



ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА
ЕНЕРГЕТИКИ



КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Підвищення паливної економічності дизельного двигуна
шляхом іжекції води в КАТП «Агробудавтосервіс»»

Виконав:

магістрант групи АТ-23М-2 Владислав ТУК
(шифр групи) (підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник:

канд. техн. наук, доцент Сергій МАРКОВИЧ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

канд. техн. наук, доцент Сергій МАГОПЕЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2024 р.

Рецензент:

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)
«__» _____ 2024 р.

Кропивницький – 2024 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Автомобільний транспорт»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Туку Владиславу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Підвищення паливної економічності дизельного двигуна шляхом іжекції води в КАТП «Агробудавтосервіс» в КАТП «Агробудавтосервіс»»

керівник роботи: Маркович Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь) (вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» _____ 2024 року
№ _____

2. Строк подання здобувачем роботи «__» _____ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: дані переддипломної практики; технологічні карти дефектування та ремонту колінчастих валів в КАТП «Агробудавтосервіс»; Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. – К.: Знання-Прес, 2003. – 511 с.; Ремонт автомобілів: Навчальний посібник/ Упор. В.Я. Чабанний. - Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2007. - 348 с. Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згорання. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти вищих навчальних закладів. / Укл. Маркович С.І., Бевз О.В. - Кропивницький: ЦНТУ, 2022. - 315 с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно

розробити): Вступ, реферат

4.1 Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень

4.2 Розділ 2. Аналіз об'єкта досліджень

4.3 Розділ 3. Дослідження впливу зміни параметрів об'єкта

4.4 Розділ 4. Обґрунтування ефективності прийняття рішень

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

1. Назва роботи, ціль роботи, предмет та об'єкт досліджень, задачі, наукова новизна, практичне значення дослідження та публікації.

2. Ілюстративні матеріали що до обґрунтування напрямку наукових досліджень.

3. Ілюстративні матеріали що до аналізу об'єкта досліджень.

4. Ілюстративні матеріали що до дослідження впливу зміни параметрів об'єкта

5. Ілюстративні матеріали що до обґрунтування ефективності прийняття рішень

6. Висновки

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<u>Вступ, реферат</u>	30.10.2024 р.	
2	<u>Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень</u>	02.11.2024 р.	
3	<u>Розділ 2. Аналіз об'єкта досліджень</u>	05.11.2024 р.	
4	<u>Розділ 3. Дослідження впливу зміни параметрів об'єкта</u>	13.11.2024 р.	
5	<u>Розділ 4. Обґрунтування ефективності прийняття рішень</u>	28.11.2024 р.	
6	Формування ілюстративних матеріалів	01.12.2024 р.	

Магістрант _____
(підпис)

ТУК В.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Сергій МАРКОВИЧ
(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Метою даної магістерської роботи є забезпечення підвищення паливної економічності дизельного шляхом іжекції води в КАТП «Агробудавтосервіс» в КАТП «Агробудавтосервіс»

Об'єкт дослідження: процес функціонування двигуна внутрішнього згорання при дозований подачі води в систему впускного колектора.

Предмет дослідження: – залежності та закономірності впливу водної іжекції на експлуатаційні, екологічні та економічні параметри дизельного двигуна.

В першому розділі проаналізовано перспективи та проблеми застосування традиційних та альтернативних видів палива як передумову для підвищення паливної економічності ДВЗ, розглянуто історичну ретроспективу та технологічні способи водної іжекції води в двигун внутрішнього згорання, обґрунтовано напрямки та визначено задачі наукових досліджень.

В другому розділі вибрана устаткування для проведення досліджень та розроблена експериментальна установка для водної іжекції води в систему впускного колектора.

В третьому розділі наведено результати випробувань дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції. Визначено стійке підвищення індикаторного тиску в середньому на 18-22 %. Відносна економія дизельного палива досягала 36 г/кВт-год ефективної потужності. При цьому спостерігається зниження викидів CO₂ на 0,17 мг/м (зниження на 39,30 %), NO_x на 2,90 мг/м (зниження на 33,30 %), димності ВГ на 0,20 % (зниження на 8,33 %).

В четвертому розділі приведено результати та відображено ефективність проведених досліджень по результатам індикування дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції

Науковою новизною магістерської роботи є залежності характеристик двигуна від рівня водної іжекції

Кваліфікаційна магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків; містить 75 сторінок тексту, 30 рисунків, 7 таблиць.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1	10
ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1. Аналіз перспектив та проблем застосування традиційних та альтернативних видів палива як передумову для підвищення паливної економічності ДВЗ	10
1.2. Підвищення ефективності роботи двигунів внутрішнього згоряння шляхом застосування водної інжекції	18
1.3. Методи та пристрої для інжекції води в ДВЗ	37
1.5. Актуальність теми магістерської роботи та задачі дослідження	40
РОЗДІЛ 2	
АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ	42
2.1 Обладнання, методи вимірювань та апаратура, що застосовувалась при експериментальних дослідженнях	42
2.2. Вибір методу та розробка оснащення для інжекції води в ДВЗ	44
2.3. Методика та обладнання для дослідження екологічних показників двигуна при застосуванні водної інжекції	47
2.4. Методика, пристрої та прилади для проведення порівняльних досліджень	49
РОЗДІЛ 3	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА	50

3.1. Результати лабораторних випробувань дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції	50
3.1.1. Визначення впливу водної інжекції на показники ефективності та економії палива при роботі двигуна	50
3.1.2. Оцінка впливу водної інжекції на екологічні показники роботи двигуна	56
РОЗДІЛ 4	
ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	62
4.1. Обґрунтування ефективності дослідження по результатам індикування дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції	62
ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АТЗ - автотранспортні засоби
АТТ - автотракторна техніка
ВМТ - верхня мертва точка
ГРМ - газорозподільний механізм
ДВЗ - двигун внутрішнього згоряння
ДП - дизельне паливо
ВІ – водна іжекція
ВПЕ – водно-паливна емульсія
ККД - коефіцієнт корисної дії
ВГ - відпрацьовані гази
НС - навколишнє середовище
ПА - паливна апаратура
ПНВТ - паливний насос високого тиску
ТО - технічне обслуговування
ТО-2 - технічне обслуговування №2
ПР - поточний ремонт
ЦПГ – циліндро-поршнева група

ВСТУП

Рідкі вуглеводневі палива, запас яких, на жаль, обмежений і скорочується, ще довго залишаться незамінним паливом для двигунів внутрішнього згорання. У зв'язку з цим питання їх економного витрачання залишаються актуальними, а проведені дослідження з підвищення паливної ефективності роботи ДВЗ є практичними і значущими.

Водна інжекція може перешкоджати появі детонації, коли вода впорскнута в систему впускного колектора до кришки циліндра, невеликі крапельки поглинають тепло з повітря. Охолоджене повітря має велику щільність, тим самим збільшуючи кількість кисню, що потрапляє в циліндр. Вода має високу теплоємність (може поглинути багато енергії за незначного підвищення температури). Потім, невеликі краплі випаровуються в циліндрі і охолоджують його, при цьому, отримана пара збільшує тиск в циліндрі. Це діє як антидетонант і також очищує порожнини камери згорання від нагару.

В роботі результати індикування показали стійке підвищення індикаторного тиску в середньому на 18-22 %. Експериментально встановлено, що найбільший приріст ефективної потужності дизельного двигуна 4 Ч 11/12,5 спостерігається при подачі води в обсязі, що дорівнює 27-32 % від обсягу циклової подачі дизельного палива.

Застосування водної інжекції дозволяє економити дизельне паливо в об'ємах 36 г/кВт-год ефективної потужності двигуна. Крім того, встановлено, що зі збільшенням об'єму води, що подається, температура відпрацьованих газів знижується, із середньою інтенсивністю близько 1°C на 1% подачі води, в залежності від режиму роботи двигуна.

При застосуванні водної інжекції на номінальному режимі роботи двигуна спостерігається зниження викидів оксиду вуглецю на 0,17 мг/м (зниження на 39,30 %). Зменшення викидів оксидів азоту на режимі максимального моменту, що крутить, на 2,90 мг/м (зниження на 33,30 %).

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз перспектив та проблем застосування традиційних та альтернативних видів палива як передумову для підвищення паливної економічності ДВЗ

Обов'язковою умовою розвитку будь-якої країни є забезпеченість енергоресурсами. За останні 20 років світове енергоспоживання зросло більш ніж на 30 % (і це зростання, мабуть, продовжиться через зростання потреби країн азіатського регіону, що бурхливо розвиваються). Разом з тим, вже зараз абсолютно ясно, що ХХІ століття стане заходом сонця нафтової ери. Зниження темпів нафтовидобутку та зниження його рентабельності спостерігається вже сьогодні (рисунок 1.3).

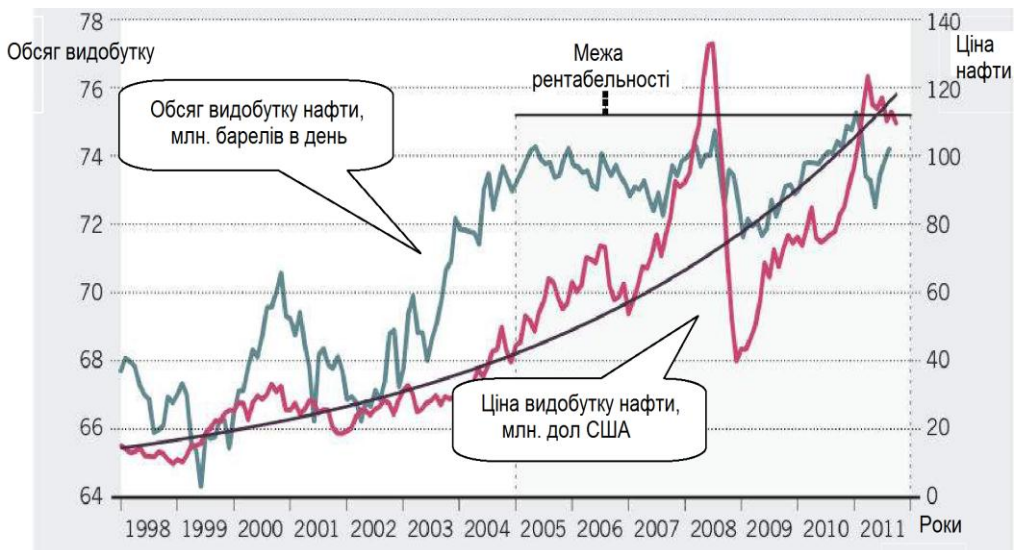


Рисунок 1.1 - Динаміка світового нафтовидобутку та ціни на нафту [87]

У зв'язку з коливаннями цін на нафту змінюється і структура енергоспоживання. Зокрема, в розвинених країнах Європи відбулося заміщення кам'яного вугілля природним газом (частка газу в споживанні досягла 40%).

