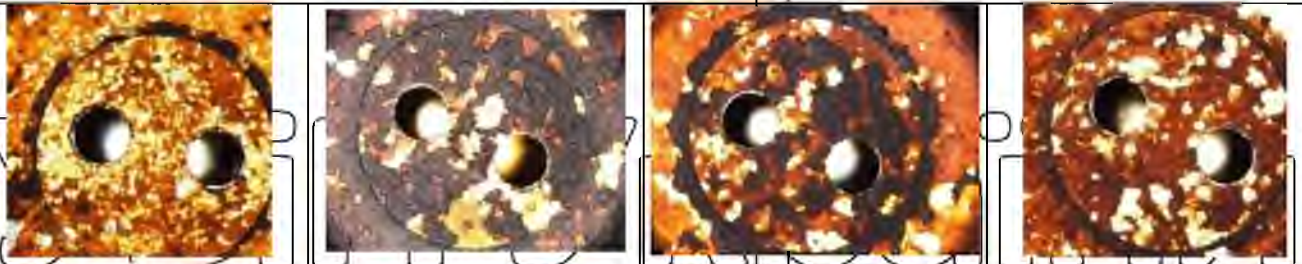


Фото соплових отворів нових форсунок із пробігом 40 тис. км. після них очищення в УЗВ протягом 10 хвилин

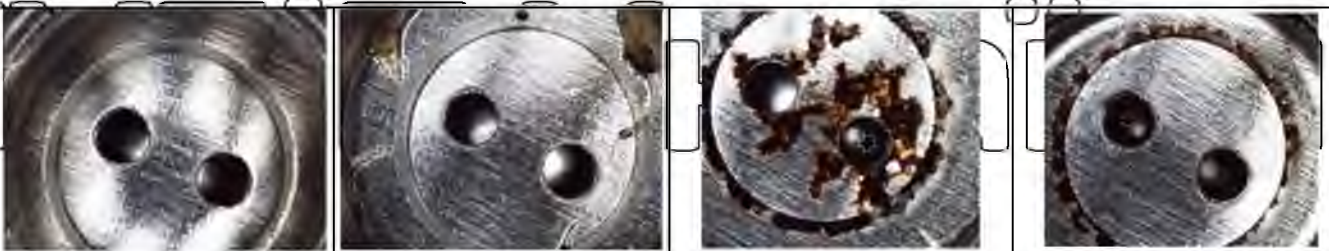


Фото соплових отворів нових форсунок із пробігом 40 тис. км. Після них очищення в УЗВ протягом 15 хвилин



Фото соплових отворів нових форсунок із пробігом 40 тис. км після них очищення в УЗВ протягом 20 хвилин



Аналіз фотографій показав, що для форсунок з напрацюванням до впливу на них ультразвуку є забруднення. Встановлено, що розмір соплових отворів після ультразвукової обробки більший за діаметр соплових отворів нових форсунок. Це з протікаючим у процесі тривалої експлуатації форсунок кавітаційним зношуванням соплових отворів. Наслідком такого впливу є зношування, виражене у зміні форми і кута вихідний фаски соплових отворів, а й у зміні форми конуса розпилювання. Все це, як показали подальші випробування, знайшло відображення в результатах, отриманих на потужнісному стенді і даних аналізу шкідливих і токсичних компонентів у відпрацьованих газах.

Слід зазначити, що знос спостерігається у місці сполучення голки та сідла у проточній частині форсунки. Зношується як контактна поверхня самої голки, і поверхня сідла.

В результаті наших досліджень було встановлено, що зношування присутнє не тільки в місці сполучення голки та сідла в проточній частині форсунки. При цьому варто відзначити, що зношується як контактна поверхня голки, так і поверхня сідла.

Крім запропонованої 10-бальної системи оцінки чистоти металевих поверхонь деталей сільськогосподарської техніки існує і 5-бальна шкала. За бал приймається певна кількість залишкових забруднень. У цій п'ятибальній шкалі 1 бал відповідає найбільш забрудненій поверхні, на якій повинен бути

підлий наліт чорного кольору, чиста поверхня без нальоту сіро-жовто-сірий колір (колір металу) оцінюється 5 балами.

