

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – ДП.1678 «С» 2023.09.27.01 ПЗ**

**Болсуновський Сергій Вікторович**

**2024**

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – ДП.1678 «С» 2023.09.27.01 ПЗ**

**Болсуновський Сергій Вікторович**

**2024**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

УДК 629.113

ПОГОДЖЕНО  
Декан факультету (Директор ННІ)  
механіко – технологічний факультет  
(назва факультету (ННІ))

\_\_\_\_\_  
(підпис) Братішко В.В.  
(ПІБ)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_  
(підпис) Калінін Є.І.  
(ПІБ)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Підвищення ефективності використання великотонажних автомобілів в  
умовах аграрного виробництва»

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»  
(код і назва)

Освітня програма Автомобільний транспорт  
(назва)

Орієнтація освітньої програми \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) Войтюк В.Д.  
(ПІБ)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) Калінін Є.І.  
(ПІБ)

Виконав

\_\_\_\_\_  
(підпис) Болсуновський Сергій Вікторович  
(ПІБ)

КИЇВ – 2024



## РЕФЕРАТ

Основна частина дипломного проекту викладена на 76 сторінках пояснювальної записки і 10 слайдах презентації, має 10 таблиць та ілюстрована 38 рисунками.

Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури.

Тема дипломного проекту: «Підвищення ефективності використання великотонажних автомобілів в умовах аграрного виробництва».

Мета роботи - покращення енергетичних та екологічних показників двигунів автомобілів АПК з розподілим упорскуванням палива ультразвуковим очищенням ЕМФ.

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 роботи двигуна.

У кваліфікаційній роботі аналітично обґрунтовано залежність витрати палива від пробігу при забрудненні соплових отворів ЕМФ, що характеризує технічний стан сучасних двигунів внутрішнього згорання автомобілів, які працюють в АПК.

Зі збільшенням напруцювання під час забруднення соплових отворів ЕМФ збільшується відхилення витрати палива до 25,2%. Отримано поліноміальне рівняння середнього значення витрат палива від пробігу.

Ключові слова: бензиновий двигун, соплові отвори, діагностика, електромагнітна форсунка.

## ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	7
1.1 Аналіз технічного стану паливної апаратури двигунів.....	7
1.2 Форсунки, що застосовуються в апаратурі паливоподачі з розподіленим упорскуванням палива.....	12
1.3 Несправності та порушення справного стану електромагнітних форсунок.....	15
1.4 Способи очищення електромагнітних форсунок.....	18
1.5 Механізм видалення забруднень миючим розчином в ультразвуковому полі.....	21
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ПРИ ЗМІНІ ПРОХІДНОГО ПЕРЕРІЗУ РОЗПИЛЮВАЧА ФОРСУНКИ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	24
2.1 Математична модель об'єкта моделювання.....	24
2.2 Схема створення математичної моделі.....	25
2.3 Типові математичні схеми моделювання.....	25
2.4 Регресійні моделі.....	26
2.5 Регресійний аналіз похибки вимірювання продуктивності форсунок в залежності від пробігу автомобіля.....	26
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
3.1 Завдання дослідження.....	34
3.2 Методика оцінки очищення поверхневих забруднень з елементів форсунки.....	35
3.3 Методика оцінки технічного стану форсунок.....	39
3.4 Методика очищення форсунок в ультразвуковій ванні.....	44
3.5 Методика дослідження елементів проточної частини форсунок за допомогою цифрового мікроскопа та оцінка якості очищення.....	46
3.6 Методика оцінки енергетичних характеристик двигуна на роликовому стенді CARTEC LPS 2510.....	50

3.6.1 Конструктивні особливості стенду та розміщення вимірювального обладнання .....	52
3.6.2 Методика проведення експериментальних досліджень .....	59
3.6.3 Результати випробувань та їх аналіз .....	61
3.7 Методика оцінки екологічних показників двигуна .....	63
РОЗДІЛ 4 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ РОЗПИЛЮВАЧІВ ФОРСУНОК .....	68
4.1 Розробка технологічного процесу очищення розпилювачів форсунок миючим розчином в ультразвуковому полі .....	68
4.2 Визначення періодичності технічного обслуговування паливної апаратури двигуна ЗМЗ-4062.10 .....	69
ВИСНОВКИ .....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	73
ДОДАТКИ .....	76

## РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Аналіз технічного стану паливної апаратури двигунів

Ускладнення автомобілів та посилення вимог до його агрегатів і 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 підтримку автотранспортних засобів у працездатному стані постійно зростають.

Все це повною мірою стосується і основного агрегату автомобіля – його силової установки. Аналіз показників надійності двигунів показує, що ймовірність виникнення відмов і несправностей у конструктивних елементах досить велика (табл. 1.1).

Аналіз елементів паливної апаратури (ПА) бензинових двигунів, що встановлюються на транспортні засоби малої та середньої вантажопідйомності, показав, що найбільша частка відмов припадає на систему живлення з розподіленням упорскуванням.

В даний час найбільшого поширення набули системи живлення з розподіленням упорскуванням палива та електронним управлінням [1, 3, 4, 7]. Систему такого типу (рис. 1.1) має і двигун ЗМЗ-4062.10, який встановлюється на автомобілі сімейства ГАЗ, які активно використовуються в агропромисловому комплексі [2].

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

- паливний бак;
- електричний бензонасос;
- паливний фільтр тонкого очищення палива;
- регулятор тиску палива;
- паливна рампа;
- електромагнітні форсунки.

Таблиця 1.1 – Розподіл відмов двигуна ЗМЗ-4062.10

Найменування елементів силового агрегату	Частка відмов, %	Середній наробіток на відмову, км	Коефіцієнт варіації	Витрати на ремонт, грн.			
				За послуги		На запчастини	
				Середнє значення	Коеф. варіації	Середнє значення	Коеф. варіації
<b>1. Система живлення з розподіленням впорскуванням палива</b>	<b>25,59</b>	<b>35990</b>	<b>1,027</b>	<b>2331</b>	<b>0,947</b>	<b>3722</b>	<b>0,983</b>
2. Підшипники колінчастого валу, шатун	18,32	36586	1,193	5703	0,259	93458	1,061
3. Циліндро-поршнева група	14,05	36670	1,273	4322	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. Механізм газорозподілу	5,50	36627	1,147	750	0,342	1745	0,508
7. Система мащення	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 в цілому	100	23140	1,021	1613	1,138	11272	2,414

Паливний бак є резервуаром для зберігання палива.

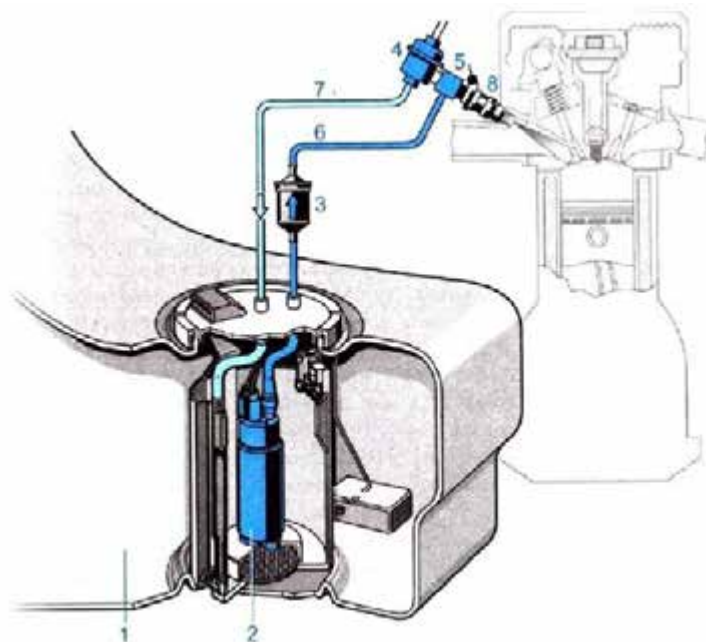
Корпус паливного бака має корозійно-стійкі властивості і зберігає герметичність при перевищенні робочого тиску [3, 4, 8, 9].

Електричний бензиновий насос (ЕБН) повинен постійно 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, 4, 8, 9]. 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 при падінні напруги до 50...60% від номінального рівня.



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

Рисунок 1.1 – Схема системи впорскування палива

Паливний фільтр тонкого очищення палива здійснює фільтрацію палива, що надходить у паливну систему. Корпус фільтра містить елемент, що фільтрує та затримує частинки бруду. В якості фільтруючого середовища 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 упорскуванням палива у впускний трубопровід має середню ширину пір приблизно 10 мкм [3, 5, 8].

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 розпиленні палива електромагнітними форсунками ЕМФ [3, 9].

Паливна рампа служить для накопичення палива, яке потрібно для впорскування палива, згладжування пульсацій тиску та рівномірного розподілу палива по всіх форсунках [3, 9, 15].

Електромагнітна форсунка служить для впорскування дозованих порцій палива у впускний трубопровід під тиском. Управління форсункою здійснюється за рахунок зміни тривалості управляючого сигналу, який подається з електронного блоку управління [3, 9].

У процесі експлуатації бензинових двигунів відбуваються зміни робочих показників паливної системи [3, 7].

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

Знос: електричний бензиновий насос (щітки та клапана); сідло та голка електромагнітної форсунки; регулятор тиску палива (знос мембрани).

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

Забруднення: на пропускну 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 ємностей для зберігання (наприклад, у ємностях підприємств АПК) та вода, що потрапляє у паливо внаслідок конденсації парів при зберіганні.

Кількість та склад домішок у паливі залежить від умов, термінів зберігання та транспортування палива до місця реалізації.

Аналіз статистичних даних показує, що, в основному, на роботу паливної системи впливають смолисті відкладення на елементах електромагнітної форсунки, тоді як відкладення в магістралях та фільтрах не вносять змін у роботу паливної системи [3, 7].

На процес утворення відкладень на електромагнітній форсунці впливає те, що розпилювач форсунки розташовується в безпосередній близькості від впускних клапанів і на розпилювачі діє 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 не відповідає початковим параметрам струменя, зазначеним заводом виробником [1, 3, 8].

Розпорошення струменя палива призводить до утворення крапель (тонкість розпилу), які надалі дробляться на дрібніші (рис. 1.2) [3, 7].

Методики усунення вищезгаданих недоліків у форсунках не передбачені нормативною документацією [1, 5].

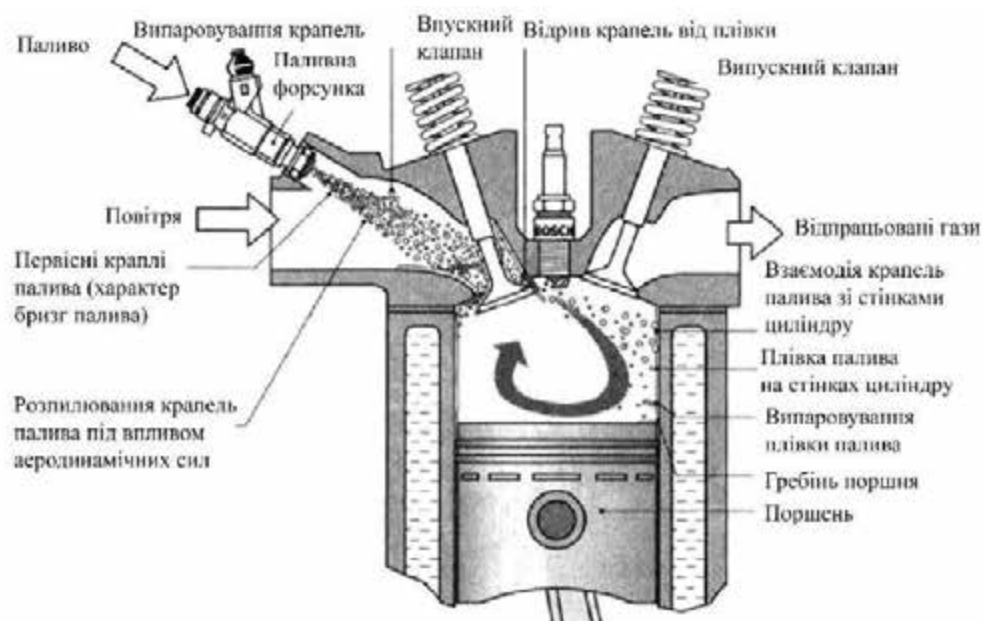
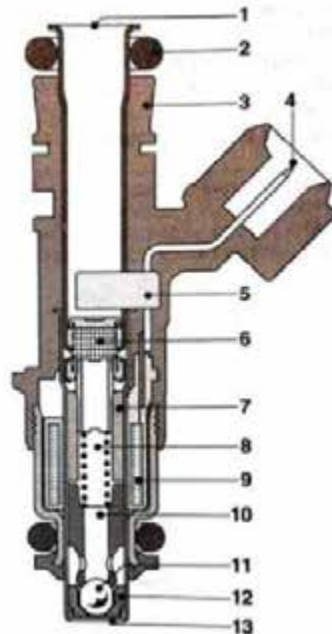


Рисунок 1.2 – Механізми та фактори, що впливають на сумішоутворення під час упорскування палива у впускний трубопровід

1.2 Форсунки, що застосовуються в апаратурі паливоподачі з розподіленим упорскуванням палива

Компоненти системи сумішоутворення повинні забезпечувати належне утворення паливно-повітряної суміші при використанні тієї чи іншої системи упорскування палива.

Електромагнітна форсунка включає наступні основні компоненти (рис. 1.3): корпус клапана з електричним і гідравлічним з'єднувачами; електромагнітна котушка; голчастий клапан з якорем електромагніту та кулькою клапана; сідло клапана з діафрагмою; пружина клапану.



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

Рисунок 1.3 – Електромагнітна форсунка

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 сидла 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 якір електромагніту голчастого клапана. Кулька клапана піднімається над сидлом, і відбувається упорскування палива. Коли котушка знеструмлена, голковий клапан закривається під дією зусилля пружини.

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

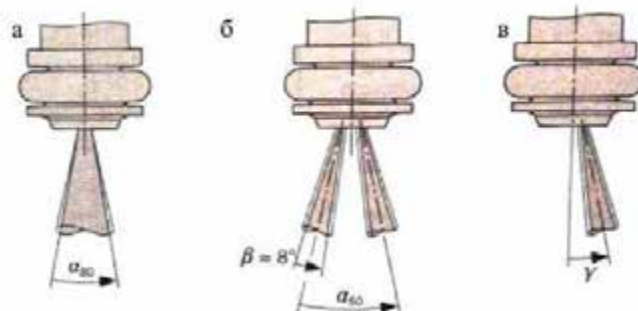
Кількість палива, що впорскується за одиницю часу, визначається переважно попереднім тиском у системі подачі палива, протитиском у впускному трубопроводі та геометрією області випуску палива.