Частка атомної енергії зросла з 4 до 10%. У балансі енергоспоживання Австралії частка сонячної енергії займає близько 30%. Тим не менш, в найближчій перспективі нафта, як і раніше, залишатиметься основним джерелом палива для живлення двигунів внутрішнього згоряння. Незважаючи на те, що зростатиме і частка альтернативних видів палива (природний газ, водень, спирти, біопаливо та ін.) [8, 9, 5].

Альтернативні види палива, що використовуються сьогодні для живлення ДВС, можна класифікувати за такими ознаками:

- за складом: вуглеводнево - кислотні (спирти), ефіри, естери, водневі - палива з добавками;
- за агрегатним станом: рідкі, газоподібні, тверді;
- за обсягами використання: повністю, як добавки;
- за джерелами сировини: з вугілля, торфу, сланців, біомаси, пального газу, електроенергії та ін.

На сьогоднішній день до найпоширеніших видів альтернативних палив належать:

природний газ. Для живлення двигунів внутрішнього згоряння використовують два різні типи газоподібного палива - метан або пропан-бутанову суміш.

Стиснутий газ (метан) досить давно використовується як пальне для ДВЗ. Запаси метану практично необмежені. Крім традиційного видобутку газу, метан можна отримувати при переробці органічних відходів (біогаз). Для роботи на метані можливе переобладнання практично будь-яких бензинових двигунів (карбюраторних, інжекторних) і навіть дизельних (хоча обсяг доробок дизелів істотно вищий і це не завжди економічно доцільно).

Разом з тим, при використанні метану як моторне паливо виникає низка проблем:

зберігання метану пов'язане з використанням важких і дорогих газових балонів (загальна вага батареї газових балонів досягає 1,5 т), тому

його ефективного використання можливе тільки на важкій мобільній техніці (вантажівки, автобуси та ін.);

підвищена вибухонебезпечність у разі витоків.

Зріджений газ, як паливо для ДВЗ, знайшов ширше застосування. Найбільшого поширення набула пропан - бутанова суміш (продукти стабілізації газового конденсату, попутний газ при видобутку нафти та природний газ (при його переробці)). Як правило, пропан-бутанова суміш зберігається в скрапленому вигляді під тиском в 16 атм. (сталевий балон ємністю 50-80 л важить не більше 40-70 кг). Октанове число пропан-бутана варіюється в межах 99-106.

Іншим перспективним різновидом зрідженого газу є диметилевий ефір, який у найближчі роки може стати основною альтернативою дизельному паливу. Диметилефір - скраплений газ, який виробляється з природного метану. Він характеризується високим цетановим числом (55.60 проти 40.55 у нафтового дизельного палива) та повною відсутністю сажі у відпрацьованих газах.

Основними перевагами зрідженого газу є:

- відносно низька вартість (ціни нижчі, ніж на бензин, але вищі, ніж на стислий газ);
- низька токсичність газів, що відпрацювали.

Основні недоліки зрідженого газу:

- при негативних температурах зовнішнього повітря запуск та прогрів двигуна здійснюється на штатному паливі;
- запаси зрідженого газу обмежені.

Водень. В даний час використовуються два способи застосування водню. Перший - паливні елементи, а другий - спалювання в циліндрах ДВС традиційним способом.

Паливні елементи - пристрої, що генерують електроенергію безпосередньо в процесі реакції водню та кисню. Як паливо, водень

використовується у стислому вигляді. Цей напрямок є досить перспективним. Основним стримуючим фактором є висока вартість паливного елемента. Другою невирішеною проблемою є висока собівартість отримання водню та його підвищена вибухонебезпечність.

Спалювання водню в циліндрах ДВС традиційним способом призводить до підвищення термічного ККД, зниження токсичності газів, що відпрацювали.

Основною проблемою використання водню як паливо є труднощі його зберігання. Найбільш перспективною розробкою слід вважати застосування метал-гідридів - пристроїв зі спеціальними сплавами, які вбирають водень у свою кристалічну решітку і віддають його при нагріванні. Ці пристрої здатні забезпечити високу безпеку зберігання і найвищу щільність упаковки палива. Разом про те, їх промисловий випуск є дуже віддаленої перспективою.

Біопаливо. В даний час розроблено декілька технологій виробництва біопалива:

Переробка сільськогосподарських відходів у паливо. Основною сировиною є відходи деревини та солома. У процесі переробки виходить дизельне паливо з низьким вмістом сірки та інших шкідливих домішок. Біодизельне паливо «CO₂ -нейтрально» - при його згорянні в атмосферу повертається та вуглекислота, що була поглинена рослинами при зростанні. Використання біопалива дозволяє суттєво покращити екологічні показники. Недоліком є відносно висока собівартість отримання біопалива.

Додавання ріпакової олії в дизельне паливо. Як паливо використовуються складні ефіри ріпакової олії, що додаються в кількості 5.30% дизельне паливо або використовуються самостійно (біодизель).

Позитивні сторони застосування біопалива:

- зниження викидів шкідливих речовин;
- запаси сировини можуть відновлюватися щорічно, культури, що вирощуються, не вимагають особливого догляду в процесі обробітку;

- в ході виробництва біопалива з ріпакової олії отримують гліцерин, сульфат натрію та інші продукти.

Недоліки застосування біопалива:

- собівартість виробництва вища, ніж бензину та дизпалива;
- потрібні додаткові земельні площі, зайняті під вирощуванням олійних культур;
- ефіри ріпакової олії мають значну корозійну активність;
- знижується потужність двигуна та підвищується витрата палива.

Синтетичне пальне. Сучасні технології переробки вуглеводнів дозволяють виробляти синтетичне дизельне паливо та синтетичний бензин. Як сировину використовуються відходи деревообробної промисловості, сільського господарства і навіть побутове сміття. Особливості розроблених технологічних процесів полягають у тому, що з однієї сировини можуть виходити різні види палива.

Основними перевагами застосування синтетичного палива є:

- одержання необхідних характеристик палива;
- відсутність сірки; зниження викидів шкідливих речовин;
- = запаси сировини необмежені.

Основні недоліки синтетичного палива:

- висока енергоємність виробництва;
- необхідні значні капіталовкладення для створення інфраструктури виробництва, використання та зберігання синтетичного палива.

Спирти. Як паливо для двигунів внутрішнього згоряння використовуються етанол та метанол.

Етанол - зневоднений етиловий спирт, що виготовляється з біологічно відновлюваної сировини. В даний час промисловістю використовуються три способи отримання етилового спирту: зброджуванням харчової сировини (переробкою цукру, що міститься в сировині, в спирт за допомогою дріжджів),

гідролізом рослинної сировини і гідратацією етилену (синтетичний спирт). Енергетична цінність спирту, як палива, майже в півтора рази нижче ніж бензин.

Як автомобільне паливо етанол за деякими параметрами перевершує бензин. У ньому набагато менше домішок (наприклад, сірки), а октанове число за методом дослідження досягає 125 одиниць. Тому етанол іноді використовують як високооктанову добавку. Однак теплотворна здатність етанолу істотно нижча за «бензинову» (21,2 кДж/л проти 31,9 кДж/л). Крім того, етанол дуже гігроскопічний - при контакті з водою він «вимивається» зі складу суміші, порушуючи її характеристики.

Основні переваги використання етанолу:

- запаси сировини практично необмежені;
- накопичено досить багатий досвід експлуатації ДВЗ на етанолі (Бразилія, Австралія);
- зниження токсичності газів, що відпрацювали.

Недоліки:

- необхідна зміна конструкції системи живлення двигуна;
- зниження потужності двигуна; збільшення витрати палива;
- погіршення пускових властивостей двигуна через гігроскопічність етанолу;
- висока собівартість виробництва біоетанолу.

Метанол. Більш відомий як метиловий спирт. Процес отримання заснований на каталітичній конверсії вуглеводнів природного, коксового та інших вуглеводневих газів з водяною парою. Як самостійне пальне та як добавки до бензину застосовується рідко (наприклад, для двигунів спортивних мотоциклів, не розрахованих на тривалу експлуатацію). У той же час досить широко використовується як сировина для отримання водню.

Переваги:

- дозволяє вирішити проблему зберігання водню та вилучення його при

необхідності;

- запаси сировини практично необмежені;
- може використовуватися як сировина для синтетичного

бензину.

Недоліки:

- надзвичайно токсичний (смертельна доза для людини – 30 мл);

На жаль, нині жоден із видів альтернативного палива не може розглядатися як повноцінна заміна бензину або дизельному паливу. Потрібні значні державні інвестиції в розробку та впровадження високоефективних енергозберігаючих технологій, у розвиток інфраструктури та підтримання економічно обґрунтованого попиту на альтернативні енергоресурси. Економічний ефект від використання установок з виробництва біодизельного палива, синтетичного бензину, перетворення відпрацьованого масла і т.п., без допомоги державних програм, може бути отриманий лише у виняткових випадках і носить локальний характер.

З усіх перелічених видів альтернативних палив найбільш перспективним є природний газ, який вже сьогодні нашому досить широке застосування як паливо для автотракторних двигунів. За даними [59], у 60 країнах світу на природному газі працює приблизно 10 млн автомобілів. Світовим лідером є Аргентина (понад 1 млн автомобілів, що працюють на природному газі). Відповідно до планів Європейської економічної комісії ООН до 2020 року ~ 30 млн автомобілів у країнах ЄС працюватимуть на природному газі, головним чином, це міські автобуси, мікроавтобуси, легкові автомобілі. Щорічне споживання природного газу такою кількістю машин становитиме понад 50 млрд. м³. Наприклад, у Німеччині до 2010 року кількість автомобілів, що працюють на природному газі, має зрости до 1 млн, а до 2020 - до 8 млн, що становитиме понад 30% від усього автопарку країни».

Разом з тим, слід зазначити, що природний газ, хоча його значно більший, ніж нафти (таблиця 1.2), також є невідновлюваним ресурсом та його запаси

обмежені. Причому споживання невідновлюваних ресурсів країнами Європи та СНД перевищує їх видобуток.

Найбільший інтерес, як перспективне паливо для автотракторних двигунів з числа відновлюваних ресурсів, представляють спирти (етанол та метанол). Однак, сьогодні вони ще не можуть бути використані як паливо в чистому вигляді, а лише у вигляді добавок до традиційних палив. Зокрема, за даними [59]: У деяких країнах Південної та Північної Америки, а також Європи, у двигунах з примусовим займанням паливної суміші широко використовуються бензометанольні суміші (М- 15, М-20). Провідними світовими автомобільними фірмами («Хонда», «Тойота», «Дженерал моторс» та ін) створені і випробовуються модельні зразки автомобілів, у тому числі з гібридними енергоустановками, включаючи використання і електрохімічних генераторів, що працюють на продуктах конверсії спиртових палив.