За результатами проведених експериментів проведено оцінку впливу ультразвукового очищення на якість очищення розпилувачів форсунок. Якість очищення, що максимально досягається, склала 4,92 бала. При цьому загальноприйнята якість очищення понад 4,5 бали вважається задовільним результатом.

З таблиці 3.6 видно, що стабілізація (припинення зростання) якості очищення настає після 15 хвилин процесу впливу ультразвуку в миючій рідині.

Виходячи з умови мінімізації витрат, раціональним поєднанням факторів (режимом очищення) слід вважати тривалість очищення – 15 хвилин.

Технічні характеристики двигуна 3M3-4062.10

Кількість та розташування циліндрів	4 вертикально в ряд
Робочий об'єм, л	0,28
Матеріал блоку/головки циліндрів	Сірий чавун/алюмінієвий сплав
Діаметр циліндрів, мм	92
Хід поршня, мм	86
Кількість клапанів на циліндр	4
Номінальна потужність бруто при 5200 хв-1, кВт (к.с.)	107 (145)
Максимальний момент, що крутить, бруто при 4000 хв-1, Н·м	201
Ступінь стиснення	9,3
Екологічний клас	Євро-2

Таблиця 3.8

Технічні характеристики двигуна ЗМЗ-4062.10

Кількість та розташування циліндрів	4 вертикально в ряд
Робочий об'єм, л	2,28
Матеріал блоку/головки циліндрів	Сірий чавун/алюмінієвий сплав
Діаметр циліндрів, мм	92
Хід поршня, мм	86
Кількість клапанів на циліндр	4
Номінальна потужність брутто при 5200 хв ⁻¹ , кВт (к.с.)	107 (145)
Максимальний момент що крутить, брутто при 4000 хв ⁻¹ , Н·м	201
Ступінь стиснення	9,3
Екологічний клас	Євро-2

2.5.1 Конструктивні особливості стелу та розміщення вимірювального обладнання

Потужний стел – це випробувальна платформа (Рис. 3.10), в яку інтегровані роликів агрегати, електродинамічний гальмо (Рис. 3.11), пневматичний підійомний пристрій та обмежувач бічного зміщення. Технічні характеристики стелу представлені у таблиці 3.9.

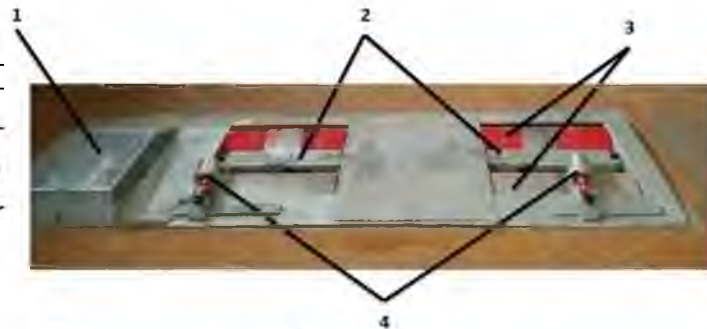


Рис. 3.10 Роликів потужнісний стел для вантажних автомобілів з однією провідною віссю LPS-2510

1 – електродинамічний гальмо; 2 – пневматичний підійомний пристрій; 3 –

роликові агрегати, 4 – обмежувачі бічного зміщення;



Рис. 3.11 Електродинамічний гальмо

До складу стенду входять: силова шафа, стійка керування з комплектом персонального комп'ютера (ПК), вентилятор для підлоги (Рис. 3.12)



Рис. 3.12 1 – силова шафа; 2 – стійка керування з комплектом ПК; 3 – підлоговий вентилятор.

У стійці управління встановлено блок управління, персональний комп'ютер (ПК) із програмним забезпеченням MS WINDOWS. До персонального комп'ютера підключено принтер. Управління усіма функціями стенду здійснюється за допомогою інфрачервоного (ІК) пульта дистанційного керування або з клавіатури ПК.