Процес утворення струменя палива, тобто його форма, кут розпилювання 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 (рис. 1.4) [3, 4, 5].

*Конусна форма розпилення.* Окремі струмені палива, що виходять з 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.



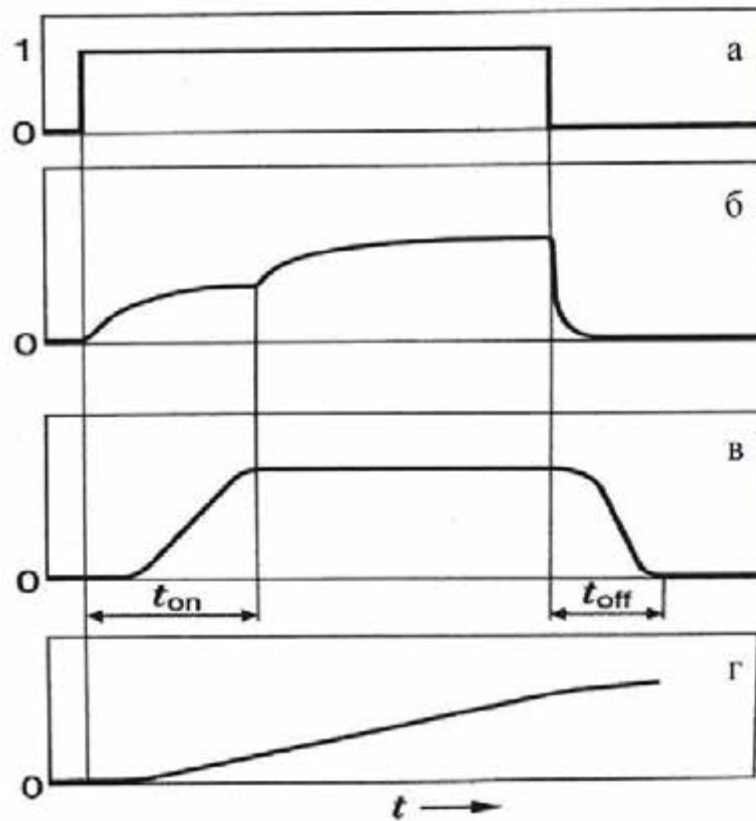
а – конусний струмінь; б – подвійний струмінь; в – зміщений струмінь  
Рисунок 1.4 – Форми струменів палива

*Двоструменева форсунка.* Двоструменеві форсунки часто використовуються на двигунах з двома впускними каналами на одному циліндрі. Отвори в розпилювальній 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.* Струмінь 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 (рис. 1.5, а). При подачі напруги, електричний струм у котушці електромагніту зростає (рис. 1.5, б), що викликає підйом голкового клапана (рис. 1.5, в). 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 приведена на рис. 1.5, г.

Оскільки після знеструмлення котушки магнітне поле не зникає миттєво, клапан повністю закривається після часу розмагнічування (відпадання) [3, 4, 9].



а – сигнал активації; б – крива струму; в – підйом; г – кількість палива, що впорскується;  $t_{on}$  – час відкриття форсунки;  $t_{off}$  – час закриття форсунки

Рисунок 1.5 – Активація паливної форсунки

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 справного стану електромагнітних форсунок

Несправність – стан технічного пристрою, при якому хоча б один із його основних чи додаткових параметрів не відповідає вимогам, зумовленим технічною документацією [2, 7, 8, 11].

Для стійкої роботи двигуна від електромагнітних форсунок потрібно, щоб вони працювали без збоїв, точно дозували кількість палива, яке необхідне силовому агрегату [8, 12]. З'єднання форсунки з паливним

коллектором, 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 см<sup>3</sup>/хв відповідно [2, 3, 6, 9].

Дуже важливим для досягнення нормативних енергетичних та екологічних показників двигуна є форма, напрямок факела палива та якість його розпилу [2, 3, 6]. Слід зазначити, що опис розпаду струменів, що формуються форсунками в системі безпосередньо впорскування, так само, як і обчислення розміру крапель в потоці палива, пов'язані зі складністю процесів, що протікають при впорскуванні паливної суміші [5, 9].

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

Паливно-мастильні матеріали, взаємодіючи з металами, утворюють поверхневі забруднення у вигляді нагару, лаків та осадів. Механізм утворення останніх залежить від температури деталей розпилувача, групового вуглеводневого складу бензину, присутності в паливі смолистих речовин. На виникнення відкладень впливає також час контакту палива та оливи з поверхнею проточних елементів електромагнітних форсунок [1, 4, 6]. Особливістю забруднень деталей двигунів є їхня висока адгезія і здатність міцно утримуватися на поверхнях деталей і вузлів. Умовно, забруднення можна розділити на осадки, лаки та нагари, до складу яких входять смоли, асфальтени, карбени та карбоїди.

Смоли – речовини складного хімічного складу, які під впливом температури та інших факторів ущільнюються та переходять до асфальтенів. Надалі цей вид забруднень також зазнає змін, перетворюючись на високовуглецеві сполуки – карбени та карбоїди. Крім того, до складу

експлуатаційних забруднень входять продукти згоряння та термічного розпаду палива – частки сажі та коксоподібних речовин.

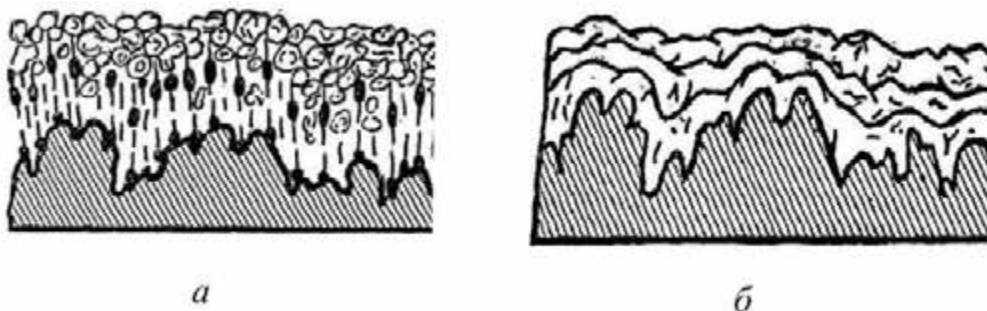
Всі перераховані вище забруднення відкладаються на розпилювачах форсунок у вигляді липких високомолекулярних сполук (плівок). Плівка, у свою чергу, утримує на своїй поверхні мікрочастинки олії та палива. Уся ця маса з часом спікається, а товщина шару зростає.

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 охолоджуюча дія потоку бензину і повітря відсутня. Легкі фракції бензину в робочій зоні форсунки випаровуються, а важкі накопичуються у вигляді смолистих відкладень, що зменшують переріз каліброваного каналу [9, 13].

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

Існують основні три групи забруднень, які відрізняються фізико-хімічними та механічними властивостями: I група – адгезійно-зв'язані (слабозв'язані) забруднення; II група – поверхнево адсорбційно-зв'язані забруднення; III група – міцно (глибинно) зв'язані забруднення.

II та III групи забруднень найбільш характерні для паливної апаратури бензинового двигуна (рис. 1.6).



а – поверхнево адсорбційно-зв'язані; б – міцно (глибинно) зв'язані

Рисунок 1.6 – Схема утворення забруднень на деталях паливної апаратури

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

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

До III групи відносяться такі забруднення, як лакові відкладення, продукти корозії, окалини тощо. Всі ці забруднення утримуються на поверхні за рахунок міцного погашення твердої 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, смолу та оливу, є введення в бензин (безпосередньо виробником) миючих присадок [1, 2, 3, 6, 7]. Присутність миючих присадок регламентується нормативами та ДСТУ.

Так, у сучасних марках бензину, що випускаються, застосування миючих присадок допускається, проте у вимогах Світової паливної хартії до якості палива, використання цих препаратів є обов'язковим лише у розвинених країнах [2, 5, 7].

Ефективність дії присадок, що мають миючі властивості, різна. До цього часу фахівцями 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 працездатності електромагнітних форсунок [1, 13].

Асортимент присутніх у торгових мережах препаратів-очищувачів інжекторів, що додаються в бензин, дуже великий. Для підтвердження їхньої ефективної дії проводять випробування, знімаючи показники стендового двигуна при роботі на базовому бензині та бензині, що містить такий препарат [4, 6, 13].

Заходи, що пов'язані з очищенням форсунок без їх зняття з двигуна, проводять за допомогою введення в бензин препаратів, що мають мийну дію. Існує спосіб, при якому застосовують промивну рідину (сольвент-декорбанайзер), що є, також як і бензин, для двигуна паливом [1, 2, 3, 7, 9]. 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 [2, 3, 7].

В даний час на СТО найбільш популярною рідиною, що очищає форсунки, є рідина відомої бельгійської фірми WYNN'S.

Аналізуючи дані відносно оцінки технічного стану паливної системи автомобілів VW Tiguan до та після очищення рідиною WYNN'S, виробничу перевірку якої ми проводили на СТО ТОВ «АВТОКІЇВ» у м. Київ 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 мащення, 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.

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, 13, 17]. В основі технології очищення форсунок із застосуванням високочастотних хвиль лежить ультразвукова кавітація [1, 7, 9, 10].

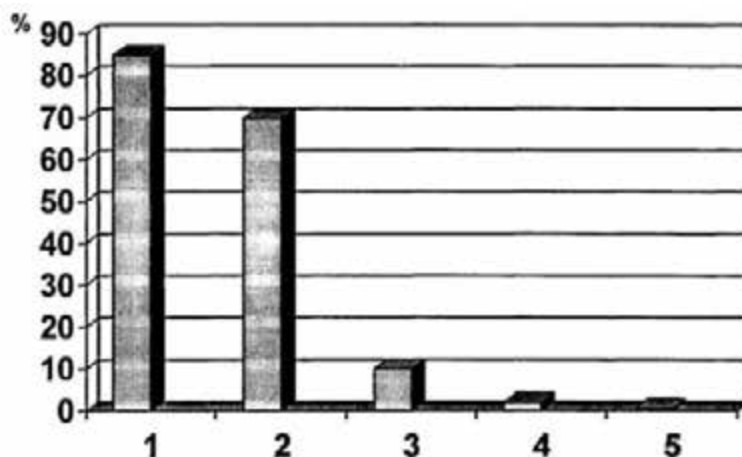
У процесі експлуатації сільськогосподарської техніки, серед яких особливе місце займають транспортні засоби малої та середньої вантажопідйомності з бензиновими двигунами з розподіленим упорскуванням палива, на зовнішніх та внутрішніх поверхнях деталей відкладаються технологічні забруднення у вигляді мастил, олив, рідких вуглеводнів та продуктів корозії. На автотранспортних підприємствах для очищення забрудненої поверхні деталей застосовують синтетичні миючі засоби (СМЗ). Аналіз науково-технічної літератури показує, що для підвищення технологічних властивостей СМЗ до них додають різні присадки. Для підвищення миючих та протикорозійних властивостей додають борати, фосфати які характеризуються високим інгібуючим ефектом по відношенню до сталі у водно-сольових середовищах та умовах атмосфери, ніж їх складові окремо.

Тому дослідження впливу боратфосфатних сполук 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.

На рис. 1.7 відображені переваги та недоліки способів видалення забруднень. Найменша кількість забруднень спостерігається при ультразвуковій очистці на частотах 20...40 кГц.

Аналізуючи способи очищення, найбільш перспективним є використання ультразвукового очищення, яке дозволяє видаляти

забруднення з електромагнітних форсунок і деталей паливної апаратури [1, 7, 11].



1 – струменеве очищення у водних розчинах; 2 – очищення в органічних розчинниках; 3 – механічне очищення; 4 – ультразвукове очищення (частота 400...600 кГц); 5 – ультразвукове очищення (частота 20...40 кГц)

Рисунок 1.7 – Вплив способу видалення забруднень на якість очищеної поверхні

1.5 Механізм видалення забруднень миючим розчином в ультразвуковому полі

В роботі Мачалкіна Ю.Н. автором зазначено, що «ультразвук – пружні коливання і 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 для вивчення будови і властивостей речовин, так для вирішення найрізноманітніших технічних завдань, зокрема, видалення різних забруднень» [6].

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 зхлопування. Кавітаційні бульбашки утворюються в результаті сильного локального зниження тиску в рідині і зхлопуються внаслідок його підвищення [1, 3, 9, 10].

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 розрідження. 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 генератора, посилення сформованих механічних коливань та їх введення у миючу рідину [1, 7, 9]. Безпосередньо очищення проводиться в робочій ємності, що заповнюється миючою 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 миючою рідиною. Розрізняють

модульні занурювальні випромінювачі та випромінювачі з занурювальними хвилеводами-концентраторами.

Бульбашки утворюються в тих місцях, де тиск в рідині виявляється нижче деякого критичного значення, що відповідає порогу кавітації [1, 7]. Для спонтанного утворення бульбашок в ідеальній однорідно чистій рідині потрібні великі напруження розтягу. У реальних умовах розриви суцільності рідини відбуваються при тисках, які лише трохи менше тиску насиченої пари при даній температурі, що пояснюється наявністю зародків кавітації – мікроскопічних газових бульбашок, присутніх в об'ємі 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 бульбашку і випаровуванням рідини в бульбашку, а також коагуляцією зародків.

Процес ультразвукового очищення обумовлений низкою гідродинамічних явищ, що виникають в ультразвуковому полі значної інтенсивності: кавітацією, акустичними течіями, радіаційним тиском та ін. [6, 9, 16]. Ефективність очищення залежить від параметрів звукового поля, що визначається джерелами акустичної енергії – частоти та амплітуди коливань, інтенсивності звуку, звукового тиску та від фізико-хімічних властивостей миючої 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 [1, 7]. 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.

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ПРИ ЗМІНІ ПРОХІДНОГО ПЕРЕРІЗУ РОЗПИЛЮВАЧА ФОРСУНКИ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

### 2.1 Математична модель об'єкта моделювання

Математичну модель зазвичай подають схемою (рис. 2.1).