Таблиця 1.2 - Запаси ресурсів (Європа та СНД) [9]

Показники	Невідновлювані ресурси		
	нафта, млн т	природний газ, млрд. м	вугілля, млн т
Ресурси	19000	64010	110000
Видобуток за рік	845	1061	436
Споживання за рік	960	1122	538
Запас, рік	22	60	240

Протягом останнього десятиліття світове лідерство у виробництві етанолу займають навіть Бразилія, частку яких припадає близько 70% його світового виробництва (таблиця 1.3). Частка Росії у світовому виробництві етанолу становить лише близько 1,5%.

Таблиця 1.3 - Виробництво етанолу у світі 2005 р. [4]

Країни	Виробництво, млрд. л	Виробництво, % до підсумку
Світ	45,9	100,0
США	16,1	35,1
Бразилія	16,0	34,9
Китай	3,8	8,3
Індія	1,7	3,8
Франція	0,9	2,0
Росія	0,7	1,5
Німеччина	0,4	0,9
ПАР	0,4	0,9
Великобританія	0,3	0,7

Ще однією проблемою, яка стримуватиме використання альтернативних - видів палива в Росії, це клімат. Територіально Росія розташована в суворіших кліматичних умовах, ніж країни ЄС, США, Аргентина, Бразилія чи Австралія, тому отримати кілька врожаїв на рік дешевої рослинної біомаси для виробництва спиртів чи біодизелю неможливо.

На жаль, нині жоден із видів альтернативного палива не може розглядатися як повноцінна заміна бензину або дизельному паливу. Потрібні значні державні інвестиції в розробку та впровадження високоефективних енергозберігаючих технологій, у розвиток інфраструктури та підтримання економічно обґрунтованого попиту на альтернативні енергоресурси. Економічний ефект від використання установок з виробництва біодизельного палива, синтетичного бензину, перетворення відпрацьованого масла і т.п., без допомоги державних програм, може бути отриманий лише у виняткових випадках і носить локальний характер.

З усіх перелічених видів альтернативних палив найбільш перспективним є природний газ, який вже сьогодні нашому досить широке застосування як паливо для автотракторних двигунів. За даними [9], у 60 країнах світу на природному газі працює приблизно 10 млн автомобілів. Світовим лідером є Аргентина (понад 1 млн автомобілів, що працюють на природному газі). Відповідно до планів Європейської економічної комісії ООН до 2020 року ~ 30 млн автомобілів у країнах ЄС працюватимуть на природному газі, головним чином, це міські автобуси, мікроавтобуси, легкові автомобілі. Щорічне споживання природного газу такою кількістю машин становитиме понад 50 млрд. м³. Наприклад, у Німеччині до 2010 року кількість автомобілів, що працюють на природному газі, має зрости до 1 млн, а до 2020 - до 8 млн, що становитиме понад 30% від усього автопарку країни».

Разом з тим, слід зазначити, що природний газ, хоча його значно більший, ніж нафти (таблиця 1.2), також є невідновлюваним ресурсом та його запаси обмежені. Причому споживання невідновлюваних ресурсів країнами Європи та СНД перевищує їх видобуток.

Найбільший інтерес, як перспективне паливо для автотракторних двигунів з числа відновлюваних ресурсів, представляють спирти (етанол та метанол). Однак, сьогодні вони ще не можуть бути використані як паливо в чистому вигляді, а лише у вигляді добавок до традиційних палив. Зокрема, за даними [59]: «У деяких країнах Південної та Північної Америки, а також Європи, у двигунах з примусовим займанням паливної суміші широко використовуються бензометанольні суміші (М- 15, М-20). Провідними світовими автомобільними - фірмами («Хонда», «Тойота», «Дженерал моторс» та ін) створені і випробовуються модельні зразки автомобілів, у тому числі з гібридними енергоустановками, включаючи використання і електрохімічних генераторів, що працюють на продуктах конверсії спиртових палив.

Таблиця 1.2 - Запаси ресурсів (Європа та СНД) [5]

Показники	Невідновлювані ресурси		
	нафта, млн т	природний газ, млрд. м ³	вугілля, млн т
Ресурси	19000	64010	110000
Видобуток за рік	845	1061	436
Споживання за рік	960	1122	538
Запас, рік	22	60	240

Протягом останнього десятиліття світове лідерство у виробництві етанолу займають навіть Бразилія, частку яких припадає близько 70% його світового виробництва (таблиця 1.3). Частка Росії у світовому виробництві етанолу становить лише близько 1,5%.

Таблиця 1.3 - Виробництво етанолу у світі 2005 р. [4]

Країни	Виробництво, млрд. л	Виробництво, % до підсумку
Світ	45,9	100,0
США	16,1	35,1
Бразилія	16,0	34,9
Китай	3,8	8,3
Індія	1,7	3,8
Франція	0,9	2,0
Росія	0,7	1,5
Німеччина	0,4	0,9
ПАР	0,4	0,9
Великобританія	0,3	0,7
Іспанія	0,3	0,7

Ще однією проблемою, яка стримуватиме використання альтернативних -

видів палива це клімат. Територіально країни розташовані в суворіших кліматичних умовах, ніж країни ЄС, США, Аргентина, Бразилія чи Австралія, тому отримати кілька врожаїв на рік дешевої рослинної біомаси для виробництва спиртів чи біодизелю неможливо.

Отже, слід розширювати посівні площі. Середній вихід спиртів для різних сільськогосподарських культур з одиниці посівної площі представлено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Обсяг виробництва спирту для 1 га посіву різних сільськогосподарських культур [4]

Найменування культур	Об'єм, м ³ /га
Цукрова тростина	3,5-5,0
Солодке сорго	3,5-5,0
Цукровий буряк	2,5 -5,0
Кукурудза	2,5
Картопля	1,2-2,7
Кассава	1,5-6,0
Пшениця	0,5 - 2

Крім того, обробіток сільськогосподарських культур для отримання біопалива неминуче викличе зміну кон'юнктури цін на продукцію сільського господарства, призначену для харчової промисловості. За даними [4]: «На Чиказькій біржі динаміка цін на біопаливо (етанол) формується в основному під впливом двох факторів: коливання світових цін на зерно як сировини для його виробництва, так і зміни цін на цукор-сирець, які безпосередньо впливають на обсяги переробки цукрової тростини на цю нор... З іншого боку, у зв'язку з підвищенням світових котирувань на кукурудзу, які досягли 10-річного рекордного рівня, ціни на біопаливо з кінця вересня 2006 р. зросли на одну третину - з 1,68 до 2,24 дол. за галон. За 2006 р. ціна кукурудзи зросла вдвічі – до 3,66 дол. за бушель (25 кг), хоча було зібрано третій за величиною за всю історію врожаю. На думку Президента вашингтонського «Інституту політики Землі» Л. Брауна, дорожнеча кукурудзи може навіть спровокувати масові заворушення в країнах «третього світу», де вона

є основним продуктом харчування, таким як Індонезія, Єгипет, Алжир, Нігерія та Мексика. Експерти інституту підраховали, що потреби американських виробників етанолу до моменту збирання врожаю 2008 р. становитимуть 139 млн т кукурудзи... «Боротьба між машинами та людьми за зерно призведе до небувалої зростання цін », - попереджає Л. Браун. На думку аналітиків J. P. Morgan , у 2007 р. ціни на кукурудзу становитимуть 4,03 дол. за бушель, або на 61% перевищать рівень 2006 р., але нафту замінити все одно не вдасться, хоча б з погляду обсягу її використання».

Однак це лише частина проблеми використання біопалива. Друга її частина – технічна. Вона полягає в тому, що, наприклад, біодизельні палива на основі ріпакового масла замерзають вже при температурах близько -15°C , а в ряді випадків і вище. Це обмежуватиме застосування біодизеля південними районами країни або теплою порою року. Інша проблема - велика гігроскопічність, яка при низьких температурах, або при їх великих перепадах, загрожує розшаруванням палива, корозією елементів паливної апаратури і утворенням льоду, який здатний створювати затори в трубопроводах і фільтрах. Сьогодні саме ця причина стримує використання біопалива в авіації.

Наступний комплекс проблем, які перешкоджатимуть використанню - альтернативних видів палива, це проблеми економічного характеру . Більш точно, рівень енергетичної та економічної ефективності виробництва альтернативних палив по відношенню до традиційних палив нафтового походження. Слід зазначити, що це рівень значною мірою визначаються рівнем економічного розвитку регіону чи країни загалом. Тому, при ухваленні рішення про початок виробництва альтернативного палива необхідно оцінити сумарні енергетичні витрати, що склалися в регіоні (країні), пов'язані як з перетворенням (переробкою) вихідної сировини на паливо, так і з ефективністю самого отриманого палива при його безпосередньому використанні.

Таким чином, застосування альтернативних палив є хоч і перспективним - напрямом розвитку автотракторної техніки, проте для його практичного втілення

потрібно, як мінімум, вирішити викладені вище проблеми. Нафтові палива ще довго залишаться переважаючими джерелами енергії для двигунів внутрішнього згоряння, тому актуальним завданням, сьогодні, є їх економне витрачання. У зв'язку з цим зростає практичний інтерес до апробованих способів економії палива. Одним з таких способів є подача (уприскування) води в циліндри двигуна внутрішнього згоряння або водна інжекція.

1.2. Підвищення ефективності роботи двигунів внутрішнього згоряння шляхом застосування водної інжекції

За більш ніж вікову історію загальний ККД кращих бензинових двигунів (з іскровим примусовим запаленням) не перевищив 25 - 30%. ККД кращих дизельних моторів, навіть у їх економічних масогабаритних варіантах, не перевищує 40 - 45 %. ККД малих дизелів нижче на 10.15%.

Одним із напрямів підвищення паливної ефективності двигунів внутрішнього згоряння є використання води як добавки до вуглеводневих палив. Ідея використання води для покращення роботи ДВС не нова і представляється я дуже привабливою. Привабливість цієї ідеї пояснюється тим, що її застосування не вимагає великих витрат на створення нових виробничих потужностей [20, 69, 103, 104]. За даними джерела [20], водна оболонка Землі - океани, моря, озера, річки - становить близько 1,4.1,5 млрд. км, тобто незрівнянно більше запасів вуглеводневого палива. Якщо врахувати, що вода, після її використання в ДВС, повертається назад у гідросферу, причому очищеною, то її запаси практично невичерпні.