Таблиця 3.9

Технічні характеристики стенду CARTEC LPS 2510

Діапазон вимірювань лінійної швидкості, км/год	0 - 260
Межі відносної похибки вимірювань лінійної швидкості, %	±2
Діапазон вимірювань тягового зусилля, кН	0 - 15
Межі наведеної похибки вимірювань тягового зусилля, %	±2
Діапазон вимірювань ефективної потужності двигуна ТЗ, кВт	0 - 400
Межі відносної похибки вимірювань ефективної потужності, %	±3
Діаметр роликів, мм	320
Потужність, кВА	4
Напруга живлення, Частота, Гц	Від 187 до 242 50±1
Максимально допустиме осьове навантаження АМТС, т.	3,0
Маса стенду, кг	2200
Габаритні розміри, мм – довжина – ширина – висота	3310x1150x854
Живлення від мережі змінного струму	3x380(+10/-15%), із частотою 50Гц
Термін служби, років	10
Температура навколишнього повітря, °С	0-50
Відносна вологість, трохи більше, %	85

Для реєстрації оборотів коінчастого валу двигуна використовували цанговий затискач (рис. 3.13). Сигнал оборотів знімається з високовольтного (свічкового або центрального) дроту цанговим затискачем. Цанговий затискач розташовували якомога ближче до свічки і якнайдалі від інших високовольтних проводів. Цанговий затискач індуктивно перетворює високовольтний сигнал, що передається від розподільника на циліндри, електроімпульси.

Для визначення температури олії та контролю її під час проведення вимірювань використовувався температурний датчик. Датчик температури масла поміщався в гніздо масляного шупа, попередньо була відрегульована довжина зонда за допомогою пересувного конуса таким чином, щоб його

довжина дорівнювала довжині масляного щупа (рис. 3.14);



Рис. 3.13 Цанговий затискач

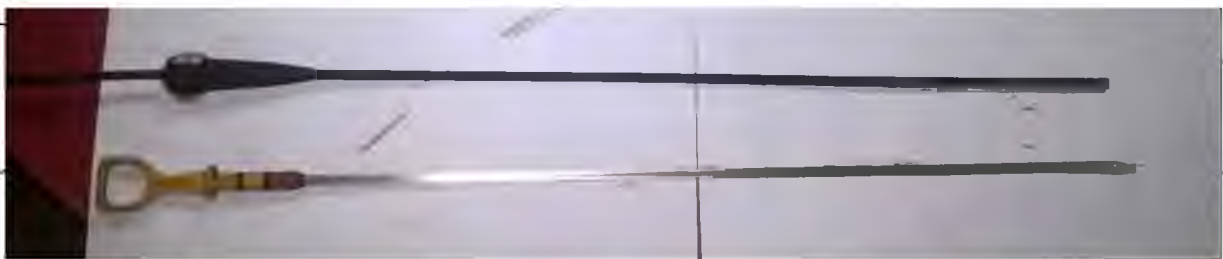


Рис. 3.14 Регулювання датчика температури по довжині оливного щупа

3.6. Виведення з третього розділу

У третьому розділі описані програми та методики експериментальних досліджень з експлуатаційних змін основних показників електромагнітних форсунок та їх впливу на енергетичні та екологічні характеристики автомобільного бензинового двигуна.

1. Проведено оцінку вилучення поверхневих забруднень з елементів форсунок за допомогою лабораторної установки (розробленої в перші) з використанням приладу Reanimator Injector Reanimator v 2.0 (Реаніматор форсунок). Вимірювали водневий показник pH та електропровідність σ рідкої фази.

2. Проведено оцінку технічного стану ЕМФ та їх очищення. Експериментально отримані дані щодо експлуатаційних змін основних показників електромагнітних форсунок свідчать про те, що зі збільшенням пробігу автомобіля їх робочі характеристики можуть суттєво змінюватися, причому як у бік збільшення, так і зменшення циклових подач палива. При цьому найбільш критичним для двигуна є не ідентичність циклових подач в

комплекти форсунок, яку не може компенсувати мікропроцесорна система управління двигуном.