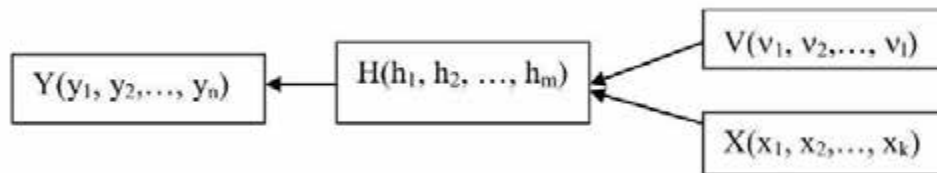


Рисунок 2.1 – Схема математичної моделі

Прямокутником позначений об'єкт (процес) моделювання,  $X(x_1, x_2, \dots, x_k)$  – множина зовнішніх впливів на об'єкт, що моделюється;  $V(v_1, v_2, \dots, v_l)$  – множина впливів зовнішнього середовища;  $H(h_1, h_2, \dots, h_m)$  – множина внутрішніх станів об'єкта;  $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$  – множина вихідних параметрів модельованого об'єкта. Множина 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, так і стохастичні змінні.

Розглядають ці множини як деякі формальні вектори  $\vec{X}$ ,  $\vec{Y}$ ,  $\vec{V}$ ,  $\vec{H}$ . В рівності  $Y = F(\vec{X}, \vec{V}, \vec{H}, \vec{Y}, t)$  параметр  $t$  – час. Параметр  $F$  є деяким оператором, визначення структури якого є метою моделювання.

Рівність  $Y = F(\vec{X}, \vec{V}, \vec{H}, \vec{Y}, t)$  – формальна математична модель (динамічна модель). Якщо в рівності відсутня  $t$ , то модель називається статичною. Структура оператора  $F$  може бути аналітичною, чисельною чи статистичною. Тому математичні моделі ділять на аналітичні, чисельні та статистичні моделі [4, 8, 13].

## 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 відношень [4, 8, 13]. Робота із створеною моделлю містить: 1) якісний аналіз моделі з метою розробки методів розв'язання чи 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 та Mathematica.

Наявність конкретних комп'ютерних програм уможлиблює проведення обчислювального експерименту, метою якого є перевірка адекватності даної моделі та отримання додаткової інформації [2, 5, 12, 13].

## 2.3 Типові математичні схеми моделювання

До типових математичних схем моделювання належать:

1) 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 частинних похідних із різними початковими та крайовими умовами. У моделях оптимального управління та деяких інших моделях оптимізації, розв'язки знаходяться при обмеженнях на функції, які мають лінійний, нелінійний чи диференціальний характер;

2) дискретно-детерміновані  $F$ -схеми (кінцеві автомати). За допомогою цих схем описуються моделі пристроїв контролю та управління, що 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 в залежності від значень вхідних параметрів і внутрішніх станів в даний або попередній моменти. Замість рівнянь можна використовувати таблиці чи графи;

3) стохастичні моделі. У стохастичних моделях усі або частина змінних множин  $X$ ,  $Y$ ,  $H$  є випадковими величинами. Це моделі регресійного типу, що мають велике значення при статистичному аналізі спостережень та безперервно-стохастичні моделі ( $Q$ -схеми), які застосовуються для опису систем масового обслуговування [2, 6, 14, 18].

#### 2.4 Регресійні моделі

Регресійні моделі використовуються під час статистичного аналізу результатів експерименту. Зазвичай такого типу досліди проводяться при одній або кількох безперервних керованих змінних  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (вхідні сигнали) і вимірюваної 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 чи взагалі неможливі.

Регресійні моделі узагальнюють і випадки, коли вхідні змінні також є випадковими змінними [2, 6, 10, 18].

#### 2.5 Регресійний аналіз похибки вимірювання продуктивності форсунок в залежності від пробігу автомобіля

У сучасних поршневих двигунах з розподільним впорскуванням палива, електромагнітні форсунки є основним типом систем подачі і розпилювання палива. На останній ділянці потоку 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 [5, 6, 8].

Основним параметром режиму роботи електромагнітних форсунок є перепад тиску палива  $\Delta p_{T,0}^*$  на форсунці:

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

де  $p_{T,0}^*$ ,  $\Delta p_K^*$  – абсолютні повні значення тиску палива перед форсункою та в камері згоряння, Н/м<sup>2</sup>.

Якість роботи форсунок оцінюється за групою витратних, геометричних та дисперсних характеристик форсунки та факелу розпилу.

Витратні характеристики форсунки – це залежність загальної витрати палива – масової  $G_T$ , кг/с або об'ємної  $Q_T$ , м<sup>3</sup>/с – від величини перепаду тиску палива  $\Delta p_{T,0}^*$  у форсунці.

Геометричні характеристики факела розпилу – це залежність форми струменя або факела від перепаду тиску палива  $\Delta p_{T,0}^*$ . Як правило, їх форма описується одним або двома параметрами – кутом розкриття  $\gamma$  факелу, град. та далекобійністю струменя  $L$ , м

Витратно-геометричні характеристики струменів або факелів розпилу – це залежність деякого параметра, що визначає закон розподілу маси розпиленого палива в просторі або нерівномірність його розподілу по масі, наприклад, місцева витрата палива  $\Delta G_T(x, y)$  через малу площадку  $\Delta S$  або щільності зрошення  $q = \Delta G_T(x, y) / \Delta S$ , (г/с)/см<sup>2</sup> в залежності від геометричних, режимних параметрів роботи форсунки.

Дисперсні характеристики – це залежність величини середнього діаметра крапель (СДК, в мікрометрах) від перепаду тиску палива  $\Delta p_{T,0}^*$  у форсунці. Використовують різні за змістом СДК – середній арифметичний, середній за масою всіх крапель, середній по бічній поверхні випаровування та інші [12, 15, 16, 17].

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

а) рівняння витрати палива ( $G_{T,t}$ , кг/с):

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

де  $\rho_T$  – густина палива, кг/м<sup>3</sup>;  $w_t$  – теоретична швидкість витікання палива з сопла форсунки, м/с;  $F_c$  – площа вихідного поперечного перерізу каналу сопла, м<sup>2</sup>.

Якщо сопло з поперечним перерізом у формі кола радіусом  $r_c$ , то  $F_c = \pi r_c^2$ .

б) Рівняння Бернуллі для ідеальної нестискаємої рідини:

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

де  $p_{T,0}$  – тиск палива в потоці рідини перед форсункою, Н/м<sup>2</sup>.

З рівняння (2.3) у припущенні рівності тиску в потоці на зрізі сопла  $p_{T,0}$  тиску газу в камері згоряння  $p_K^*$  отримаємо теоретичну швидкість витікання палива  $w_t$ :

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

Після підстановки цього виразу в формулу для витрати палива (2.2), отримаємо:

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

В дійсності, через наявність при течії реальної рідини через форсунку різних завихрень, прикордонних шарів, в'язкого гідравлічного і поверхневого тертя, що створюють гідравлічні опори і через що дійсна швидкість витікання  $w < w_t$ , фактична витрата палива  $G_T$ :

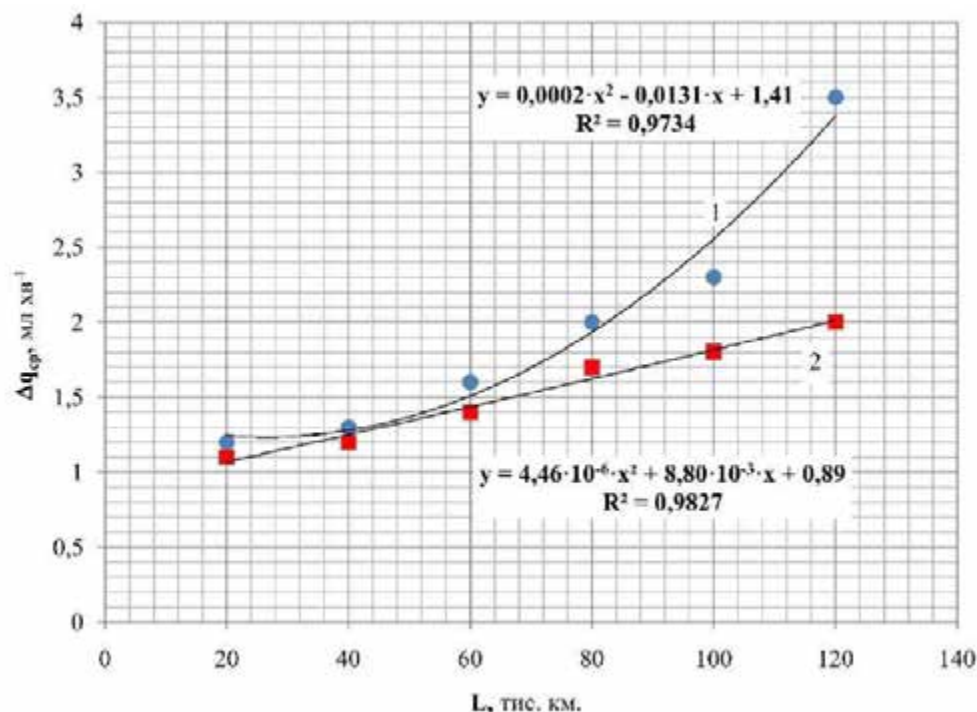
$$G_T = \mu G_{T,t} = \mu (\pi r_c^2) \sqrt{2 \rho_T \Delta p_{T,0}^*}, \quad (2.6)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати палива форсунки, за допомогою якого враховують усі перераховані вище гідравлічні втрати,  $\mu < 1$ .

Величина  $\mu$ , як правило, не розраховується, а визначається експериментально, при так званих «проливках» форсунок.

Однак, у рівнянні витрати палива через форсунку (2.6), відсутній коефіцієнт, який враховував витрати палива при забрудненні соплових отворів в залежності від пробігу, тому нами запропоновано враховувати зміну середнього відхилення значень витрати палива залежно від забруднень соплових отворів та пробігу.

У ході експериментальних досліджень було отримано характерні точки середнього відхилення значень витрати палива ( $\Delta q_{cp}$ ) залежно від пробігу до та після очищення ультразвуком (рис. 2.2). 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.



1 – до очищення ультразвуком; 2 – після очищення ультразвуком

Рисунок 2.2 – Середнє відхилення значень витрати палива ( $\Delta q_{cp}$ ) в залежності від пробігу ( $L$ )

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

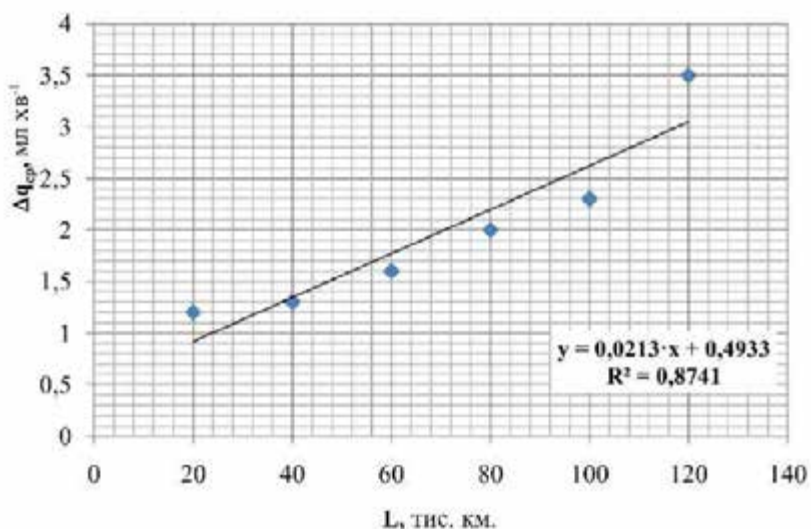


Рисунок 2.3 – Лінійна апроксимація даних середнього відхилення значень витрати палива ( $\Delta q_{cp}$ ) в залежності від пробігу ( $L$ )

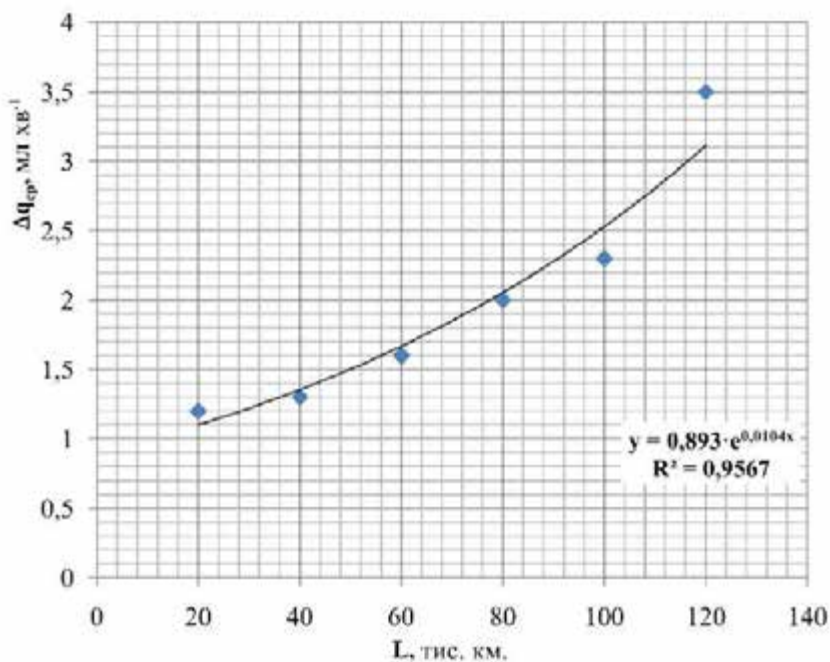


Рисунок 2.4 – Експоненційна апроксимація даних середнього відхилення значень витрати палива ( $\Delta q_{cp}$ ) в залежності від пробігу ( $L$ )