Вода не є горючою речовиною, тому вона не може замінити вугле водне паливо, яке використовується в ДВЗ для нагрівання свіжого заряду. Однак, вода дозволяє зменшити теплонапруженість двигунів, підвищити надійність та ефективність їх роботи, економити паливо, збільшити детонаційну стійкість низькооктанових бензинів, знизити концентрацію оксидів азоту і вуглецю у відпрацьованих газах. Вода може бути використана для охолодження паливно-

повітряного заряду при створенні двигунів з наддувом, а також під час роботи двигунів у високогірних умовах. Нарешті, вона дає можливість використовувати водорозчинні антидетонатори [20].

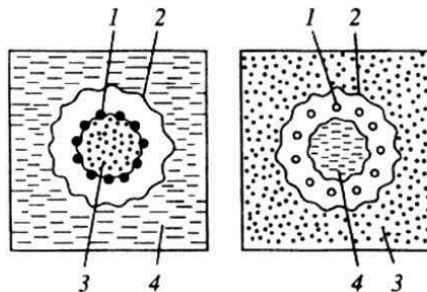
На сьогоднішній день відомі такі способи додавання води до вуглеводневого палива:

- 1) нерегульована подача постійної кількості води, незалежно від режиму роботи двигуна;
- 2) регульована подача води, що забезпечує її певну частку в паливній суміші;
- 3) регульована подача води у відповідності, що до поточного режиму функціонування двигунів;
- 4) використання водопаливних емульсій (ВПЕ)

Водопаливні емульсії - метастабільні рідини, що складаються з води та палива. Тривалість їх метастабільного стану залежить від третього речовини - емульгатора. Внутрішню будову водопаливних емульсій показано малюнку 1.4. Основні фізико-хімічні властивості сучасних ВТЕ практично ідентичні - базовому вуглеводневому паливу. За антидетонаційними властивостями відзначається навіть їхня деяка перевага.

В даний час в основному знайшли застосування такі види емульсій:

- емульсія води у вуглеводнях;
- емульсія вуглеводнів у воді;
- мікроемульсії, що дозволяють вводити в паливо різні присадки, які не розчиняються у вуглеводнях. При їх використанні відзначається підвищена витрата поверхнево-активних речовин - до 15%.



1 - частки емульгатора; 2 – сольватний шар; 3 – паливо; 4 - вода

Рисунок 1.2 - Будова водопаливних емульсій [88]

Практичне використання емульгованого палива в широких масштабах неможливе без вирішення наступних технічних завдань [18]:

- розробка щодо простої, ефективної та надійної технології отримання емульгованого палива;

- розробка рецептур ефективних емульгаторів, здатних адсорбуватися на поверхнях розділу фаз (води та вуглеводневого палива) і знижувати внаслідок цього поверхневу енергію (поверхневий натяг), і створення стабільних паливних емульсій;

- розробка систем тонкого очищення емульгованих палив від механічних домішок;

- підвищення експлуатаційної надійності двигунів внутрішнього згоряння та їх агрегатів (наприклад, ПНВТ та ін) при перекладі їх на ВПЕ.

Іншим ефективним способом подачі води в ДВЗ є впорскування води у впускний колектор двигуна або безпосередньо в циліндри двигуна (рисунок - 1.3). Цей спосіб, порівняно з використанням водопаливних емульсій, має істотну перевагу. Він досить простий, надійний і здатний забезпечити регульовану подачу води в впускний колектор на режимах, котрі найбільш чуттєві до якості свіжого заряду.

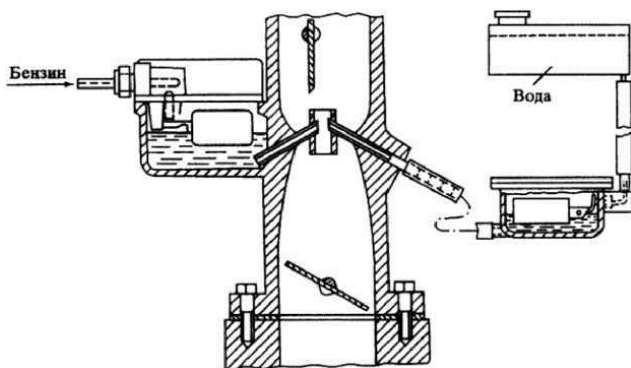


Рисунок 1.3 - Подача води в дифузор карбюратора [18]

В даний час механізм дії води на процес згоряння двигуна вивчений далеко не повністю. Однак, незалежно від способу додавання води до палива (уприскування в циліндри або впускну систему, застосування у вигляді водопаливної емульсії), відзначається зниження вмісту NO_x на 8 - 10% на кожні 10% води, що додається, і значний антидетонаційний ефект.

На думку ряду авторів, антидетонаційний ефект від додавання води до палива складається щонайменше з трьох факторів:

- охолодження заряду робочої суміші;
- охолодження деталей камери згоряння;
- дії водяної пари як інертного середовища, що регулює процес згоряння.

Щодо об'єкта використання можна сказати, що застосування добавок - води в паливо в карбюраторних двигунах розглядалося, головним чином, як спосіб зниження детонаційних вимог двигуна. Це дозволило використовувати бензини з нижчим октановим числом. Зокрема, дослідження ефективності упорскування води показали можливість застосування автомобільних бензинів з октановим числом на 6.8 одиниць нижче октанового числа бензинів, рекомендованих заводом-виробником при збереженні, а в деяких випадках і поліпшенні економічних і потужних характеристик, відсутності підвищених зносів корозійних пошкоджень деталей двигуна

Щодо дизельних двигунів зазначається, що обводнене дизельне паливо характеризується зниженим цетановим числом і великим періодом затримки займання. Однак наявність «мікрровибухів» крапель емульсії та вплив води на згоряння призводять до інтенсифікації тепловиділення, до скорочення тривалості згоряння і до зниження витрати палива. Питома витрата палива може бути знижена на 2.6%. Внаслідок впливу водяної пари на процес газифікації вуглецю (сажі) димність відпрацьованих газів зменшується. Водночас, зазначається, що добавка води сприяє підвищенню вмісту

вуглеводнів у відпрацьованих газах.

Потрібно відзначити, що перший патент на використання води як добавки до основного палива в двигунах внутрішнього згорання був отриманий понад сто років тому родоначальником карбюраторного двигуна Н. Отто. Слідом за цим, на початку минулого століття, з'явилася досить велика кількість робіт у цій галузі, в результаті яких було розроблено та створено діючі двигуни з розділеними системами живлення. Відомо, наприклад, що в 1920 - 1921 роках, багато англійських автобусів було обладнано карбюраторами з двома поплавковими камерами. Одна - для подачі бензину, друга - для подачі води. У тридцяті роки минулого століття вода як добавка до палива активно використовувалася в авіаційній техніці. Її використовували не тільки для придушення детонації, але й для суттєвого зменшення теплової напруженості авіаційних двигунів .

Зупинимося докладніше цьому етапі розвитку авіаційного двигунобудування. У цьому дуже цікавий той факт, що другий абзац введення в книзі Кайдаша Н.Ф. та ін. «Уприскування води в авіаційні двигуни» [58] починається зі слів: «Загальновідомий факт, коли із застосуванням води підвищувалася потужність і усувався перегрів у тракторних гасових двигунах». У наступному абзаці: «Відоме застосування уприскування води у двотактних дизелів «Боліндер» та «Бульдог». Введення води в ці двигуни дозволило підвищити ступінь стиснення і знизити температуру головки циліндрів». З наведених цитат видно, що в той період розвитку двигунобудування (перша половина XX століття) використання штатних пристроїв для подачі води в систему живлення двигунів наземних машин було справою звичайною і досить широко поширеною.

Зокрема, джерело [26] вказує: «Чотирьохциліндровий двигун «Інтернаціоналу» працював на гасі. Щоб уникнути детонації при великих навантаженнях в карбюратор подавалося трохи води. Пуск і прогрів двигуна проводився на бензині». Тут йдеться про «піонера радянського

тракторобудування» - колісного трактора загального призначення СТЗ-ХТЗ 15/30 «Інтернаціонал», який випускався Сталінградським та Харківським тракторними заводами з 1930 по 1937 роки. Загалом було випущено 397 тисяч таких тракторів.

Задля справедливості слід зазначити, що надалі від використання системи впорскування води на даному тракторі радянські конструктори відмовилися. У літературі називалися різні причини, однак, на думку автора, основною причиною слід вважати ускладнення експлуатації таких тракторів, що на той час було великою проблемою. Грамотних висококваліфікованих спеціалістів на селі катастрофічно не вистачало.

Згідно з даними джерела [18], в 1936 році в Центральному інституті авіаційного машинобудування (ЦИАМ) проводилися випробування зі впорскування води безпосередньо в циліндр малорозмірного двигуна. Вони показали значний антидетонаційний ефект води і можливість збільшення наддуву, а отже, і потужності двигуна. Прескотт Є.Л. [100] вказує на те, що впорскування води в циліндр форсованого двигуна пригнічує детонацію і дає можливість підвищити середній ефективний тиск (отже, і потужність) двигуна.

Досліди, проведені в Канаді (30-ті роки XX століття) на 14-циліндровому двох рядному двигуні Армстронг Сіддлей Ягуар МК - VI показали, що впорскування води дозволило підвищити тиск наддуву від 810 до 1000 мм рт. ст. і потужність на 20% при одночасному зниженні теплового режиму мотора. При визначенні впливу впорскування води на потужність і ефективність двигуна виявилось, що він працював стійко при подачі води до 83% (у ваговому відношенні до палива), а при «незмінному наддуві» максимум потужності припадає на подачу води близько 60% (потужність зросла приблизно на 5%, питома витрата палива не збільшилася).

Хайвс Є.В., Смітс Ф.Л. [140] на світовому конгресі автомобільних інженерів у 1939 році доповіли про результати проведених досліджень із впорскуванням води в циліндри двигуна Роллс-Ройс. На паливі з октановим

числом 87 при впорскуванні води в кількості, що дорівнює (за обсягом) витрати то пливу, вдалося підвищити середній ефективний тиск на 42%, а на режимі максимальної економічності - підвищити середній ефективний тиск майже на 100%. Зазначається, що особливий інтерес викликає той факт, що на паливі з октановим числом 87 було отримано потужність на 11 % більше потужності, отриманої на паливі з октановим числом 100.