3. Досліджено розпилювач форсунки для підтвердження факту зношування.

Аналіз знімків показав, що у форсунки з напрацюванням спостерігаються наслідки зносу соплових отворів, а саме змінюється форма та кут вихідної фаски соплового отвору внаслідок кавітаційного зношування. В результаті зміни форми та кута фаски соплового отвору змінюється форма конуса розпилювання.

4. Проведено порівняльні випробування енергетичних та екологічних характеристик з комплектом форсунок до та після ультразвукового очищення.

Експлуатаційні зміни робочих показників ЕМФ суттєво впливають на енергетичні та екологічні характеристики двигуна. Так, при напрацюванні форсунок, що відповідає пробігу близько 40 тис. км., ефективна потужність після ультразвукового очищення збільшується на 13-19%, ефективний крутний збільшується на 14-16%. При цьому знижується викид токсичних компонентів з газами, що відпрацювали - оксиду вуглецю CO на 15-25%, вуглеводнів CH на 15-30%.

4.1 Техніко-економічна оцінка ефективності дослідження

Дослідження теоретичних та експериментальних даних елементів паливної апаратури бензинового ДВЗ показали, що є можливість скоротити витрати на забезпечення його працездатності можливо зниженням часу експлуатації на граничних частотах обертання колінчастого валу та кількості відмов вузлів паливної апаратури [28, 29, 47, 58]. При цьому економічний ефект в експлуатації утворюється за рахунок зниження витрат простоїв у ремонті, а отже підвищення продуктивності сільськогосподарської техніки.

Зважаючи на відсутність єдиних тарифів на використання транспортних засобів малої та середньої вантажопідйомності з бензиновими двигунами з розподіленим упрорскуванням палива в реальних умовах, дохідна ставка на 1 км. пробігу загалом становить $P = 35$ крб./км, а собівартість у експлуатації становить $S = 30$ крб./км. (Дані на 2020 рік). На даний момент, питомий простій у ТО та ПР $d = 0,5$ днів/тис. км. При визначенні річного економічного ефекту враховувався середній річний пробіг транспортної сільськогосподарської техніки, який за звітними даними становить $L = 105$ тис. км.

Оцінюючи економічного ефекту в експлуатації вихідними даними були результати впливу зміни параметрів паливної апаратури ДВЗ на величину міжремонтного ресурсу транспортних засобів. Ця інформація, а також результати експериментальних даних дозволили оцінити величину підвищення ресурсу транспортних засобів, що розглядаються в експлуатації в $\Delta I = 12\%$. Так само економічну оцінку можна провести зі зниження собівартості перевезень, а також продуктивності транспортних засобів при скороченні простоїв у технічному обслуговуванні та поточному ремонті.

За статистикою, на силовий агрегат припадатиме до 38% (qCA) із загальної частки витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт, який у собівартості експлуатації транспортної сільськогосподарської техніки становить у середньому $Q = 15\%$. Відмови з паливної апаратури становлять $q_{ПА} = 25,59\%$. Множенням цих часток визначається відносне зниження

собівартості експлуатації.

Результати розрахунків

Показники		Одиниця виміру	Величина
1	Прибуткова ставка	грн./км.	35
2	Собівартість експлуатації	грн./км.	30
3	Середній простий у ТО та ПР	дн./тис. км	0,5
4	Середньорічний пробіг	тис. км.	105
5	Відносне зниження кількості відмов ПА за результатами роботи	%	12
6	Частка витрат на ТО та Р у собівартості експлуатації	%	15
7	Частка відмов силових агрегатів	%	38
8	Частка відмов ПА у відмовах силових агрегатів	%	25,59
9	Відносне зниження собівартості експлуатації за ТО та ПР	%	0,71
10	Річне зниження собівартості експлуатації від зниження ТО та ПР	грн/авт.	9 215,81
11	Частка простоїв у ТО та ПР за відмовами силового агрегату	%	44
12	Частка простоїв на усунення відмов ПА	%	25,59
13	Відносне зниження простоїв у ТО та ПР	%	1,15
14	Зниження простоїв у ТО та ПР	дн./тис. км	0,75
15	Річне зниження простоїв у ТО та Р	дн./авт.	55,13
16	Річне збільшення доходів від ТО та ПР	грн/авт.	2 654,39
17	Річний економічний ефект від ТО та ПР	грн/авт.	13 870,2