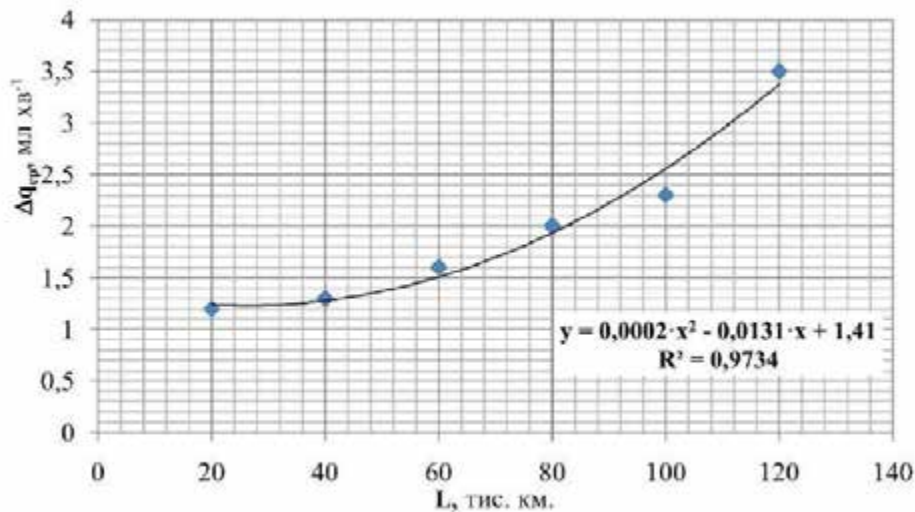


Рисунок 2.5 – Поліноміальна апроксимація даних середнього відхилення значень витрати палива ( $\Delta q_{cp}$ ) в залежності від пробігу ( $L$ )

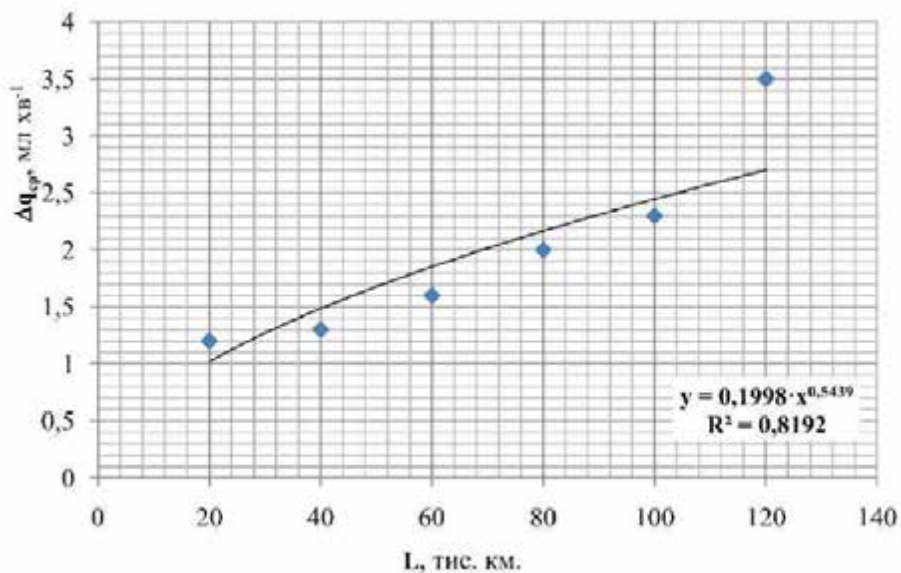


Рисунок 2.6 – Степенева апроксимація даних середнього відхилення значень витрати палива ( $\Delta q_{cp}$ ) в залежності від пробігу ( $L$ )

З співставлення значень коефіцієнтів детермінації (табл. 2.1) випливає, що найбільше значення параметра  $R^2$ , спостерігається для рівняння регресії, отриманого апроксимацією даних поліномом другого ступеня.

Отже, це квадратичне рівняння найбільше повно відображає зміну  $\Delta q_{cp}$  від пробігу автомобіля ( $L$ ). Регресія у вигляді квадратичного рівняння нелінійна відносно змінних і лінійна відносно параметрів моделі. Тому

оцінки методу найменших квадратів перетвореної лінійної моделі є оцінками параметрів нелінійної моделі.

Таблиця 2.1 – Рівняння отриманих побудовою лінії тренду регресій та коефіцієнти детермінації ( $R^2$ )

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

Для оцінки можливості практичного використання поліноміального рівняння необхідно перевірити його на адекватність за допомогою критерію Фішера, а також оцінити точність математичної моделі. Критерієм статистичної значущості (адекватності) рівнянь регресії є умова, при якій  $F_{розр} > F_{кр}$ . Точність математичної моделі оцінюють за величиною середньої відносної похибки апроксимації  $\bar{A}$ . Висока точність математичної моделі характеризується значеннями  $\bar{A}$  нижче 10% (табл. 2.2).

Прогностичну якість моделі оцінюють індексом кореляції  $\eta$ .

Розрахунок середньої помилки апроксимації проведено за формулою:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| 100\% . \quad (2.7)$$

Індекс кореляції обчислений із співвідношення:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} . \quad (2.8)$$

Табличне значення критерію Фішера (критичне значення  $F_{кр}$ ) визначено при рівні значущості 0,05.

У представлених формулах для розрахунку помилки апроксимації та індексу кореляції  $\hat{y}_i$  – теоретичне (розрахункове, передбачене) значення  $\Delta q_{cp}$ ;  $\bar{y}_i$  – середня величина  $\Delta q_{cp}$ ;  $n$  – кількість спостережень.

Таблиця 2.2 – Характеристика поліноміальної регресійної моделі

Регресія	$\bar{A}$ , %	$\eta$	$F_{розр}^*$	$F_{кр}$	$\hat{R}^{2*}$
Поліноміальна	6,03	0,97	27,77	9,55	0,84

Поліноміальна модель (квадратичне рівняння) статистично значуща, має високу точність, а отже, повністю відображає реальну залежність середнього відхилення  $\Delta q_{cp}$  від пробігу автомобіля. Значення  $\eta$  близько 1, тобто квадратичний зв'язок між середніми величинами відхилень витрати та пробігом автомобіля сильний, 84% значень  $\Delta q_{cp}$  обумовлено впливом пробігу автомобіля, 16% даних, що залишилися, залежать від інших, не включених у модель, факторів.

Розрахункові значення критерію Фішера більші від його критичного значення.

Отже, рівняння регресії адекватне. В результаті підстановки цього поліноміального виразу у формулу (2.6), нами отримано рівняння середнього значення витрати палива від пробігу:

$$G_T = \mu(\pi r_c^2) \sqrt{2\rho_T \Delta p_{T,0}^*} (0,0002x^2 - 0,0131x + 1,41) \quad .(2.9)$$

## РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Завдання дослідження

Для оцінки впливу ультразвукового очищення ЕМФ на покращення енергетичних та екологічних показників двигунів у процесі експлуатації, було проведено низку експериментів на метрологічно повіреному 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 «НР-6В» фірми АЕ&Т;

- для очищення паливних форсунок використовували ультразвукову ванну «Ultrasonic Cleaner» фірми АЕ&Т;

- для підтвердження факту зношування елементів форсунки та її забруднення було проведено аналіз фотографій розпилювачів форсунок, отриманих за допомогою цифрового мікроскопа Levenhuk DTX 90;

- порівняльні випробування енергетичних характеристик двигуна ЗМЗ-4062.10 автомобіля Газель 27040V «Фермер» з комплектом форсунок до і після ультразвукового очищення, проводилися на роликовому стенді CARTEC LPS 2510 для однієї ведучої осі;

- для оцінки екологічних показників використовувався газоаналізатор Інфракар М2Т.

Об'єктами дослідження були ЕМФ бензинових двигунів із розподіленим упорскуванням палива SIMENS DEKA ZMZ 6354. Форсунки експлуатувалися в силових агрегатах автомобілів ГАЗ-27040 V (Газель «Фермер»). Випробування проводили на 150 комплектах форсунок (у

кожному комплекті 4 форсунки), знятих із двигунів автомобілів з пробігом від 0 до 170 тис. км.

### 3.2 Методика оцінки очищення поверхневих забруднень з елементів форсунки

Відомо [6, 7, 8, 10], що зміни робочих параметрів форсунок впливають на якість розпилу палива і, зрештою – на енергетичні та екологічні показники двигуна, його пускові якості та динаміку транспортного засобу.

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



Рисунок 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 табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики приладу Reanimator Injector v

2.0

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

В режимі «Перевірка» на форсунки подаються однакові імпульси управління (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, що опущена в розчин для очищення, починає прокачувати рідину у зворотному напрямку. Це сприяє інтенсивній взаємодії хімічного очищувача із забрудненнями усередині форсунки.

Оскільки конструкція сучасної електромагнітної форсунки є безрозбірною, то для доступу до її проточної частини та дослідження забруднень потрібно використовувати ріжучий інструмент, що в кінцевому підсумку приведе форсунку в непридатний стан. Тому була розроблена лабораторна установка, яка дозволяє оцінити ступінь переходу в рідку фазу смолистих, лакових і нагарних відкладень, не застосовуючи різального інструменту.

Заводи-виробники ДВЗ в інструкціях з експлуатації не регламентують необхідність контролю продуктивності форсунок через певні значення їх пробігу (напрацювання), оскільки на всіх автомобілях 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) і тривалість подачі палива залежали тільки від імітованого режиму роботи двигуна, яких було три: на холостому ході, максимальному навантаженні і високих швидкостях руху автомобіля. У першому випадку значення цих величин дорівнювали  $\nu = 650 \text{ хв}^{-1}$ ,  $\tau = 3 \text{ мс}$ ; у другому –  $\nu = 2400 \text{ хв}^{-1}$ ,  $\tau = 12 \text{ мс}$ ; у третьому –  $\nu = 3600 \text{ хв}^{-1}$ ,  $\tau = 6 \text{ мс}$  [3]. 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 та поверхнево активних речовин, і власне очищення за допомогою подачі ультразвукових імпульсів.

Процес промивання простий: 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).



Рисунок 3.2 – Загальна схема лабораторної установки

Потім включався реаніматор форсунок, який подавав на форсунку робочі імпульси. Причому це робилося двічі: спочатку протягом 30 секунд, потім ще протягом 60 секунд. Після кожного такого впливу залишали форсунку не вимикаючи перемішування на 10 хвилин у хімічній склянці і далі вимірювали водневий показник  $pH$  і електропровідність рідкої фази  $\sigma$  (рис. 3.3).

Як виявилось,  $pH(7,5 \pm 0,1)$  рідкої фази у процесі промивання форсунок не змінюється, а електропровідність  $\sigma$  зростає. Однак, таке зростання  $\sigma$  пов'язане не з процесом промивання, а з випаровуванням одного з компонентів розчину через великі перерви між промиваннями чергових форсунок. Так що цей недолік легко усунути.

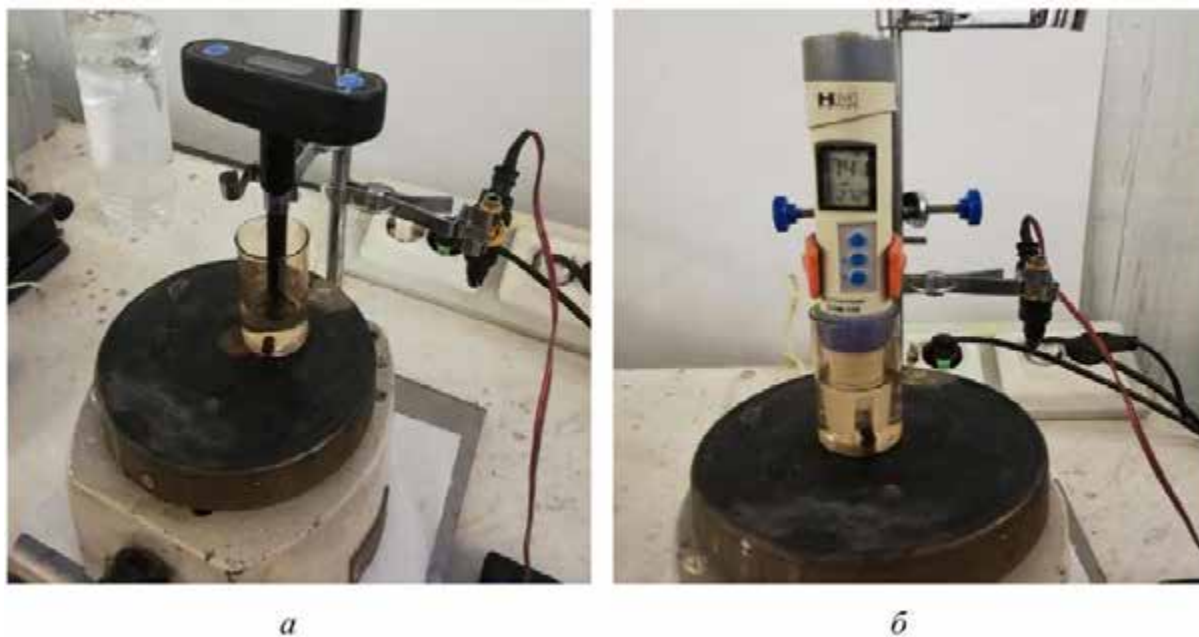


Рисунок 3.3 – Вимірювання водневого показника  $pH$  (а) та електропровідності  $\sigma$  рідкої фази (б)

З зіставлення даних табл. 3.2 випливає, що продуктивність форсунок після їх ультразвукової обробки найчастіше перевищує продуктивність до впливу на них ультразвуку. Це свідчить про необхідність проведення такої процедури обслуговування паливних форсунок.

Таблиця 3.2 – Продуктивність форсунок ( $\Phi$ ) SIEMENS DEKA ZMZ 6354 за різних режимів випробування

Стан форсунок	Продуктивність форсунок, $\text{см}^3 \cdot \text{хв}^{-1}$							
	на режимі №2				на режимі №3			
	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$
До очищення	100,0	102,0	106,0	106,0	63,9	66,7	69,4	69,4
Після очищення	106,0	106,0	106,0	106,0	66,7	68,1	69,4	69,4

Таким чином, експерименти показали, що проведення контролю продуктивності форсунок після певних напрацювань – не тільки бажано, але і необхідно. Більш 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 очищенню 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  $\pm 0,4 \dots 1\%$ .

### 3.3 Методика оцінки технічного стану форсунок

Технічний стан пристрою упорскування палива оцінювався з використанням установки АЕ&Т НР-6В (рис. 3.4). Дана установка дозволяє перевіряти технічний стан форсунок, якість розпилу з імітацією різних режимів роботи двигуна та герметичність форсунок.

Технічні характеристики установки представлені у табл. 3.3.



Рисунок 3.4 – Установа АЕ&Т «НР-6В» для оцінки технічного стану паливних форсунок

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики установки АЕ&Т «НР-6В»

1. Розмір установки:	56×56×75 см
2. Маса нетто/маса брутто:	42/56 кг
3. Потужність:	220 В змінного струму 50Гц 200 Вт
4. Діапазон тисків:	0...6,4 кг/см <sup>2</sup>
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 з кроком в 50 імпульсів.
8. Робоча частота форсунки (об/хв):	0...9950 об/хв з кроком в 50 об/хв
9. Ширина імпульсів форсунки (ІМВ):	0...20 мс з кроком в 0,1 мс

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

Герметичність форсунок перевіряли під тиском палива. У непрацюючої форсунки 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 ( $n_{\tau}$ ), ширини ( $\tau$ ) та числа імпульсів ( $N_{\tau}$ ).