Хронологія проведення досліджень у СРСР за упорскуванням води в період 1941-1945 років (зауважимо, що в цей час йшла найважча для СРСР Велика Вітчизняна війна) викладена в [4, 5, 8]. Зокрема, Кайдаш Н.Ф. і співавтори [8] вказують на те, що: «Роботи з упорскування води ... були розпочаті наприкінці 1941 року в НДІ ГВФ за участю Інституту хімічної фізики Академії наук СРСР. У першій половині 1942 р. випробуваннями на одноциліндровій установці і на цілих моторах була встановлена повна можливість і доцільність застосування упорскування води як засобу придушення детонації та підвищення потужності моторів. У 1942 р. була розроблена і застосована при льотних випробуваннях цілком надійно працювала система упорскування для авіаційних моторів. Проведені взимку 1942/43 р. на транспортному літаку льотні 50-годинні випробування із уприскуванням води на моторах АШ-62ІР дали позитивні результати. У 1943 р. на тому ж літаку в рейсових умовах було проведено 400 годинні випробування моторів АШ-62ІР із уприскуванням води. Одночасно з цим НДІ ГВФ поставив перед авіаційною промисловістю питання про запровадження упорскування води на випробувальних станціях моторобудівних заводів НКАП та на бойових сам льотах. Проведено ряд випробувань вітчизняних моторів на стендах та на бойових літаках, котрі в повністю підтвердили висновки щодо придатності - застосування упорскування води для придушення детонації.

Таким чином, на підставі наведеної цитати, можна зробити висновок, що, незважаючи на найважчі умови, викликані веденням війни, в країні широким фронтом були розгорнуті науково-дослідні роботи з вивчення упорскування -

води на ефективні показники роботи двигунів. Можливо, актуальність цієї тематики було продиктовано ще й вимушеним використанням палив низької якості. Причому це стосувалося не лише авіаційної техніки, а й водної.

Зокрема, матеріали джерела [18] вказують на те, що в цей же час працівниками НДІ ГВФ у БТК Червонопрапорного Балтійського флоту проводилися випробування системи упорскування води, розробленої НДІ ГВФ, на торпедному катері, з метою отримання гарантованих потужностей на паливах зі зниженим октановим числом». Очевидно, що і тут була актуальною проблема використання низькооктанових палив, у той час як торпедні катери, а також цілий ряд суден ВМФ іншого призначення обладнані бензиновими - моторами, що вимагають високооктанових палив.

Експлуатаційні випробування торпедного катера з трьома двигунами - американської фірми «Паккард» 4М-2500 з номінальною ефективною потужністю одного двигуна 1350 к.с. при частоті обертання колінчастого валу двигуна 2500 хв^{-1} показали, що упорскування води у всмоктувальну систему двигунів «Паккард» 4М-2500 під тиском 1,5 ат, що відповідає витраті води 75 кг/год (або 20-25 % від витрати палива), забезпечує нормальну та бездетонаційну роботу їх на паливі ЗБ-70 (октанове число 87) при тисках наддуву та оборотах, рекомендованих фірмою для 100-октанового палива.

З наведеного матеріалу видно, що в першу чергу упорскування води - змінювалося на двигунах великої потужності, що вимагають великої витрати палива для їх роботи, тут ефект був найбільшим.

Що стосується зарубіжних фірм, то в цей період вони також форсовано - освоювали впорскування води в циліндри двигуна. Зокрема, з [5, 7, 19, 10], відомо, що упорскування води успішно застосовувалося на літаках-винищувачах США «Сандерболт», на яких встановлювалися двигуни фірми «Пратт-Уїтней» R - 2800-68. Відзначено, що при роботі на кондиційному паливі з октановим числом 100 потужність двигунів збільшилася на 15 %, витрата палива зменшилася за рахунок збіднення суміші, а температура головок

циліндрів та робочої суміші знижувалася. Пізніше, з метою короточасного форсажу потужності, упорскування води та водоспиртових сумішей було застосовано на авіаційних двигунах фірм «Пратт-Уітней» R -2800-59, «Аллісон» V -1710-93, ДВ-605А1 та інших. Управління системою подачі води здійснювалося за допомогою тумблера на ручці сектора газу. У даному матеріалі дивує інше: на зазначених двигунах доукомплектування системою упорскування води проводилося в екстреному порядку, без проведення обов'язкових державних випробувань, за розпорядженням Технічного відділу - ВПС США. Ця обставина свідчить про те, що в нешкідливості та ефективності застосування упорскування води для двигуна авіаційні інженери не сумнівалися, а військове відомство США надавало цьому великого значення. Ймовірно, не останню роль тут відіграли військові літаки супротивника, зокрема Німеччини, з якою йшла війна.

Під час Другої світової війни у Німеччині [7, 7, 14] системою упорскування води оснащувалися радіальні авіаційні двигуни Daimler Benz серії 605 та BMW 801 D для Messerschmitt Bf 109, Junkers Jumo 213 A 1 для FockeWulf 190 D та інші. Вода додавалася до вже готової паливно-повітряної суміші, охолоджуючи її, і потрапляла разом з нею в камеру згоряння. Від контакту з розпеченою поверхнею поршня та стінок циліндра вода перетворювалася на пару, яка допомагала штовхати поршень. Попереднє охолодження паливоповітряної суміші дозволяло збільшити її обсяг на упорскуванні і підвищувало ефективність згоряння палива. Згодом воду замінили спеціальною сумішшю MW - 50, що складається з рівних частин води і метанолу, тим самим збільшивши потужність двигунів на 25.30%.

Укладаючи військовий етап розвитку систем упорскування води (пізніше вони стали називатися системами «водної інжекції»), можна сказати, що в процесі проведених досліджень було остаточно встановлено позитивний вплив присутності води в камері згоряння на робочі процеси в двигуні. Разом з тим, головним напрямом досліджень того періоду була боротьба з детонацією.

Завдяки цим дослідженням, сьогодні ми знаємо [11]: «Водна інжекція може перешкоджати появі детонації та працює у трьох напрямках. По-перше, в процесі впорскування води в систему впускного колектора до головки циліндра, відбувається поглинання тепла крапельками води з повітря. Охолоджене повітря має велику щільність, тим самим збільшуючи кількість кисню, що потрапляє в циліндр. Вода має високу теплоємність (може поглинути багато енергії за незначного підвищення температури). Потім, невеликі краплі випаровуються в циліндрі і охолоджують його, при цьому, отримана пара збільшує тиск в циліндрі. Це діє як антидетонант і також очищує порожнини камери згоряння від нагару, таким чином усуваються небажані «гарячі » точки».

У післявоєнний період дослідження впливу водної інжекції на ефективність використання наземної техніки продовжилися. Зокрема, було проведено стендові та дорожні (ходові) випробування, пов'язані з упорскуванням води у впускну систему двигунів автомобілів ЗІС-150 та ЗІС-151, а також автобусів ЗІС-155, що випускаються з 1947 по 1957 рік заводом імені Сталіна (нині автомобільний завод імені Лихачова, м. Москва). Причому замість етилованого бензину (з октановим числом 66) застосовували неетиловане пальне (з октановим числом 56) [20]. За кордоном, за даними літературних джерел [7, 9], провідні автовиробники, зокрема Chrysler (США), також застосовували цей метод для збільшення потужності та зниження детонації на моделях з моторами великого обсягу. Шведська автомобілебудівна компанія Saab , компанія з авіаційним корінням, встановлювала систему упорскування води на швидкісному Saab 99 Turbo S до початку 1980-х років. Разом з тим, з появою інтеркулерів, що охолоджують повітря перед упорскуванням в циліндри, застосування води в автомобільних моторах втратило свою актуальність.

Змінилися й засоби подачі води в циліндри двигунів. У сімдесяті роки ХХ століття з'явилися роботи з водорозчинних антидетонаторів, були розроблені

способи одержання водопаливних емульсій безпосередньо на автомобілі.

Наприкінці XX століття і на початку XXI століття інтерес до водної інжекції виявився знову. Причиною цього став розвиток мікропроцесорної техніки, що дозволяє суттєво розширити межі регулювання робочих процесів у двигунах внутрішнього згоряння і, що найголовніше, керувати цими процесами. З'явилася можливість застосовувати на автомобілях складні системи з електронним керуванням, які могли працювати в автоматичному режимі, не відволікаючи водія від процесу керування власне автомобілем .

Лідером у використанні води у робочих процесах двигуна внутрішнього згоряння, на думку автора, є німецька фірма BMW (аббревіатура від Bayerische Motoren Werke AG , "Баварські моторні заводи"). У 2000 році фірма BMW показала свою нову систему Turbosteamer (Турбопаровик) [97], яка, на думку доктора Раймонда Фрімана (керівника групи розробників), здатна використовувати до 80% теплової енергії двигуна, що втрачається сьогодні з безкорисливо йдуть у атмосферу гарячими вихлопними газами. Автори розробки переконані, що створений ними гібрид парового автомобіля, вийде на ринок вже в 2015 році.

Зовнішній вигляд макета парового гібрида Turbosteamer показаний на малюнку 1.4.

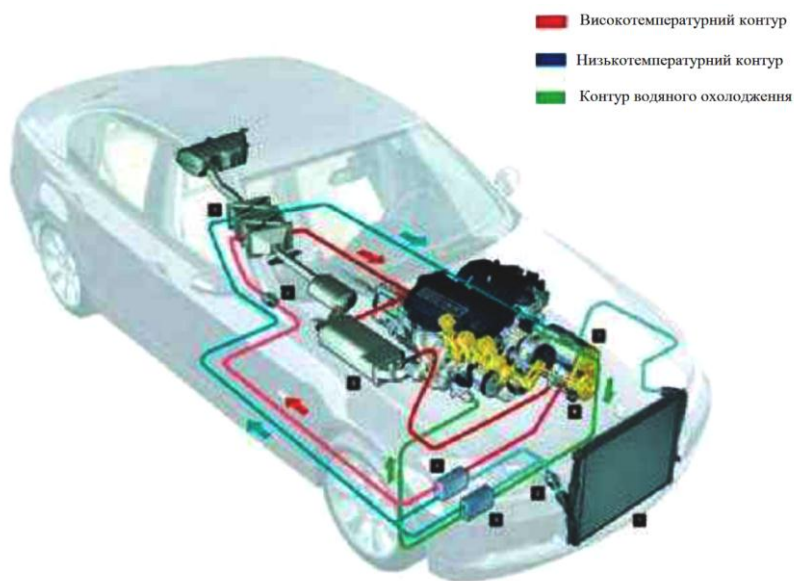


Рисунок 1.4 - Макет парового гібрида « Turbosteamer » [97]: 1 – радіатор (низькотемпературний конденсатор); 2 – помпа; 3 – генератор пари; 4 – генератор пари (високотемпературний конденсатор); 5 – перегрівач пари; 6 - генератор пари (низькотемпературний перегрівач пари; 7 – низькотемпературна турбіна; 8 – високотемпературна турбіна.