При аналізі отриманих даних можна говорити, що мінімальні сумарні питомі витрати, розраховані за техніко-економічним критерієм, наступають при періодичності ультразвукового очищення ЕМФ двигунів ЗМЗ-4062.10 при 40 000 км. Річний економічний ефект від зниження експлуатаційних витрат становитиме 13870,2 гривень на 1 двигун на рік.

ВИСНОВКИ

1. Аналітично обґрунтовано залежність витрати пального від пробігу при забрудненні соплових отворів ЕМФ, що характеризує технічний стан сучасних двигунів внутрішнього згоряння автомобілів, що працюють в АПК. Зі збільшенням напрацювання при забрудненні соплових отворів ЕМФ збільшується відхилення витрати палива до 25,2%. Отримано поліноміальне рівняння середнього значення витрат палива (2,9) від пробігу.

2. Експлуатаційні зміни робочих показників ЕМФ суттєво впливають на енергетичні та екологічні характеристики двигунів автомобілів, що працюють у АПК. Так, при напрацюванні форсунок, що відповідає пробігу близько 40 тис. км., ефективна потужність після ультразвукового очищення збільшується на 13-19%, ефективний момент, що крутить, збільшується на 14-16%. При цьому знижується викид токсичних компонентів з газами, що відпрацювали - оксиду вуглецю CO на 15-25%, вуглеводнів CH на 15-30%.

3. Розроблено склад та послідовність робіт з технічного обслуговування паливної апаратури бензинового двигуна в процесі експлуатації з включенням до комплексу робіт ТО заходів з очищення ЕМФ, що дозволить покращити енергетичні та екологічні характеристики двигунів автомобілів, що працюють в АПК.

4. Зі збільшенням пробігу зростають сумарні витрати на технічне обслуговування та ремонт паливної апаратури. Для зниження сумарних витрат та підтримки паливної апаратури у справному стані запропоновано технічне обслуговування з періодичністю 40 тис. км (через одне ТО-2) з очищення ЕМФ ультразвуком. Річний економічний ефект від зниження витрат на ГР та економію палива складе 13870,2 грн. на один двигун.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Абдулін, Р.З. Економетрика в MS Excel. [Електронний ресурс] Р.З. Абдулін, В.Р. Абдулін. - Іркутськ: Вид-во БДУ, 2016. - 135 с. - Режим доступу: <http://lib-catalog.isea.ua>.
2. Аверченко, В.І. Основи математичного моделювання технічних систем [Текст]/В. І. Аверченко, В. П. Федоров, М. Л. Хейфец. - 2-е вид., стереотип. - ФЛІНТА, 2011. - 271 с.
3. Автомобільний довідник [Текст]/Konrad Reif та ін; Bosch. - 3-тє вид. - 2012. - 1274 с.
4. Байков, Д.В. Стенд для обкатки та випробувань двигунів мобільної сільськогосподарської техніки малої потужності [Текст]/Д.В. Байков, А.П. Іншаков, С.С. Десяєв //2016. №2. С. 51-53.
5. Бакайкін, Д. Д. Діагностування електромагнітних форсунок бензинових двигунів автомобілів, що експлуатуються в сільському господарстві [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.20.03 / Бакайкін Дмитро Дмитрович.- Челябинськ, 2013.- 132 с.
6. Бараз, В.Р. Використання MS Excel для аналізу статистичних даних [Текст]/В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкін. - 2-ге вид., перероб. та дод. - 2014. - 181 с.
7. Березюков, Д. С. Розробка методу безрозбірного діагностування електромагнітних форсунок ДВЗ із упорскуванням легкого палива та дослідження змін їх робочих показників [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02 /Березюков Денис Сергійович. - Волгоград, 2012. - 131 с.
8. Валова, Т.С. Модель побудови та структура керуючої системи упорскування палива двигуна внутрішнього згорання [Текст] : дис. канд. тех. наук : 05.11.16 / Валова Тетяна Сергіївна. - Рязань, 2017. - 135.
9. Васін, В.А. До питання підвищення ресурсу форсунок [Текст]/В.А. Васін, А.Т. Лебедєв, Р.В. Павлюк та ін. // Наукова думка, 2017. №3. С. 74-77
10. Верейтін, А.Ю. Спосіб діагностування електромагнітних форсунок двигунів з упорскуванням бензину [Текст] : дис. ... канд. тех. наук: 05.04.02