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 склянці. Перевіряється форма розпилювання факелу палива.

Режим 2 – «Холостий хід». Даний режим імітує процес роботи форсунок, що тестуються на режимі холостого ходу:  $n = 650 \text{ хв}^{-1}$  («мінімум»),  $\tau = 3 \text{ мс}$ ,  $N_\tau = 2000$  імпульсів;

Режим 3 – «Максимальне навантаження». Даний режим імітує процес роботи форсунок, що тестуються, на режимі руху з підвищеним навантаженням на ДВС:  $n = 2400 \text{ хв}^{-1}$ ,  $\tau = 12 \text{ мс}$ ,  $N_\tau = 1000$  імпульсів;

Режим 4 – «Робота при високих швидкостях». Даний режим імітує процес роботи форсунок, що тестуються, на режимі руху на підвищеній швидкості:  $n = 3600 \text{ хв}^{-1}$ ,  $\tau = 6 \text{ мс}$ ,  $N_\tau = 2000$  імпульсів.

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

$$q_i = \frac{Q_i}{t}, \quad (3.1)$$

де  $Q_i$  – об'єм палива за час виміру, мл;  $t$  – час виміру, хв.

Середнє відхилення значень витрати палива ( $\Delta q_{cp}$ ) визначалося як сума середніх значень похибок вимірювань кожного режиму, поділених на кількість режимів:

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

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 табл. 3.4 наведені кількісні робочі показники форсунок до очищення, що отримані на установці НР-6В.

Таблиця 3.4 – Кількісні робочі показники форсунок SIMENS DEKA ZMZ 6354 до очищення, що отримані на установці «НР-6В»

Пробіг 40 тис. км. Siemens DEKA ZMZ 6354	Статична продуктивність, мл/хв	Динамічна продуктивність, 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
Середнє значення	126,2	12,925	90,85	83,65
Стандартне відхилення	0,69	0,15	0,98	1,34
Коефіцієнт Стьюдента ( $t$ )	3,182446305	3,1824463	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 залежність технічного стану 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 відносно зміни (відхилення від середньої величини) витрати палива.

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

В роботі Овчиннікова Г.В. зазначено, що «система управління двигуном не здатна компенсувати зростаючу нерівномірність циклових подач в комплекті форсунок, оскільки вона вносить на основі сигналу  $\lambda$  -

зонда деяку загальну, усереднену коригуючу поправку для всього комплекту 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»[6]. 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  $300 \pm 5$  кПа. У процесі проведення вимірювань тиск палива контролювався за допомогою вбудованого манометра.

В якості тестуючої рідини використовували професійну рідину LAVR Ln 2004 (рис. 3.5) для тестування бензинових форсунок на стендах. Дана рідинка забезпечує точний контроль факела розпилу, продуктивність та герметичність форсунок при використанні її на стендах.

Рідина має еталонні параметри густини та в'язкості, що відповідають ДСТУ 51866-2002 (ЄН 228-2004) «Паливо моторне. Бензин неетильований. Технічні умови (зі змінами № 1, 2, 3, 4)».



Рисунок 3.5 – Рідина LAVR Ln 2004

Рідина підходить для тестування всіх типів форсунок: EURO, ASIA, USA, в тому числі в режимах з підвищеним тиском і високою частотою відкриття форсунки. Вона абсолютно безпечна для форсунок, гумових ущільнювачів та обладнання, не токсична, не має вираженого запаху, важко

запалюється. Не поєднується з очищувачами, не випаровується і максимально довго зберігає функціональні властивості. До складу рідини входять аліфатичні вуглеводні, коректор в'язкості та барвник.

#### 3.4 Методика очищення форсунок в ультразвуковій ванні

Очищення форсунок проводилося в ультразвуковій ванні. Для очищення використовувалося наступне обладнання, прилади та матеріали:

- ультразвукова ванна Ultrasonic Cleaner (рис. 3.6);
- установка АЕ&Т «НР-6В» для оцінки технічного стану паливних форсунок;
- для видалення смолистих, лакових і нагарних відкладень використовували професійну очищувальну рідину LAVR Ln 2003.



Рисунок 3.6 – Ультразвукова ванна «Ultrasonic Cleaner»

Ультразвуковий генератор ультразвукової ванни має функцію автопідстроювання частоти та 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 поверхонь, 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 поверхням, що сполучаються, очищає їх.

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

Порядок проведення лабораторних експериментів наведено нижче.

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

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

3. Підключили живлення до всіх форсунок через роз'єм для живлення.

4. Запустили ультразвуковий випромінювач за рахунок перемикання тумблера активації ванни в позицію «Ввімкнено». Тумблер розташований на задній поверхні корпусу ультразвукової ванни.

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

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

7. Активували кнопку «Старт» на панелі керування ультразвуковою ванною. Таким чином буде задіяно зворотний відлік.

8. Дочекатися, коли значення таймера досягне нуля. Таким чином, процес очищення вважається закінченим. У разі необхідності процес очищення можна перервати в будь-який момент часу за допомогою кнопки

«Стоп» (вона розташована на корпусі ультразвукової ванни), або за допомогою переведення тумблера активації ванни в позицію «Вимкнено».

9. Вийняти форсунки, а потім протерти дані пристрої м'якою ганчіркою з метою усунення залишків рідини для повного очищення деталей. Далі слід провести продування за допомогою компресора.

В якості очищувальної рідини використовували професійну рідину LAVR Ln 2003 (рис. 3.7) для видалення смолистих, лакових і нагарних відкладень.



Рисунок 3.7 – Рідина для очищення форсунок LAVR Ln 2003

До складу рідини входить: суміш неіоногенних та катіонних поверхнево-активних речовин (ПАВ) < 5%, тринатрій нітрilotріацетат < 5%, хелатуючі компоненти < 5%, ефіри гліколів 5-15%, регулятор рН < 5%, дистильована вода.

3.5 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, для чого використовувався цифровий мікроскоп Levenhuk DTX 90 [8, 9, 10].

Форсунки експлуатувалися у силових агрегатах автомобілів ГАЗ-27040 V (Газель «Фермер»). Дослідження проводили на комплекті форсунок

(знятих 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, основою з вимірювальною шкалою та двома затискачами для закріплення зразка (форсунок).

Мікроскоп дозволяє отримувати знімки високої якості. Підключається до комп'ютера або ноутбука через порт USB 2.0. Обробка зображення здійснюється за допомогою програми захоплення зображення, що входить до стандартної комплектації.

Параметри мікроскопа Levenhuk DTX 90 наведено у табл. 3.5, а зовнішній вигляд представлений на рис. 3.8.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики цифрового мікроскопа Levenhuk DTX 90

Тип мікроскопу:	цифровий
Тип насадки:	цифровий дисплей/монітор ПК
Матеріал оптики:	оптичне скло
Збільшення, крат:	10...300
Фокусування:	ручне, в межах от 0 мм до 150 мм
Підсвітка:	світлодіодна
Регулювання яскравості:	присутнє
Джерело живлення:	5 В постійного струму через кабель USB 2.0
Число мегапікселів:	5
Можливість запису відео:	присутня

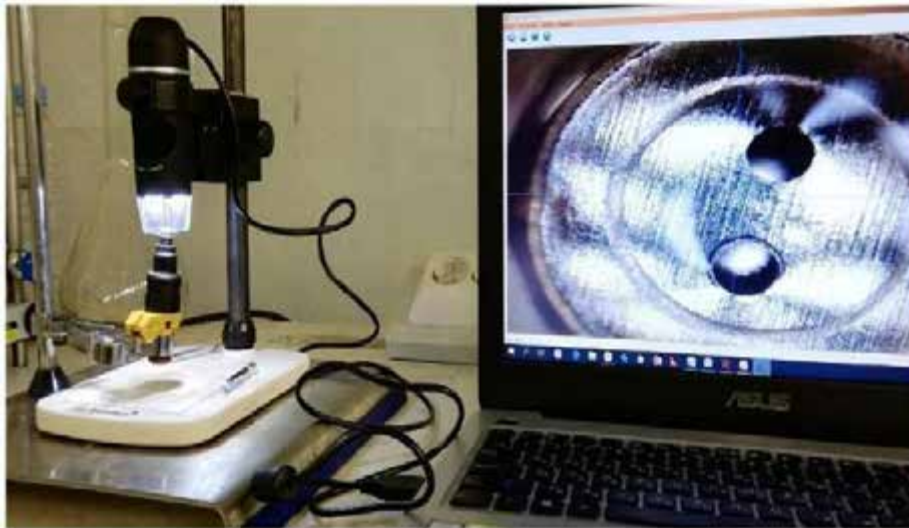





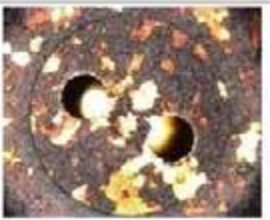
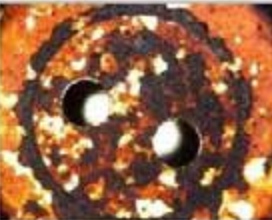







Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд цифрового мікроскопа Levenhuk DTX

90

За допомогою мікроскопа було отримано серію фотографій соплових отворів, найбільш характерні з яких представлені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Фотографії соплових отворів нових форсунок та форсунок з пробігом 40 тис. км. до та після впливу ультразвуку

Фотографія соплових отворів нових форсунок			
			
Фотографія соплових отворів форсунок з пробігом 40 тис. км до очищення в УЗВ			
			
Фотографія соплових отворів форсунок з пробігом 40 тис. км після очищення в УЗВ впродовж 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 пов'язано з протікаючим у процесі тривалої експлуатації форсунок кавітаційним зношуванням соплових отворів.

Наслідком такого впливу є зношування, виражене не тільки у зміні форми і кута вихідної 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 таке зношування описане в роботі Овчинникова Г.В. Показано, що крім розпилювача, знос спостерігається у місці сполучення голки та сідла у проточній частині форсунки.

Зношується як контактна поверхня самої голки, так 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.

В роботі Мачалкіна Ю.М., автор вважає, що порівнювати чистоту поверхні (до і після очищення) треба з еталоном, оскільки це дозволяє якнайшвидше оцінити якість мийно-очисних робіт. Мачалкіним Ю.М. було виявлено «...що за ступенем забрудненості характерних зон на голці розпилювача можна з достатньою точністю визначити забрудненість розпилювача в цілому та оцінити якість очищення. Виходячи з цього, розроблено методика візуальної оцінки ступеня чистоти поверхонь розпилювачів форсунок, засновану на високій роздільній здатності людського ока» [6].

Крім запропонованої в роботі [12] 10-бальної системи оцінки чистоти металевих поверхонь деталей сільськогосподарської техніки існує і 5-бальна шкала. За бал приймається певна кількість залишкових забруднень.

В п'ятибальній шкалі 1 бал відповідає найбільш забрудненим поверхням, на яких повинен бути щільний наліт чорного кольору, а чиста поверхня без нальоту сріблясто-сірого кольору (колір металу) оцінюється 5 балами.

За результатами проведених експериментів проведено оцінку впливу ультразвукового очищення на якість очищення розпилювачів форсунок.

Якість очищення, що максимально досягається, склала 4,92 бали. 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 в 15 хвилин.

### 3.6 Методика оцінки енергетичних характеристик двигуна на роликовому стенді CARTEC LPS 2510

Порівняльні випробування проводилися на роликовому стенді CARTEC LPS 2510 з однією ведучою віссю [4, 8, 9, 10, 11, 12].

Стенд дозволяє моделювати рух транспортного засобу та контролювати його динамічні характеристики при різних швидкісних режимах та навантаженнях. Принцип дії стенду заснований на вимірюванні потужності двигуна транспортного засобу в залежності від лінійної швидкості і тягового зусилля, що виникає на ведучих колесах. Під час руху автотранспортного засобу на роликах стенда, навантаження на колеса визначається за допомогою електродинамічних гальм (ЕДГ). Сигнали з датчика числа обертів роликів надходять у процесор електронної системи, де відбувається обчислення лінійної швидкості руху автомобіля. Одночасно обертання роликів передається на ротор ЕДГ. При цьому в обмотці статора ЕДГ наводяться вихрові струми, і електромагнітні сили, що відповідають

цим струмам, створюють зусилля на динамометрі, пружний елемент якого пов'язаний зі статором.

Сила впливу на динамометр служить для визначення тягового зусилля ведучих коліс при заданій швидкості руху. За допомогою ЕДГ моделюються будь-які умови навантаження при русі автомобіля. Потужність двигуна вимірюється непрямим методом, як функція лінійної швидкості автомобіля та тягового зусилля на його ведучих колесах [4, 5, 9].

Роликовий потужнісний стенд дозволяє оцінити: крутний момент двигуна; потужність двигуна; потужність на ведучих колесах; величину втрати потужності у трансмісії; швидкість автомобіля; частоту обертання колінчастого валу двигуна.

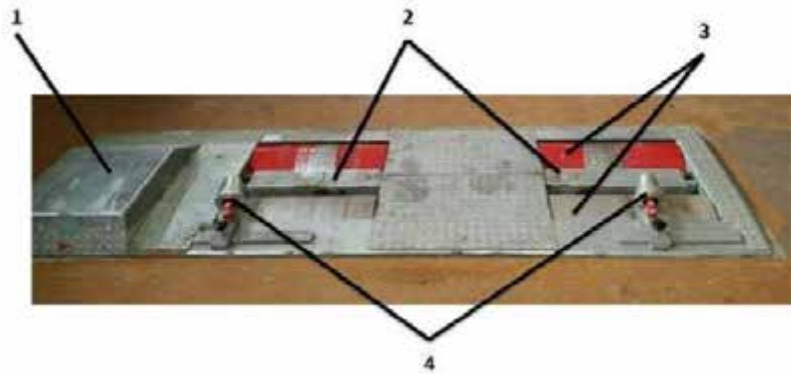
Об'єктом випробувань є автомобіль ГАЗ 27040V «Фермер» (рис. 3.9) з двигуном ЗМЗ-4062.10.