Німецькі інженери залишили на місці систему охолодження двигуна і додали в конструкцію ряд складних допоміжних компонентів, у тому числі теплообмінник, що відбирає теплову енергію вихлопних газів, герметичний паровий котел і парову турбіну, пов'язану з колінчастим валом двигуна ремінним приводом. За твердженням розробників, використання парового двигуна Turbosteamer дає приріст потужності і крутного моменту на 10% і економію палива близько 15%. Всі елементи парової системи уживаються зі звичайною системою живлення та вихлопу, а парова машина навішується на двигун поруч із генератором. У пропонованій гібридній системі вихлопні гази нагрівають і перетворюють на пару рідину (воду), пара приводить в дію малогабаритну розширювальну машину, яка з'єднана через ремінну передачу з колінчастим валом двигуна.

Разом з тим, використання гібридної схеми є досить віддаленою перспективою.

Більш реальні перспективи має шеститактний двигун Брюса Кроуера (рисунок 1.5) концепції Steam – o – Lene [9]. Цикл Кроуера відрізняється від традиційного циклу Отто, у Отто цикл становить 1:4, а у Кроуера - 1:3, додаткові 40% корисної роботи відбуваються на незмінній кількості палива. На четвертому такті розпечені вихлопні гази не видаляються з камери згоряння повністю, а стискуються поршнем, створюючи високий тиск. Вода в такому середовищі випаровується швидше та рівномірніше. Далі відпрацьована пара надходить у конденсатор, де охолоджується і знову перетворюється на воду.



Рисунок 1.5 – Робочий цикл двигуна Брюса Кроуера [97]

Слід зазначити, що ідея шеститактного ДВС із уприскуванням води в циліндри майже за 90 років до Брюса Кроуера спала на думку Леонарду Даєру зі штату Коннектикут (США), який запатентував свій винахід у 1920 році. Проте машинобудівні компанії залишили цей винахід без уваги, і патент втратив свою силу. У 2007 році патентне відомство США визнало пріоритет за Брюсом Кроуером.

Матеріали [8, 9] дозволяють зробити висновок, що основною перевагою Steam - o - Lene перед традиційними чотиритактними ДВС є те, що вирішується проблема ефективного охолодження двигуна, навіть з'являється можливість - відмови від традиційного радіатора. У свою чергу, внутрішнє охолодження дозволяє на 30-50% форсувати двигуни за ступенем стиснення, уникнувши при цьому детонації, що підвищує ефективність згоряння паливоповітряної суміші (до 40% порівняно з циклом Отто). Двигун може працювати на низькоякісному дешевому паливі. На думку творця, паливом можуть бути біоетанол, дизель, природний газ і навіть топковий мазут. Як недоліки двигуна відзначаються проблеми зимової експлуатації, витрати на водопідготовку. Потрібно сказати, що ці недоліки є традиційними для використання водної інжекції.

Разом про те, практичне використання переваг шеститактного циклу пов'язані з корінною переробкою існуючих ДВС. На думку автора, більш прийнятним способом використання водної інжекції в найближчій перспективі є використання пристроїв на основі тюнінг-технологій, адаптованих до існуючих двигунів, що знаходяться в умовах рядової експлуатації .



Рисунок 1.6 – Пристрій для впорскування води виробництва фірми Aquamist [9]

Як такі пристрої, перш за все, слід розглянути британську фірму Aquamist [3], яка на сьогоднішній день є одним з провідних виробників систем упорскування води. Її продукція використовується на більшості вералійних автомобілів. Зокрема, автомобілі WRC ще зовсім недавно їздили "на воді", поки FIA не ввела заборону, але в деяких інших серіях упорскування води залишається. Продукція фірми Aquamist є на ринку з 2003 року і користується достатньою популярністю. Найновіша розробка фірми - система HFS 3- PWM, що доповнює лінійку продукції Aquamist , представлена на малюнку 1.6. На малюнку 1.7 показано принципову схему її роботи.

HFS-3 (plug and play) GENERIC WIRING DIAGRAM v1

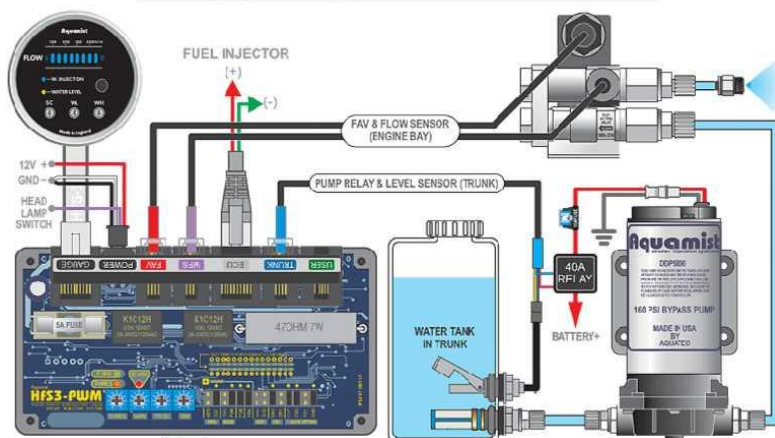


Рисунок 1.7 - Принципова схема роботи системи HFS-3 виробництва фірми Aquamist, призначеної для впорскування води [9]

Система HFS -3 виробництва фірми Aquamist дозволяє забезпечити точне дозування упорскування води/метанолу (етанолу) у суміші з основним паливом для сучасних двигунів внутрішнього згоряння. Особливістю роботи систем фірми Aquamist і те, що вони використовують насоси, які працюють із низьким потоком, але високим тиском. Для цього насос використовує подвійний цикл: спочатку вода затягується, а потім випускається через клапан, це забезпечує точне дозування при тиску близько 3 бар. Насос має вбудовану електронну систему для контролю циклу. Вартість систем фірми Aquamist на сьогоднішній - день складає від 200 до 3000 дол. США, що робить їх досить доступними. Проте фахівці [15, 69, 133] зазначають, що, незважаючи на використання функції plug and play » (підключи та грай), система досить складна в налаштуванні і ще більш складна в «правильному налаштуванні». Очевидно, що для «правильного налаштування» не вистачає знань, оскільки впорскування води все ще залишається швидше екзотикою, ніж правилом. Процес потребує поглибленого вивчення.

Іншою подібною системою є система « Ecomax » (рисунок 1.8), яка значно простіше за конструкцією, але, на думку розробників [9], за своїми функціями не поступається системам фірми Aquamist .



Рисунок 1.7 - Пристрій для упорскування води «Есомах» [9]

Виробником системи «Есомах» виступає компанія «Екотюнінг - потужність, економія, ресурс» (Україна), що займається виробництвом та розповсюдженням систем енергозбереження. Виробники стверджують, що система «Есомах» «підходить для всіх типів легкових та вантажних автомобілів на бензині, газі та дизельному паливі» [9]. Пристрій є автоматизованою системою подачі води, тобто системою водної інжекції з термоконтролем і підбором оптимальної витрати води в залежності від частоти обертання колінчастого валу двигуна. На думку розробників, застосування системи «Есомах» дозволить збільшити крутний момент двигуна до 30%, домогтися економії палива на 10-35%, забезпечить більш ефективне охолодження, м'якість і зниження шумності роботи двигуна, гасіння детонації та калільного запалення, призведе до повного зникнення нагару. поршнях, клапанах та свічках, а також до зменшення викиду СО втричі.

Очевидно, що твердження розробників системи «Есомах» надто сміливі і більше схожі на звичайний рекламний трюк, проте безперечно те, що водна інжекція призводить до підвищення ефективності використання вуглеводневих палив у двигунах внутрішнього згорання. Резерви застосування води, як добавки до палива, для двигунів внутрішнього згорання визначені досить умовно і багато в чому залежать від особливостей конструкції конкретного двигуна. Робочі процеси

остаточно не вивчені. Незважаючи на велику кількість досліджень, досі немає достовірного аналізу результатів проведених експериментів.

1.3. Методи та пристрої для іжекції води в ДВЗ

Згідно проведеного встановлено, що на даний час розроблено кілька способів подачі води до циліндрів двигуна (рис. 1.8.). При цьому існує можливість подача води у рідкій фазі або у вигляді пари. Подача водяної пари до камери згоряння може бути реалізована в силових установках, що мають контур утилізації теплоти (теплоти ОГ, охолоджувальної води, мастила), що відводиться від двигуна та використовуваної для підігріву води та її випаровування. Для швидкохідних двигунів транспортним засобом доцільним є подача води в КС в рідкій фазі.

Найбільше практичне застосування знайшли такі способи: застосування в якості палива водопаливних емульсій (ВТЕ), впорскування води безпосередньо в циліндри, подача води на всмоктування (у впускний трубопровід).

Проведено численні дослідження дизелів, що працюють на водопаливних емульсіях різного складу [9-20]. Вони підтвердили ефективність використання емульгованих палив у дизелях. Але застосування ВТЕ як моторне паливо має й низку недоліків. До них можна віднести необхідність використання обладнання для емульгування палив, нестабільність ВПЕ, проблеми зносу деталей циліндропоршневої групи та паливної апаратури. Слід також відзначити проблеми фільтрації ВТЕ та необхідність переходу на роботу на дизельному паливі (ДП) при пуску та зупинки дизеля [21, 22]. Частина цих недоліків усувається при подачі води у впускну систему дизеля або у його циліндри.