Верейотія Олександр Юрійович. – Рязань, 2010. – 143 с.

11. Волков, Е.С. Особливості проведення технічного обслуговування сільськогосподарської техніки [Текст] / С.В. Волков, С.С. Мешкова, Є.В. Пухов

// У збірнику: Наука та освіта на сучасному етапі розвитку: досвід, проблеми та шляхи їх вирішення. Матеріали національної науково-практичної конференції. 2019. С. 125-128.

12. Гаврилов, К.Л. Професійна діагностика ДВЗ, систем паливостачання, запалення, енергопостачання, пуску автомобілів, дорожньо-будівельних та сільськогосподарських машин [Текст] / К. Л. Гаврилов. 4-те вид.

, 2017. – 720 с.

13. ГОСТ 26899-86 Стенди роликів для визначення параметрів тягово-швидкісних властивостей та паливної економічності автомобілів та колісних тракторів в умовах експлуатації. Загальні технічні вимоги [Текст]. - Введ. 01.07.87. : Вид-во стандартів, 1986. - 9 с.

14. ДЕРЖСТАНДАРТ 32513-2013 Палива моторні. Бензин неестильований. Технічні умови [Текст]. - Введ. 01.01.2015. - : Стандартінформ, 2014. - 12 с.

15. ДЕРЖСТАНДАРТ Р 51866-2002 Палива моторні. Бензин неестильований. Технічні умови [Текст]. - Введ. 01.07.2002. - : Вид-во стандартів, 2002. - 19 с.

16. Григор'єв, М.В. Діагностика та обслуговування електромагнітних форсунок бензинових ДВЗ [Текст] / М.В. Григор'єв, А.А. Далідович; -, 2018. - 52 с.

17. Гусаков, С.В. Планування, проведення та обробка даних експериментальних досліджень двигунів внутрішнього згорання [Текст]. Навчальний посібник / С.В. Гусаков, Н.М. Патрахальцев. - : Вид-во РУДН, 2004. - 167 с.

18. Далінгер, В. А. Теорія ймовірностей та математична статистика із застосуванням Mathcad [Текст] / В. А. Далінгер, С. Д. Симоньженков, Е. С. Галюкшов. 2-ге вид., испр. та дод. - : Видавництво Юрайт, 2020. - 145 с.

19. Данилов, І.К. Вплив ультразвукового очищення форсунок та промивання інжекторної системи на збільшення потужності та крутного моменту ДВЗ [Текст] / І.К. Данилов, А.А. Холяков, С.В. Бабовна // У збірнику:

Удосконалення системи підготовки та додаткової професійної освіти кадрів для агропромислового комплексу. Матеріали Національної науково-практичної конференції. - 2017. - С. 69-73.

20. Денисов, А.С. Вплив періодичності профілактики на надійність автомобілів [Текст] / О.С. Денисов, В.М. Басков, В.П. Захаров // Автотранспортне підприємство. - 2011. - № 1. - С. 51-52.

21. Дьяконов, В.П. Mathematica 5.1/5.2/6 у математичних та науково-технічних розрахунках [Текст] / В. П. Дьяконов. - 2-ге вид., перероб. та дод. - Москва: СОЛОН-Прес, 2008. - 743 с.

22. Єрохов, В. І. Системи упорскування бензинових двигунів: конструкція, розрахунок, діагностика [Текст] / В. І. Єрохов. - : Гаряча лінія-Телеком, 2011. - 551 с.