Рисунок 3.9 – Стенд з біговими барабанами та ГАЗ 27040V «Фермер»

### 3.6.1 Конструктивні особливості стенду та розміщення вимірювального обладнання

Потужносний стенд – це випробувальна платформа (рис. 3.10), в яку інтегровані роликові агрегати, електродинамічне гальмо (рис 3.11), пневматичний підйомний пристрій та обмежувачі бокового зміщення.



1 – електродинамічне гальмо; 2 – пневматичний підйомний пристрій;  
3 – роликові агрегати; 4 – обмежувачі бічного зміщення

Рисунок 3.10 – Роликовий стенд для легкових автомобілів з однією ведучою віссю LPS 2510



Рисунок 3.11 – Електродинамічне гальмо

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



1 – силова шафа; 2 – стійка керування з комплектом ПК; 3 – вентилятор для підлоги

Рисунок 3.12 – Окремі елементи стенду

У стійці керування встановлений блок керування, персональний комп'ютер (ПК) із програмним забезпеченням MS Windows. До персонального комп'ютера підключено принтер. Управління всіма функціями стенду здійснюється за допомогою інфрачервоного (IR) пульта дистанційного керування або з клавіатури ПК.

Для реєстрації обертів колінчастого валу двигуна використовували цанговий затискач (рис. 3.13). Сигнал обертів знімається з високовольтного (свічкового чи 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, в електроімпульси.

Для визначення температури оливи та контролю її під час проведення вимірювань використовувався температурний датчик. Датчик температури оливи розміщувався в гніздо масляного щупа. Попередньо була відрегульована довжина зонда за допомогою пересувного конуса таким чином, щоб його довжина дорівнювала довжині масляного щупа (рис. 3.14).



Рисунок 3.13 – Цанговий затискач



Рисунок 3.14 – Регулювання датчика температури по довжині масляного щупа

Під час проведення випробувань використовувалася система видалення вихлопних газів, що складається з гнучкого настінного місцевого витяжного пристрою (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Витяжний пристрій для відведення відпрацьованих газів

Програмне забезпечення стенду має головну програму та ряд підпрограм. В залежності від вибраної підпрограми, виміряні значення відображаються у графічній та (або) табличній формі. Програмне забезпечення стенду дозволяє відобразити результати одночасно до 10 випробувань у різних формах.

За допомогою головної програми здійснюється керування рухомою парою роликів, пневматичним підйомним пристроєм, вентилятором, а також виконується перехід до підпрограм (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Головна програма

Вимірювання максимальної потужності та максимального моменту проводили у програмі  $P - max$  та  $V - const$ .

*Налаштування підпрограм  $P - max$ .*

Підпрограма  $P - max$  забезпечує вимірювання прискорення для визначення максимальної потужності і максимального моменту.

У головній формі програми вибирається підпрограма  $P - max$ , в результаті з'являється меню налаштувань випробувань, далі здійснюється налаштування випробування (рис. 3.17).

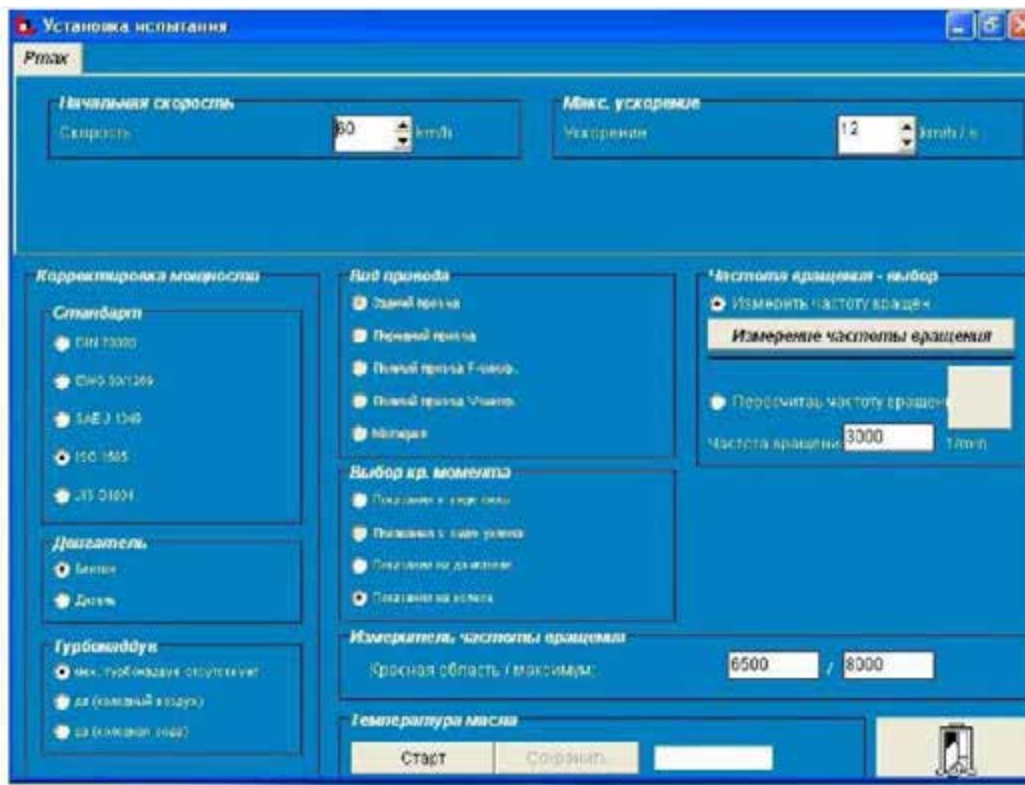


Рисунок 3.17 – Підпрограма *P – тах*

Вибираються параметри, наведені нижче.

Початкова швидкість – швидкість, з якою потужніший стенд почне вимірювання (стартова швидкість). Початкову швидкість (стартову швидкість) необхідно встановити на 5...10 км/год більше, ніж швидкість, при якій буде включена пряма передача.

Максимальне прискорення – встановлюється прискорення, яке обмежуватиме система. Як правило, для легкових автомобілів встановлюється максимальне прискорення у межах від 10 до 15.

Вимірювання частоти обертання – встановлюється червона область/максимум значень обертів двигуна. Під час проведення випробувань значення обертів двигуна не повинні перевищувати встановленої межі.

Вимірювання частоти обертання – натисканням на ярлик, відкривається панель, де відображаються оберти колінчастого валу двигуна. Кількість обертів двигуна відобразиться у вигляді цифр та показань стрілочного індикатора.

Коректне відображення кількості обертів двигуна пов'язане з вибором числа циліндрів двигуна. Відображення кількості обертів припиняється натисканням на ярлик «СТОП».

#### *Налаштування підпрограми $V - const$ .*

Підпрограма  $V - const$  забезпечує випробування при фіксованій, довільно заданій швидкості.

У режимі  $V - const$  потужнісний стенд управляється таким чином, щоб швидкість руху залишалася постійною, незалежно від тягового зусилля (від малого до повного газу), що розвивається автомобілем. Це імітація руху автомобіля зі швидкістю, що не перевищує задане значення. З натисканням на педаль «газу» збільшується тільки ефективність ЕДГ стенду, але не швидкість автомобіля.

У головній формі програми вибирається підпрограма  $V - const$ , в результаті з'являється меню налаштувань випробувань, де здійснюється налаштування випробування (рис. 3.18).

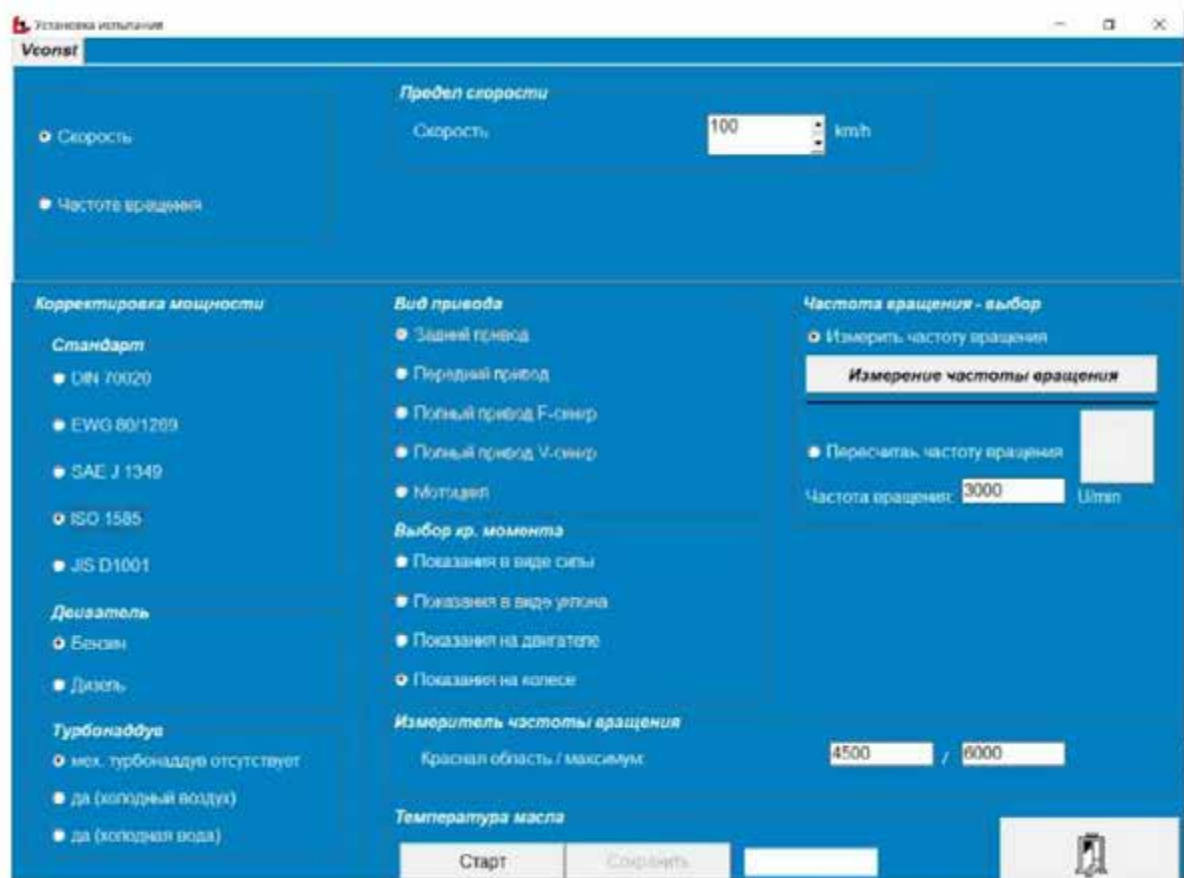


Рисунок 3.18 – Підпрограма  $V - const$

Вибираються параметри, наведені нижче.

Межа швидкості – максимально допустима межа обмеження швидкості.

Вимірювання частоти обертання – встановлюється червона область/максимум значень обертів двигуна. Під час проведення випробувань значення обертів двигуна не повинні перевищувати встановленої межі.

Вимірювання частоти обертання – натисканням на ярлик, відкривається панель, де відображаються оберти колінчастого валу двигуна. Кількість обертів двигуна відобразиться у вигляді цифр та показань стрілочного індикатора.

Коректне відображення кількості обертів двигуна пов'язане з вибором числа циліндрів двигуна. Відображення кількості обертів припиняється натисканням на ярлик «СТОП».

Коригування потужності та крутного моменту – з метою порівняння результатів, отриманих у режимі випробувань  $P - max$  і  $V - const$  зі стандартними значеннями, отримані результати повинні бути скориговані у відповідність до вимог одного зі стандартів.

Корекція потужності та крутного моменту двигуна при випробуваннях на потужнісному стенді провадиться у відповідність до стандартів: DIN 70020 (Німецький інститут стандартизації), EEC 80/1269 (стандарт Європейського Союзу), ISO 1585 (Міжнародна організація зі стандартизації), SAE J1349 (Товариство інженерів автомобільної промисловості США), JIS D1001 (Японський промисловий стандарт).

Це коригування необхідне з наступних причин. Показники двигуна залежать від атмосферних умов (тиску, температури та вологості повітря). Так, при зменшенні температури та збільшенні тиску зростає густина, а отже, і маса заряду, що надійшов у циліндр, що призводить до підвищення потужності двигуна. Крім того, атмосферні умови впливають на перебіг робочих процесів двигуна. Для того, щоб мати можливість зіставляти

результати випробувань, проведених у різний час і, отже, за різних атмосферних умов і для порівняння результатів з даними технічних характеристик двигунів, потужнісні показники прийнято приводити до певних атмосферних умов [4].

### 3.6.2 Методика проведення експериментальних досліджень

Перед випробуванням перевіряється рівень оливи у двигуні. Для зменшення плями контакту шини з роликом, тиск у шинах має бути вище рекомендованого виробником автомобіля. Для забезпечення коректного експерименту вимикаються усі додаткові споживачі. На момент початку випробувань двигун прогрівався до робочої температури.

Згідно з методикою експерименту, якої ми дотримувалися, автомобіль має бути встановлений на бігові барабани задньою віссю. Автомобіль розташовується перпендикулярно роликам стенду. Проводиться фіксація автомобіля за допомогою натяжних ременів. Регулюються відбійні ролики, відстань від колеса до ролика була 5...8 см. Відбійні ролики повинні розташовуватися таким чином, щоб вони не торкалися коліс автомобіля. Відбійні ролики фіксуються за допомогою ручних фіксаторів.

Вільні кінці ременів для фіксації автомобіля не повинні потрапляти під колеса автомобіля або ролики стенда. Цю умову необхідно дотримуватись та контролювати при включенні вентилятора.

#### Підпрограма *P – max*.

За мінімально можливий проміжок часу (при мінімально можливих швидкостях обертання двигуна та швидкості руху автомобіля) необхідно вийти на пряму передачу. Як тільки пряма передача вмикається, автомобіль імітує максимальне прискорення (режим «педаль у підлогу»). Під час випробувань система обмежує максимальне прискорення значенням, вибраним у налаштуваннях випробувань. При досягненні стрілкою тахометра автомобіля червоної зони значень обертів двигуна, або після перевищення максимальної потужності даного автомобіля, необхідно витиснути зчеплення і дати ведучим колесам вільно обертатися до зупинки.

Не можна відпускати зчеплення та якимось іншим способом здійснювати гальмування обертання ведучих коліс, оскільки це призведе до некоректних результатів вимірювань у зв'язку з неправильним режимом розрахунку втрат на потужність. У цьому режимі показники двигуна визначаються при режимі роботи двигуна, що не встановився.