Поліпшення ряду показників дизелів може бути досягнуто при подачі води в впускну систему двигуна. При введенні у впускний колектор води або водяної пари вони відіграють роль не тільки інертного розріджувача робочої суміші, але й беруть участь у реакції горіння, призводячи до збільшення теплоти, що виділилася, і зниження емісії токсичних компонентів ВГ

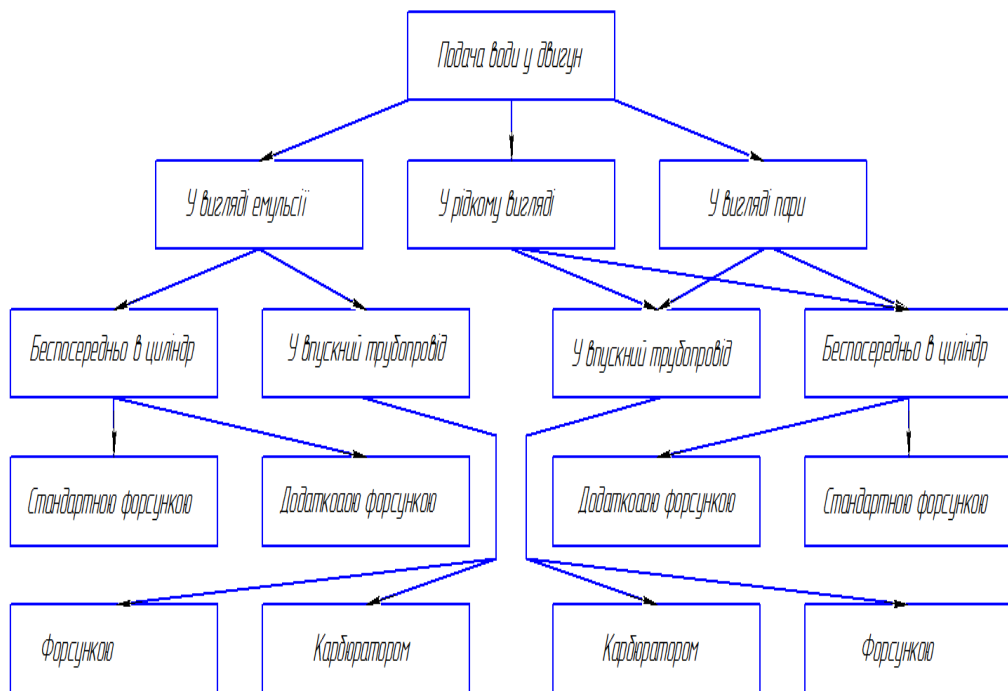


Рисунок 1.8. Способи подачі води в циліндри двигуна.

Можлива подача води до впускної системи як у паровій фазі, так і в рідкій.

У другому випадку вода подається або через спеціальний карбюратор, встановлений у впускній системі, або впорскується форсункою у впускний трубопровід дизеля.

Останній захід найбільш доцільний у дизелях з високим наддувом, в яких вода, що випаровується у впускній системі, охолоджує наддувне повітря.

У ряді випадків це дозволяє уникнути організації проміжного охолодження наддувного повітря під час використання двоступінчастої системи наддува.

1.5. Актуальність теми магістерської роботи та задачі дослідження

На підставі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити висновок про те, що одним з основних факторів, що визначають ефективність

автотранспортних перевезень виступає досягнутий рівень ефективності механізованих процесів. Причому енергетичні ресурси мають пріоритетний вплив на його кінцеві показники. У зв'язку з цим, підвищення ефективності механізованих виробничих процесів неминуче вимагатиме суттєвого поліпшення техніко-економічних показників функціонування транспортних засобів, зокрема, підвищення паливної економічності їх двигунів.

Нафтові палива ще довго залишаться переважаючими джерелами енергії для двигунів внутрішнього згоряння, тому актуальним завданням, сьогодні, є їх економне витрачання.

Рідкі вуглеводневі палива, запас яких, на жаль, обмежений і скорочується, ще довго залишаться незамінним паливом для двигунів внутрішнього згоряння. У зв'язку з цим питання їх економного витрачання залишаються актуальними, а проведені дослідження з підвищення паливної ефективності роботи ДВЗ практично і значущими.

Застосування у складі паливно-повітряної суміші, як у складі ВПС, так і в рідкому вигляді безпосередньо в циліндри ДВЗ, або у впускний колектор є перспективним способом підвищення паливної економічності двигунів. Проте, проведені у цьому напрямі дослідження, стосовно двигунів, залишають безліч не вирішених питань. Однозначних рекомендацій щодо застосування води як зволожувач свіжого заряду не виявлено. Теорія робочого процесу в циліндрі дизельного двигуна із застосуванням водної інжекції також розроблена недосить повно. Разом з тим, використання енергії водяної пари, що утворилася в процесі випаровування, сприяє не тільки підвищенню потужності двигуна і його паливної економічності, а й підвищенню ефективності роботи системи охолодження. Відбувається внутрішнє охолодження в циліндрі двигуна, що сприяє підвищенню його теплового ККД. Також мало дослідженими залишаються питання токсичності відпрацьованих газів.

У зв'язку з цим можна висунути гіпотезу, що застосування водної інжекції у впускний трубопровід сприятиме підвищенню потужності дизельного двигуна ,

його паливної економічності, термічного ККД, а також поліпшенню екологічних показників, що в сукупності призведе до підвищення ефективності використання транспортних засобів.

Для перевірки висунутої гіпотези необхідно вирішити такі:

1) Визначити основні параметри розпилювача водної форсунки та провести теоретичні дослідження робочого процесу дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при застосуванні інжекції води у впускний колектор.

2) На базі двигуна Д-240 розробити експериментальну установку, яка - дозволяє провести комплекс експериментальних досліджень робочого процесу дизельних двигунів 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції.

3) Провести лабораторні та експлуатаційні випробування двигуна із застосуванням водної інжекції.

4) Дати техніко-економічну та екологічну оцінку застосування водної інжекції для дизельних двигунів.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обладнання, методи вимірювань та апаратура, що застосовувалась при експериментальних дослідженнях

Відповідно до розробленої загальної методики досліджень експерименти були проведені у два етапи:

- лабораторні - зняття навантажувальних та зовнішніх швидкісних характеристик двигуна 4Ч 11/12,5 при інжекції різних масово-об'ємних часток води у впускний колектор;
- експлуатаційні.

Відповідно до програми експериментальних досліджень було обрано методи виміру та визначено місця встановлення датчиків, розроблено конструкції струмознімачів та схеми вимірювання окремих параметрів.

Лабораторні випробування проводилися в приміщенні з активною вентиляцією при температурі навколишнього повітря, що не перевищує 20...30 °С. Атмосферний тиск було зафіксовано не більше 90...100 кПа (675...760 мм рт. ст.). Значення параметрів роботи двигуна (величина крутного моменту, частота обертання колінчастого валу двигуна і витрата палива) визначалися одночасно. Час виміру витрати палива становив не менше 30 с. Досліди проводилися згідно з рекомендаціями ГОСТ 18509-88 [26] та ГОСТ Р 41.96-2011 [38].

Перед початком проведення випробувань було проведено тарування гальмівного стенду та приладів. Під час проведення вимірювань фіксувалися температури:

- подача повітря в двигун (вимірювання проводилися на відстані не більше 0,15 м від вхідного отвору в очищувач повітря);
- відпрацьованих газів двигуна (вимірювання проводилися на відстані не

більше 0,10 м за вихідним фланцем випускного трубопроводу);

- охолоджуючої рідини та олії в картері двигуна;
- дизельного палива (на вході до паливної системи двигуна). Фіксувався також атмосферний тиск і тиск відпрацьованих газів

(На відстані не більше 0,10 м від вихідного фланця випускного трубопроводу).

При випробуванні двигуна був використаний електричний гальмівний стенд КІ-1363В ГОСНИТИ .



Рисунок 2.1. Електричний гальмівний стенд КІ-1363В ГОСНИТИ

Таблиця 2.1. Технічна характеристика електричного гальмівного стенду КІ-1363В ГОСНИТИ

Показник	КІ-1363В
Електрична машина: марка	АКБ 82-6
потужність, кВт	40
Синхронна частота обертання ротора, хв ⁻¹	1000
Межі регулювання частоти обертання ротора, хв ⁻¹ : в режимі двигуна	500...950
у гальмівному режимі	100...2000
Реостат рідинний: ємність бака, л	300
Максимальний момент, що вимірюється, Н-м	500

Ваговий механізм:	
межі виміру, Н	0.500
ціна поділу шкали, Н	5
похибка вагового механізму, Н	5
розрахункове плече, мм	716,2

2.2. Вибір методу та розробка оснащення для іжекції води в ДВЗ

Випробувальний стенд додатково був обладнаний пристроєм для подачі - води у впускний колектор експериментального двигуна 4Ч 11/12,5 (Рисунок 2.2).



Рис 2.2 - Пристрій для подачі води у колектор впускний експериментального двигуна 4Ч 11/12,5

Подача води здійснювалася під тиском, створюваним електричним відцентровим насосом. Синхронність управління подачею води залежно від навантаження на гальмі забезпечувалася за допомогою механічного зв'язку редуктора рідинного реостату з кульовим краном на водяній магістралі системи водної інжекції (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 - Система управління подачею води

Дослідження робочого процесу (індикування) здійснювалося за допомогою п'єзоелектричного датчика тиску, який був встановлений у першому циліндрі експериментального двигуна (рисунок 2.4). Враховуючи те, що показання п'єзоелектричного датчика значною мірою залежать від нагріву чутливого елемента, датчик був забезпечений системою охолодження. Представлена на малюнку 2.4, система охолодження дозволяла забезпечити стабільну температуру п'єзоелектричного датчика протягом усього досвіду.



Рисунок 2.4 - П'єзоелектричний датчик тиску із системою охолодження

Посилення сигналу здійснювалося за допомогою розробленого самостійного

підсилювача (рисунок 2.5). Посилений сигнал передавався на аналого - цифровий перетворювач (АЦП) ЛА-50 USB (рисунок 2.6),

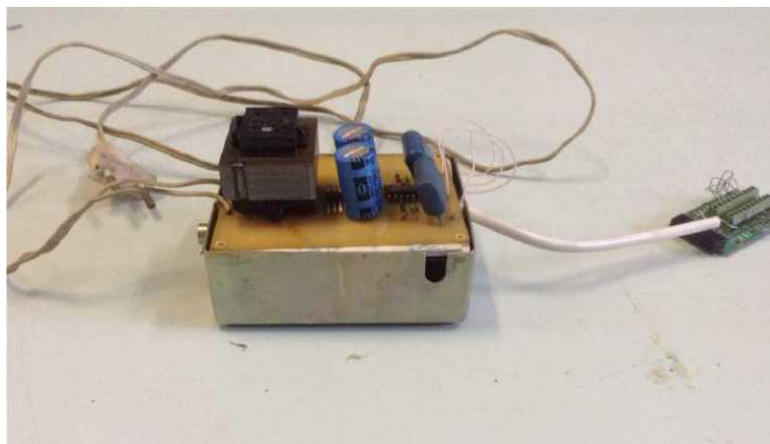


Рисунок 2.5 - Підсилювач сигналу п'єзоелектричного датчика

Запис сигналу здійснювалася персональною ЕОМ (notebook) за допомогою програмного забезпечення, що додається розробником до аналого цифрового перетворювача.



Рисунок 2.6 - Аналого-цифровий перетворювач ЛА-50 USB

Плата АЦП, що використовується при проведенні досліджень, супроводжувалася індивідуальним метрологічним паспортом, в якому були вказані результати її калібрування за параметрами згідно з ГОСТ 24736-81, ГОСТ 8.009-84. Знання цих характеристик дозволило коректніше вирішити задачу застосування АЦП в проведених дослідженнях з індикації двигуна і дало

можливість до проведення експерименту оцінити похибки, що вносяться всім аналогово цифровим каналом в кінцевий результат вимірювання.