23. Загородських, Б.П. Зниження обводненості дизельного палива при експлуатації автотракторної техніки [Текст] / Б.П. Загородських, С.В. Абрамов, Д.С. Маяков // : Наука та вища професійна освіта. - 2016. № 3 (43). З. 192-196.

24. Залознов, І.П. Аналіз відмов та несправностей двигуна ЗМЗ-4062.10 та його систем [Текст] / І.П. Залознов, В.І. Рудських // Праці Сібаді. - : Вид-во Сібаді, 1998. - Вип. 2, ч. 1. - С. 72 - 77.

25. Залознов, І.П. Підвищення ефективності експлуатації автомобілів за рахунок обґрунтування періодичності обслуговування електромагнітних форсунок [Текст] : дис. канд. тех. наук: 05.22.10 / Залознов Іван Павлович. - Київ, 2003. - 145 с.

26. Іншаков, А.П. Інформаційні засоби підвищення надійності використання мобільної техніки [Текст] / А.П. Іншаков, С.С. Капітонов, І.І. Курбаков та ін. // Сільський механізатор. - 2018. № 1. С. 41-43.

27. Колодочкін, М. Чим залити бензин [Текст] / М. Колодочкін, А. Шабанов // За кермом. - 2012. - №3 - С.144-148.

28. Комаров, В.А. Аналіз технічної оснащеності підприємств та готовності техніки [Текст]/В.А. Комаров, Є.А. Нуянін // Сільський механізатор. 2018. №1. С. 12-13.

29. Коробова, Л.А. Математичне моделювання. Практикум [Текст]/Л.А. Коробова, Ю.В. Бугаєв, С.М. Черняєва та ін; наук. ред. Л.А. Коробова. - 2017. - 113 с.

30. Кувшинов, Г.І. Акустична кавітація біля твердих поверхонь [Текст]/Г.І. Кувшинов, П.П. Прохоренко. - Мінськ: Наука та техніка, 1990. - 111 с.

31. Кудряшов, Б.А. Ультразвукове очищення деталей вантажного автомобіля як фактор підвищення ефективності ремонтних робіт [Текст]/Б.А. Кудряшов, Н.В. Атаманенко, Н.С. Дєєв // Вантажівка. 2019. №5. С. 37-40.

32. Купряшкін, В.Ф. Стенд визначення сили тяги на ходових колесах малогабаритної техніки [Текст] / В.Ф. Купряшкін, А.С. Уланов, В.М. Купряшкіна, М.Г. Шляпніков, А.Ю. Гусєв, В.В. Купряшкін// механізатор. 2019. №2. С. 38-39.

33. Лукачов, С.В. Математичні моделі та розрахунок розподілу палива в турбулентному потоці повітря за відцентровою форсункою [Електронний ресурс] С.В. Лукачов, А.А. Діденко, І.А. Зубрилін та ін. - 2011. - Режим доступу: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Matematicheskie-modeli-i-raschet-rasperedelenia-topliva-v-turbulentnom-potoke-vozduha-za-centrobeznoi-forsunkoi-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54926>

34. Ляховецький, А.М. Статистика: навчальний посібник [Текст]/ А. М. Ляховецький, Є. В. Крем'янська, Н. В. Клімова. - : КНУОРУС, 2016. 362 с.

35. Marusin, AV Розвиток математичного моделювання і rationale для diagnosing diesel Engines moving injector needle / Marusin, AV, Danilov, IK, Khlopkov, SV, Marusin, AV, Uspenskiy, IA // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 422, 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming 17-18 October 2019, Voronezh, Російська Федерація.

36. Shaw CT, Using Computational Fluid Dynamics - Prentice Hall, 1992.
-315 p.

37. Simulation of a Magnetic Injection Valve, Computer Simulation
Technology

CST GmbH, <http://www.cst.com>, 2007.

38. Simulator of Electron Trajectory in Solids, version 2.42,
<http://www.gel.usherbrooke.ca/casino/index.html>.

39.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України