Підпрограма  $V - const$ .

Автомобіль прискорюється, досягає необхідної передачі, в нашому випадку виходячи на пряму передачу. Далі долається встановлена межа швидкості при положенні педалі газу (режим «педаль у підлогу»). При досягненні бажаної потужності необхідно забезпечити нерухоме положення педалі.

При такому алгоритмі дій вимірювані значення стабілізуються в межах  $\pm 2\%$  і автоматично зберігаються. Зазначені дії повторюються з різними межами швидкостей.

У підпрограмі  $V - const$  реалізується режим роботи двигуна, що встановився. Це режим, при якому крутний момент, частота обертання, температура охолоджуючої рідини, температура оливи, а для двигунів повітряного охолодження і температура двигуна, змінюються за час вимірювання не більше ніж на  $\pm 2\%$ .

Таким чином, повторюючи випробування з різними межами швидкостей при повній подачі палива (режим «педаль у підлогу») на прямій передачі, ми за отриманими даними отримували зовнішню швидкісну характеристику двигуна.

Випробування проводили відповідно до ДСТУ 26899-86 «Стенди роликові для визначення параметрів тягово-швидкісних властивостей та паливної економічності автомобілів та колісних тракторів в умовах експлуатації. Загальні технічні вимоги» та ДСТУ 14846-81 «Двигуни автомобільні. Методи стендових випробувань» [8, 9, 10].

### 3.6.3 Результати випробувань та їх аналіз

Було проведено не менше 5 випробувань двигуна автомобіля Газель, укомплектованого неочищеними ультразвуком форсунками, а також форсунками після впливу на них ультразвуку. Зміни потужності ( $N$ ) і крутного моменту ( $M$ ) в залежності від частоти обертання колінчастого валу оцінено з використанням алгоритму обробки даних, що застосовується в математичній статистиці, наукових дослідженнях та розрахунках надійності виробів [1, 6].

Після пошуку максимального та мінімального значень частоти обертання колінчастого валу ( $n_v$ ) розраховувався розмах:

$$\Delta x = x_{\max} - x_{\min}, \quad (3.3)$$

де  $x_{\max}$  – максимальне значення частоти обертання колінчастого валу;  $x_{\min}$  – мінімальне значення частоти обертання колінчастого валу.

Далі визначалося число інтервалів ( $k$ ), на які можна розбити, представлені в колонці табличного протоколу випробувань значення  $n_v$ :

$$k = 1 + 3,32 \lg(N_{cm}), \quad (3.4)$$

де  $N_{cm}$  – число значень параметра  $n_v$ .

Для розрахунку значення інтервалу (кроку)  $\delta$  використовувалась формула Стеджерса:

$$\delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,32 \lg(N_{cm})}, \quad (3.5)$$

В результаті такої обробки отримано 10 інтервалів значень частоти обертання колінчастого валу. Далі розраховували для величин потужності та крутного моменту, укладених у кожному інтервалі, їхню середню величину.

Отримані таким чином 5 значень (5-разові випробування) усереднювали (інтервал частот обертання колінчастого валу 2000...5200 об/хв). Далі розраховувалися середні значення  $\tilde{x}$  потужності та крутного моменту для п'яти значень.

Обробка даних проводилася за допомогою наступних формул.

Для розрахунку середнього арифметичного значень потужності та крутного моменту використовувалася формула:

$$\tilde{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (3.6)$$

Далі визначалися дисперсія, стандартне відхилення та похибки вимірювання за допомогою наступних формул:

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2}{n-1} \text{ – дисперсія}; \quad (3.7)$$

$$S_{\tilde{x}} = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}} \text{ – стандартне відхилення оцінки, } \tilde{x}; \quad (3.8)$$

$$\Delta x = t_{\gamma} s_{\tilde{x}} \text{ – похибка вимірювання (значимість } \gamma = 0,05, t_{\gamma} = 2,78). \quad (3.9)$$

В результаті обробки даних, отриманих у програмі *P-max*, були побудовані криві потужності та крутного моменту (рис. 3.19 та 3.20).

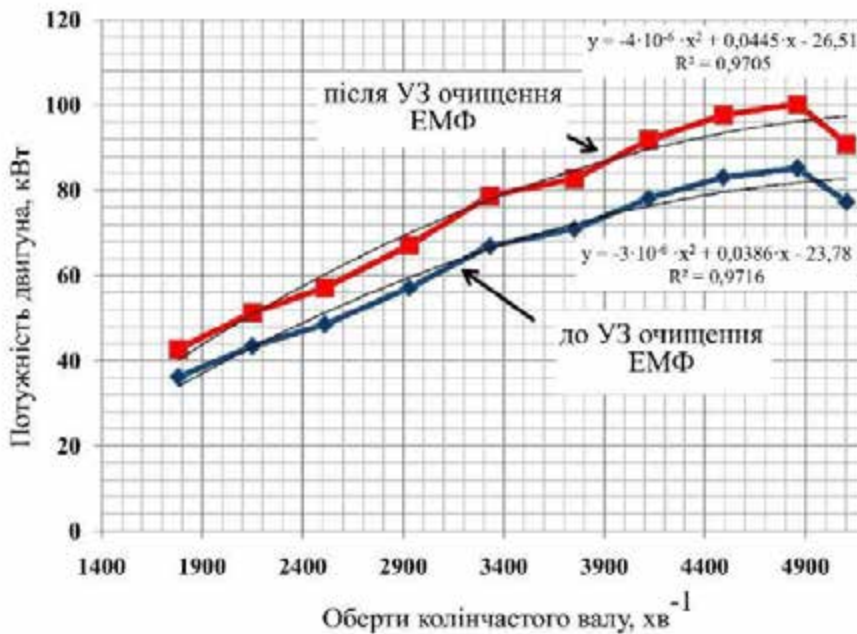


Рисунок 3.19 – Залежність потужності від оберти колінчастого валу до та після очищення форсунок в ультразвуковій ванні (отримано в підпрограмі *P-max*)

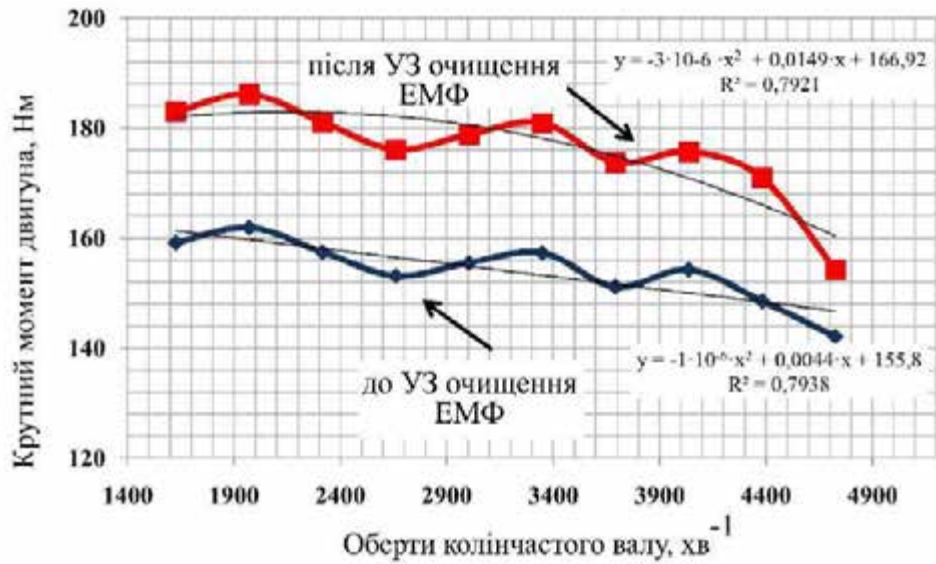


Рисунок 3.20 – Залежність крутного моменту від обертів колінчастого валу до та після очищення форсунок в ультразвуковій ванні (отримано в підпрограмі *P – max*)

### 3.7 Методика оцінки екологічних показників двигуна

Для дослідження змін забруднюючих речовин у відпрацьованих газах, використовувався газоаналізатор Інфракар М-2Т.01 (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Зовнішній вигляд газоаналізатора Інфракар М-2Т.01

Прилад призначений для вимірювання об'ємної частки оксиду вуглецю (CO), вуглеводнів (CH), діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>), кисню (O<sub>2</sub>). У газоаналізаторі є канали для вимірювання частоти обертання колінчастого валу двигуна та температури двигуна, здійснюється розрахунок коефіцієнта надлишку повітря.

Прилад складається із системи пробовідбору та пробопідготовки, вимірювального та електронного блоків. Конструктивно газоаналізатор виконується в металевому корпусі, призначеному для встановлення на горизонтальній поверхні (столі).

Система пробовідбору та пробопідготовки газоаналізатора включає газозабірний зонд, пробовідбірний шланг, бензиновий фільтр, 2-х камерний насос, клапан пневматичний, краплевідбійник та три фільтри тонкого очищення. Каплевідбійник у нижній частині з'єднаний зі штуцером для автоматичного зливу конденсату.

Принцип дії датчиків об'ємної частки (CO, CO<sub>2</sub>, вуглеводнів CH) – оптико-абсорбційний.

Принцип дії датчиків вимірювання концентрації кисню (O<sub>2</sub>) – електрохімічний.

Принцип дії датчиків частоти обертання колінчастого валу ґрунтується на індуктивному методі визначення частоти обертання імпульсів струму в системі запалювання.

Вимірювальний блок містить оптичний блок, в якому є випромінювач, вимірювальна кювета, чотири піроелектричних приймача випромінювання, перед яким розміщені чотири інтерференційні фільтри. Випромінювач працює в пульсуючому режимі.

#### *Підготовка приладу до роботи.*

Встановили пристрій на горизонтальній поверхні. До роз'єму на задній панелі підключили кабель живлення 220 В. До штуцера «Злив» приєднали трубку для збирання конденсату. До штуцера «Вхід» приєднали

бензиновий фільтр через коротку трубку з ПВХ. До фільтру приєднали пробовідбірний шланг із газозабірним зондом.

До гнізда на задній панелі підключили кабель з датчиком тахометра, датчик приєднали до високовольного дроту 1 свічки.

Для графічного відображення та обробки показань через програму «ІНФРАКАР-ГРАФІЧНИЙ» версії 1.2.1.0 до гнізда на задній панелі через інтерфейс RS 232 підключали пристрій до ноутбука (рис. 3.22).



Рисунок 3.22 – Газоаналізатор Інфракар М-2Т.01, підключений до ноутбука

*Підготовка до проведення вимірювань.*

Перед вимірюванням двигун автомобіля повинен бути прогрітий до температури не нижче робочої температури моторної оливи або охолоджувальної рідини, зазначеної в інструкції з експлуатації автомобіля, але не нижче 60°C.

Після прогрівання двигуна встановлюється важіль коробки в нейтральне положення. Далі підключаються датчики тахометра та вимірювача температури оливи.

Встановлюється пробовідбірний зонд газоаналізатора у випускную трубу автомобіля на глибину не менше 300 мм від найбільш заглибленої точки зрізу труби.

Всі канали приладу налаштовуються на нуль, натисканням відповідної кнопки.

Кнопка на тахометрі «4/2 такту» натискається та утримується.

Таким чином, встановлюється тип двигуна, до якого підключається прилад.

Встановлюється трубка на з'єднання зливу конденсату для відбору вологи від приладу. Щуп вставляється у вихлопну трубу для відбору проби відпрацьованих газів. Підключається кабель мережі. Перевіряється з'єднання температурного, індукційного датчика, а також перевіряється заземлення розетки.

#### *Проведення вимірів.*

Вимірювання проводиться в наступному порядку:

– запускається двигун, збільшення частоти обертання колінчастого валу двигуна до підвищеного значення обертів (2500 об/хв) здійснюється натисканням на педаль управління дросельною заслінкою. Робота у вказаному режимі повинна тривати не менше 15 с;

– відпускається педаль управління дросельною заслінкою, встановлюється мінімальна частота обертання валу двигуна (850 об/хв) і не раніше ніж через 30 с вимірюється вміст оксиду вуглецю та вуглеводнів;

– встановлюється підвищена частота обертання валу двигуна (2500 об/хв) і не раніше ніж через 30 с вимірюється вміст оксиду вуглецю та вуглеводнів.

Замір концентрації відпрацьованих газів на газоаналізаторі проводився через кожну секунду. В результаті було отримано таблицю чисел (рис. 3.23), яка відображає концентрацію CO, CH через кожну секунду часу.

CO	CH	CO2	O2	lamb	n	Time
5,68	190	9,62	2,30	0,930	2060	00:00:00
5,68	190	9,62	2,33	0,930	2070	13:32:38
5,67	190	9,62	2,33	0,932	2070	13:32:39
5,68	190	9,62	2,33	0,932	2080	13:32:40
5,67	190	9,62	2,33	0,932	2080	13:32:41
5,67	190	9,62	2,33	0,932	2080	13:32:42
5,67	190	9,62	2,33	0,932	2070	13:32:43
5,67	190	9,62	2,33	0,932	2080	13:32:44
5,66	190	9,62	2,33	0,932	2080	13:32:45
5,66	190	9,60	2,33	0,932	2080	13:32:46

Рисунок 3.23 – Табличний протокол випробувань на газоаналізаторі

Випробування проводилися відповідно до ДСТУ 52033-2003 «Автомобілі з бензиновими двигунами. Викиди забруднюючих речовин із відпрацьованими газами. Норми та методи контролю при оцінці технічного стану (зі зміною № 1)».

Цей стандарт встановлює нормативні значення вмісту у відпрацьованих газах автомобілів оксиду вуглецю та вуглеводнів, а також методи контролю при оцінці технічного стану систем автомобіля та двигуна.

Дані, що були отримані, представлені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Вміст ( $C_{CO}$ ,  $C_{CH}$ ) у відпрацьованих газах оксиду вуглецю (CO) та продуктів неповного згоряння палива (CH) при роботі двигуна ЗМЗ-406 автомобіля ГАЗ-27040 V (без нейтралізатора) у режимі холостого ходу

Газ	Паливо: бензин			
	$n = 850 \text{ об} \cdot \text{хв}^{-1}$		$n = 2500 \text{ об} \cdot \text{хв}^{-1}$	
	до промивання ЕМФ	після промивання ЕМФ ультразвуком	до промивання ЕМФ	після промивання ЕМФ ультразвуком
CO, %	1,764±0,003	0,618±0,006	2,377±0,004	1,577±0,008
CH, %	$(170,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(117,3 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$	$(186,2 \pm 3,1) \cdot 10^{-6}$	$(128,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-6}$

## РОЗДІЛ 4 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ РОЗПИЛЮВАЧІВ ФОРСУНОК

### 4.1 Розробка технологічного процесу очищення розпилювачів форсунок миючим розчином в ультразвуковому полі

На підставі проведених теоретичних та експериментальних (в лабораторних та виробничих умовах) досліджень розроблено новий технологічний процес ультразвукового очищення розпилювачів форсунок на ремонтних підприємствах АПК.

Технологія ультразвукового очищення розпилювачів розроблена відносно процесу очищення форсунок на спеціалізованих підприємствах. Технологічна схема організації процесу очищення розпилювачів ЕМФ представлена на рис. 4.1.

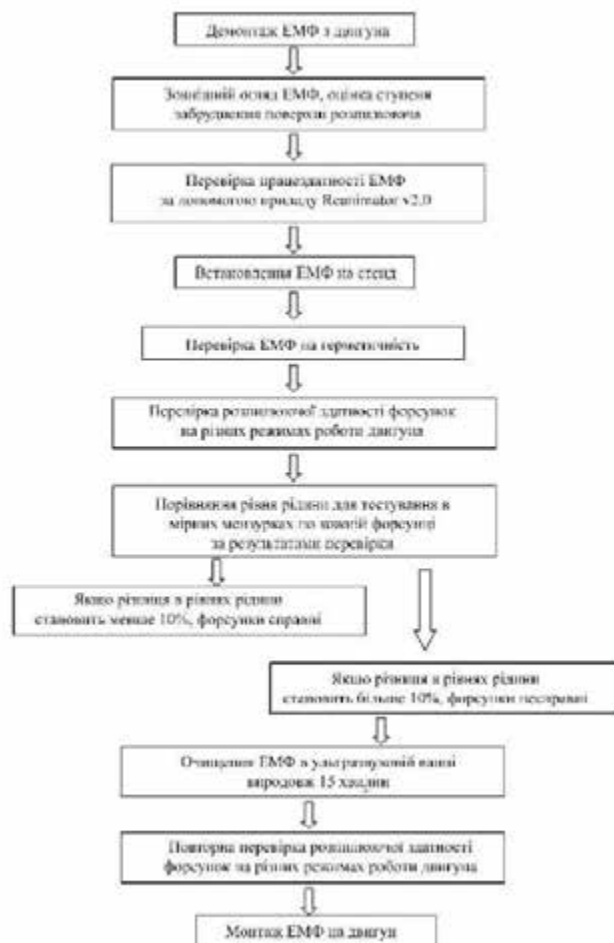


Рисунок 4.1 – Технологічна схема організації процесу очищення розпилювачів ЕМФ

Основні етапи процесу: приймання ЕМФ; перевірка працездатності ЕМФ; перевірка параметрів ЕМФ; очищення ЕМФ. Основні контрольовані параметри: якість розпилу палива, герметичність, продуктивність.

#### 4.2 Визначення періодичності технічного обслуговування паливної апаратури двигуна ЗМЗ-4062.10

Розрахунок періодичності технічного обслуговування проводився за методикою, запропонованою професором Денисовим А.С. [3].

При визначенні періодичності технічного обслуговування паливної апаратури (ПА) двигуна ЗМЗ-4062.10 також використовувався техніко-економічний метод, в якому передбачається оптимізація за мінімумом сумарних питомих витрат на технічні обслуговування ( $TO_{TA}$ ) та поточні ремонти ( $TP_{TA}$ ). Попередньо визначалася вартість технічного обслуговування  $TO_{TA}$  двигуна ЗМЗ-4062.10 для організації, що розглядається:

$$TO_{TA} = Z_{з/н} + Z_n + Z_a, \quad (4.1)$$

де  $Z_{з/н}$  – заробітна плата працівника, грн.;  $Z_n$  – податкові відрахування, грн.;  $Z_a$  – амортизаційні витрати, грн.

Про оптимальність періодичності обслуговування ( $l$ ) свідчать мінімальні питомі витрати. Питомі витрати на діагностування автомобіля, згідно з методикою, визначаються за формулою:

$$C'_{TO_{TA}} = \frac{TO_{TA}}{l}, \quad (4.2)$$

де  $l$  – періодичність ТО, км;  $TO_{TA}$  – разові витрати на технічне обслуговування автомобіля, грн.

При розрахунку оптимальної періодичності ТО необхідно враховувати, що збільшення пробігу до проведення ТО впливає на ймовірність відмови елементів двигуна і збільшує питомі витрати на ТО і ремонт.

Виходячи з цього, мінімальні сумарні питомі витрати визначаються за такою формулою:

$$C_{\Sigma} = C'_{TO_{TA}} + C'_{TP}. \quad (4.3)$$

Для знаходження оптимальної періодичності технічного обслуговування було взято середні показники обсягу оплати праці автослюсаря-діагноста по Київській області за 2023 рік  $Z_{з/н} = 200$  грн/год, видатки по податках  $Z_n = 50$  грн/год, видатки на амортизацію  $Z_a = 0,2\%$  % вартості обладнання.

За даними, питомі витрати на  $TO_{TA}$  та  $TP$  з урахуванням періодичності технічного обслуговування, будується відповідна їм регресійна залежність, що має такий вигляд:

$$C_{\Sigma} = a_1 l^3 + a_2 l^2 + a_3 l + a_4, \quad (4.4)$$

де  $a_i$  – коефіцієнт регресії,  $a_1 = 0,0037$ ;  $a_2 = 0,1259$ ;  $a_3 = -0,1259$ ;  $a_4 = 1,2311$ .

Регресійна залежність (4.4) та дані експерименту щодо визначення сумарних питомих витрат на  $TO_{TA}$  та  $TP$  від періодичності технічного обслуговування у формі графіка наведена на рис. 4.2.

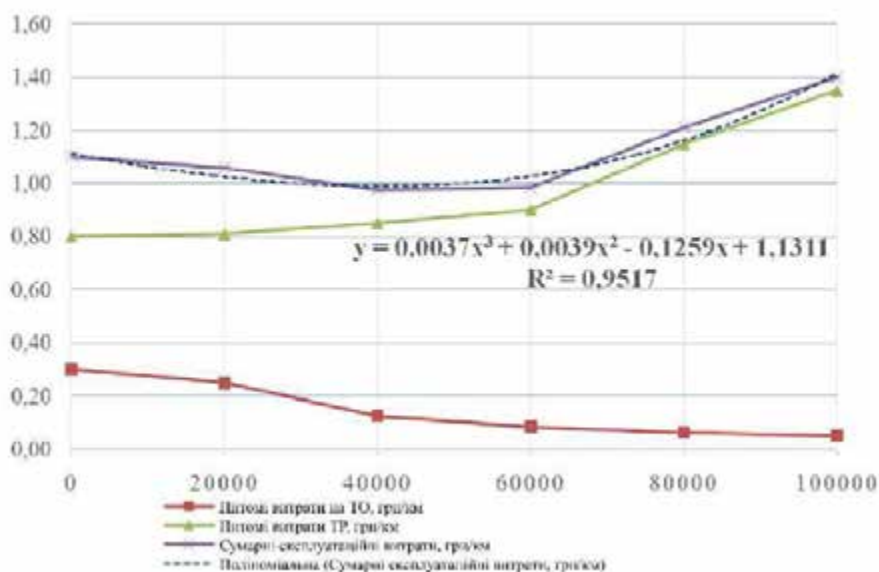


Рисунок 4.2 – Залежність питомих та сумарних витрат на ТО та ТР від періодичності технічного обслуговування

При аналізі отриманих даних видно, що мінімальні сумарні питомі витрати, залежно від категорії умов експлуатації, зберігаються при періодичності технічного обслуговування автомобіля 38000...41000 км, тому для скорочення витрат доцільно включити роботи з технічного обслуговування двигуна ЗМЗ-4062.10 до складу робіт за ТО-2, періодичність якого для Київської області (2-я категорія умов експлуатації) складає 40 000 км.

## ВИСНОВКИ

Аналітично обґрунтовано залежність витрати палива від пробігу при забрудненні соплових отворів ЕМФ, що характеризує технічний стан сучасних двигунів внутрішнього згоряння автомобілів, які працюють в АПК.

Зі збільшенням напрацювання під час забруднення соплових отворів ЕМФ збільшується відхилення витрати палива до 25,2%. Отримано поліноміальне рівняння середнього значення витрат палива від пробігу.

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

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.

Встановлено, що 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.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kuan, W.-H.; Hu, C.-Y.; Ke, L.-W.; Wu, J.-M. A Review of On-Site Carwash Wastewater Treatment. *Sustainability* 2022, 14, 5764.
2. Moazzem, S.; Wills, J.; Fan, L.; Roddick, F.; Jegatheesan, V. Performance of ceramic ultrafiltration and reverse osmosis membranes in treating car wash wastewater for reuse. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018, 25, 8654–8668.
3. Monney, I.; Donkor, E.A.; Buamah, R. Clean vehicles, polluted waters: Empirical estimates of water consumption and pollution loads of the carwash industry. *Heliyon* 2020, 6, e03952.
4. Angelakis, A.N.; Gikas, P. Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states. *Water Util. J.* 2014, 8, 67–78.
5. Elgaali, E.; Akram, M. Recycling and Reuse of Wastewater Generated in Car-Washing Facilities. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* 2021, 6, 521–525.
6. Mujumdar, M.M.; Rajagolkar, S.P.; Jadhav, P. Treatment of vehicle washing waste water for maximum reuse of treated water and reduce fresh water consumption. *Int. J. Recent Res. Asp.* 2020, 7, 1–5. Available online: <https://www.academia.edu/43768187> (accessed on 17 September 2024).
7. Hu, C.-Y.; Kuan, W.-H.; Ke, L.-W.; Wu, J.-M. A study of car wash wastewater treatment by cyclofiltration. *Water* 2022, 14, 1476.
8. Zaneti, R.; Etchepare, R.; Rubio, J. Car wash wastewater reclamation. Full-scale application and upcoming features. *Resour. Conserv. Recycl.* 2011, 55, 953–959.
9. Uzar, D. Membrane processes for the reuse of car washing wastewater. *J. Water Reuse Desalin.* 2018, 8, 169–175.
10. Li, T.; Xue-Jun, T.; Fu-Yi, C.; Qi, Z.; Jun, Y. Reuse of carwash wastewater with hollow membrane aided by enhanced coagulation and activated carbon treatments. *Water Sci. Technol.* 2007, 56, 111–118.
11. Pinto, A.C.S.; de Barros Grossi, L.; de Melo, R.A.C.; de Assis, T.M.; Ribeiro, V.M.; Amaral, M.C.S.; de Souza Figueiredo, K.C. Carwash Wastewater

Treatment by Micro and Ultrafiltration Membranes: Effects of Geometry, Pore Size, Pressure Difference and Feed Flow Rate in Transport Properties. *J. Water Process Eng.* 2017, 17, 143–148.

12. Veit, M.T.; Novais, H.G.V.; Juchen, P.T.; Palbcio, S.M.; Da Cunha Gonzalves, G.; Zanette, J.C. Automotive Wash Treatment Using Combined Process of Coagulation/Flocculation/Sedimentation–Adsorption. *Water Air Soil Pollut.* 2020, 231, 494.

13. Fayed, M.; Shewitah, M.A.; Dupont, R.R.; Fayed, M.; Badr, M.M. Treatability Study of Car Wash Wastewater Using Upgraded Physical Technique with Sustainable Flocculant. *Sustainability* 2023, 15, 8581.

14. El-Ashtoukhy, E.-S.Z.; Amin, N.K.; Fouad, Y.O. Treatment of real wastewater produced from Mobil car wash station using electrocoagulation technique. *Environ. Monit. Assess.* 2015, 187, 628.

15. Gündler, Z.B.; Balcioğlu, G.; Vergili, I.; Kaya, Y. Electrochemical treatment of carwash wastewater using Fe and Al electrode: Techno-economic analysis and sludge characterization. *J. Environ. Manag.* 2017, 200, 380–390.

16. Do, K.-U.; Kim, J.-H.; Chu, X.-Q. Sludge Characteristics and Performance of a Membrane Bioreactor for Treating Oily Wastewater from a Car Wash Service Station. *Desalin. Water Treat.* 2018, 120, 166–172.

17. Boluarte, I.A.R.; Andersen, M.; Pramanik, B.K.; Chang, C.-Y.; Bagshaw, S.; Farago, L.; Jegatheesan, V.; Shu, L. Reuse of car wash wastewater by chemical coagulation and membrane bioreactor treatment processes. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2016, 113, 44–48.

18. Worzniak, P.; Dubicki, M.; Gryta, M. Microbiological Hazard Analysis of Car Wash Wastewater. *Pol. J. Environ. Stud.* 2023, 32, 3871–3882.

19. Tomczak, W.; Wozniak, P.; Gryta, M.; Grzechulska-Damszel, J.; Daniluk, M. Cleaning of Ultrafiltration Membranes: Long-Term Treatment of Car Wash Wastewater as a Case Study. *Membranes* 2024, 14, 159.

20. Worzniak, P.; Gryta, M. Application of Polymeric Tubular Ultrafiltration Membranes for Separation of Car Wash Wastewater. *Membranes* 2024, 14, 210.

21. Kotnarowska, D. The Influence of Battery Acid on the Destruction of Acrylic Coatings of Car Bodies. *Coatings* 2021, 11, 967. *Materials* 2024, 17, 5382  
16 of 16

22. Dahatonde, B.; Kadam, M.; Gupta, S. Review: Degradation of automotive clear coat caused by bird droppings. *Paintindia* 2020, 70, 78–90.

23. Zaneti, R.N.; Etchepare, R.; Rubio, J. Car Wash Wastewater Treatment and Water Reuse—A Case Study. *Water Sci. Technol.* 2013, 67, 82–88.

24. Seubert, C.; Nietering, K.; Nichols, M.; Wykoff, R.; Bollin, S. An Overview of the Scratch Resistance of Automotive Coatings: Exterior Clearcoats and Polycarbonate Hardcoats. *Coatings* 2012, 2, 221–234.

25. Sawyer-Beaulieu, S.; Tam, E.; Hussein, A. Measuring Corrosion on Vehicles, in Real-Time, Using Digital Imaging and Analysis Techniques. *Materials* 2022, 15, 3053.

## ДОДАТКИ