Для підвищення надійності проведення вимірів паралельно використовувався діагностичний комплекс MotoDoc III, розроблений QUANTEX Laboratory (рис. 2.7. - 2.9), який був виконаний у вигляді приставки до комп'ютера. За допомогою набору з'єднувальних кабелів та датчиків прилад підключався до досліджуваного двигуна. Датчик тиску в циліндрі двигуна діагностичного комплексу MotoDoc III (рисунок 2.7) виготовлений за технологією «кремній на сапфірі», що забезпечило якісні характеристики сигналів, що заміряються, а титанова мембрана дозволила датчику працювати в агресивному середовищі відпрацьованих газів.



Рисунок 2.7 – Датчик тиску діагностичного комплексу MotoDoc III

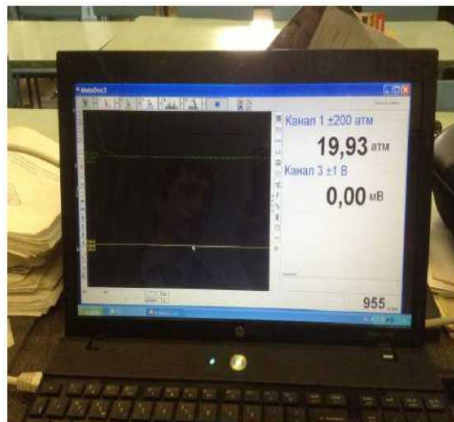


Рисунок 2.8 - Реєстрація показань діагностичного комплексу MotoDoc III

Живлення приладу здійснювалося від акумулятора. Слід зазначити, що мотор-тестер MotoDoc III здатний працювати в дуже широкому діапазоні - живлячих напруг (від 7,0 до 30,0 В), без спотворень вихідного сигналу. Ця обставина була дуже важливою під час проведення випробувань, які мали достатню тривалість у часі. Крім того, мотор-тестер MotoDocIII гальванічно розв'язаний з комп'ютером, що також значно підвищило ступінь захисту реєструючого електронного обладнання під час проведення лабораторних випробувань двигуна.

2.3. Методика та обладнання для дослідження екологічних показників двигуна при застосуванні водної інжекції

Для визначення токсичності відпрацьованих газів дизельного двигуна був використаний газоаналізатор ГІАМ-27-02, в якому був застосований оптико - абсорбційний метод аналізу газів, заснований на зміні поглинання - інфрачервоної енергії випромінювання аналізованим компонентом. Газоаналізатор ГІАМ-27-02 призначений для визначення вмісту окису вуглецю (CO) та вуглеводнів (CH) (за гексаном) у відпрацьованих газах дизельних двигунів. Основні технічні можливості газоаналізатора представлені у таблиці 3.2.

Межі основної наведеної похибки для вимірювання вмісту CO, CH і CO₂ газоаналізатором ГІАМ-27-02 становили не більше $\pm 5\%$. Час встановлення

показань становив трохи більше 10 с, що значно менше часу, затрачуваного на замір витрати палива (щонайменше 30 с) під час проведення основний серії дослідів.

Таблиця 3.2 – Технічна характеристика газоаналізатора ГІАМ-27-02

Показник	Діапазон вимірів
Об'ємних часток CO, %	0,0 - 0,5
Об'ємних часток CH ₄ , ppm	0,0 - 5000,0
Об'ємних часток CO ₂ , %	0,0 - 16,0
Частота обертання колінчастого валу двигуна, хв ⁻¹	500,0 – 9900,0
Час встановлення показань, с	не більше 10
Час безперервної роботи без коригування показань, год	не менше 8
Напруга живлення, В: - від мережі змінного струму: - від бортової мережі	220 12

Ця обставина дозволила вести за міри токсичності газів, що відпрацювали, паралельно і значно прискорило проведення експериментальних досліджень без шкоди їх якості. Димність від газів, що працювали, визначалася за допомогою графічного димоміру «ІнфракарД» версії 1.00.0002 (виробництво ЗАТ «Альфа-динаміка Хімавтоматика») (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 - Димомір графічний «Інфракар-Д»

Коротка технічна характеристика димоміру "Інфракар-Д" представлена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Технічна характеристика димоміру графічного «Інфракар-Д»

Показник	Діапазон вимірів
Межа абсолютної похибки, що допускається, 1/м при	$\pm 0,05$
Межа основної наведеної похибки, %	$\pm 1,0$
Час спрацювання, с	не більше 1,5
Температура навколишнього повітря, при якій забезпечується нормальна робота приладу, °C	0 - 35

2.4. Методика, пристрої та прилади для проведення порівняльних досліджень

Експериментальні дослідження були проведені на основі стандартних методик, викладених у державних стандартах, що поширюються на випробовування та експлуатацію автотракторних засобів. Зокрема , ГОСТ 23729-88 [30], ГОСТ 24055-88 [31], ГОСТ 30745-2001 (ISO 789-9-90) [35], ГОСТ 7057-2001 [37], ГОСТ Р 53056-2 41], ГОСТ Р 54784-2011 [43], ГОСТ 31345-2007 [36]. Проведення лабораторних досліджень впливу водної інжекції на технічні та екологічні параметри двигуна 4Ч 11/12,5, як аналог був використаний двигун Д-240, проводилися відповідно до ГОСТ 18509-88 [26], ГОСТ 20000-88 (СТ РЕВ 100 -78) [28], ГОСТ Р 41.96-2011 [38].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА

3.1. Результати лабораторних випробувань дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції

3.1.1. Визначення впливу водної інжекції на показники ефективності та економії палива при роботі двигуна

Лабораторні випробування дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 були проведені з метою визначення впливу водної інжекції на показники ефективності та економії палива при його роботі. В основу проведених досліджень було покладено рекомендації ГОСТ 18509-88 [26]. У процесі проведення випробувань було знято регуляторні зовнішні швидкісні характеристики двигуна при різних обсягах (кількості) подачі води в циліндри двигуна з проведенням його індикування на всіх досліджуваних режимах. Досліди проводилися в діапазоні частот обертання колінчастого валу від режиму холостого ходу (2350 хв^{-1}) до режиму максимального моменту, що крутить (1400 хв^{-1}).

Зняття характеристики починалося з режиму холостого ходу і закінчувалося в режимі максимального моменту, що крутив, який був визначений заздалегідь при проведенні серії попередніх випробувань. На початку експерименту проводилися - досліди без подачі води (робота на чистому дизельному паливі), потім досліди із застосуванням водної інжекції у впускний колектор двигуна. Кількість води змінювалася ступінчасто, з інтервалом в 10 %, від обсягу палива, що подається. Максимальна кількість води, що подається становила 30%. Дана межа була встановлена за даними досліджень [8, 129] і перевірена ще раз серією запобіжних пошукових випробувань. Результати серії пошукових випробувань представлені у таблиці 3.1 та малюнку 3.1.

Таблиця 3.1 - Результати випробувань

Показник	Кількість води, що подається, % від циклової подачі палива*								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Номінальна потужність, кВт	56,61	59,87	62,85	64,32	65,31	66,14	66,32	65,53	64,78
Циклова подача води, мг/цикл	0	2,964	5,928	8,892	11,856	14,82	17,784	20,748	23,712

*Примітка: Як вихідна циклова подача дизельного палива прийнята циклова подача палива при роботі двигуна на номінальному режимі без водної інжекції.

В результаті проведеного регресійного аналізу отриманих даних було встановлено, що зміна ефективної потужності двигуна 4Ч 11/12,5 залежно від кількості води, що подається за допомогою інжекції у впускний колектор в межах зміни факторного простору може бути, з достатнім ступенем довірчої ймовірності ($R = 0,99$), описано поліномом другого порядку виду

$$y = 56,732 + 0,703 \cdot x - 0,0127 \cdot x^2 \quad (3.1)$$

де y - ефективна потужність двигуна, кВт; x - циклова подача води, % від циклової подачі палива

N_e , кВт

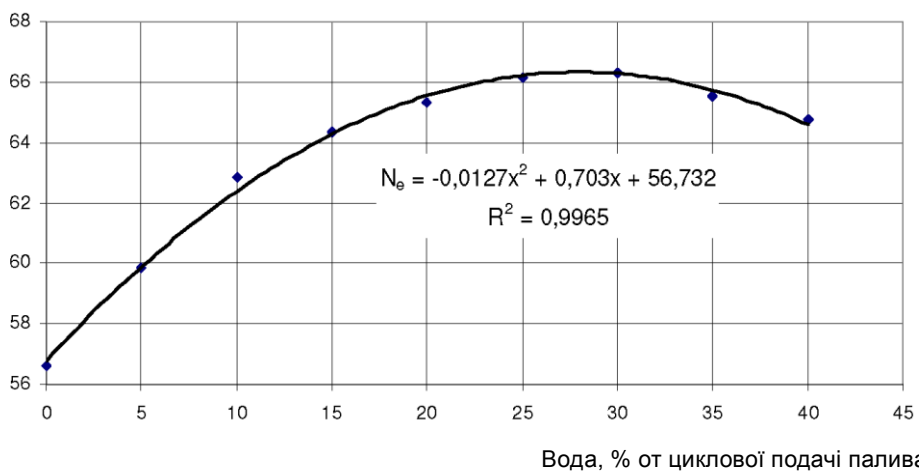


Рисунок 3.1 - Зміна ефективної потужності двигуна 4Ч 11/12,5 в залежності від кількості води, що подається

Для пошуку оптимального значення циклової подачі води знайдемо похідну

від виразу (4.1) і прирівнюємо її нулю.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0,703 - 0,0254 \cdot x = 0 . \quad (3.2)$$

Вирішивши отримане рівняння (4.2), отримаємо $x = 27,68\%$.

Таким чином, оптимальне значення циклової подачі води становить близько 28% від циклової подачі дизельного палива. Отримані значення досить добре узгоджуються із дослідженнями Сторожова І.І. [9], згідно з якими циклова подача становить близько 32% від циклової подачі дизельного палива, та з дослідженнями Бистрова О.І. [8], де максимально можлива циклова подача води була встановлена рівною 33% або дорівнює третій частині від циклової подачі палива.

На підставі проведених досліджень можна прийняти, що оптимальна циклова подача води повинна становити близько 30% від циклової подачі дизельного палива (близько 17...19 мг/ц на номінальному режимі роботи двигуна).

В результаті проведених випробувань було отримано зовнішню швидкісну характеристику двигуна 4Ч 11/12,5 з регулятором при роботі на дизельному паливі (рисунок 3.2).

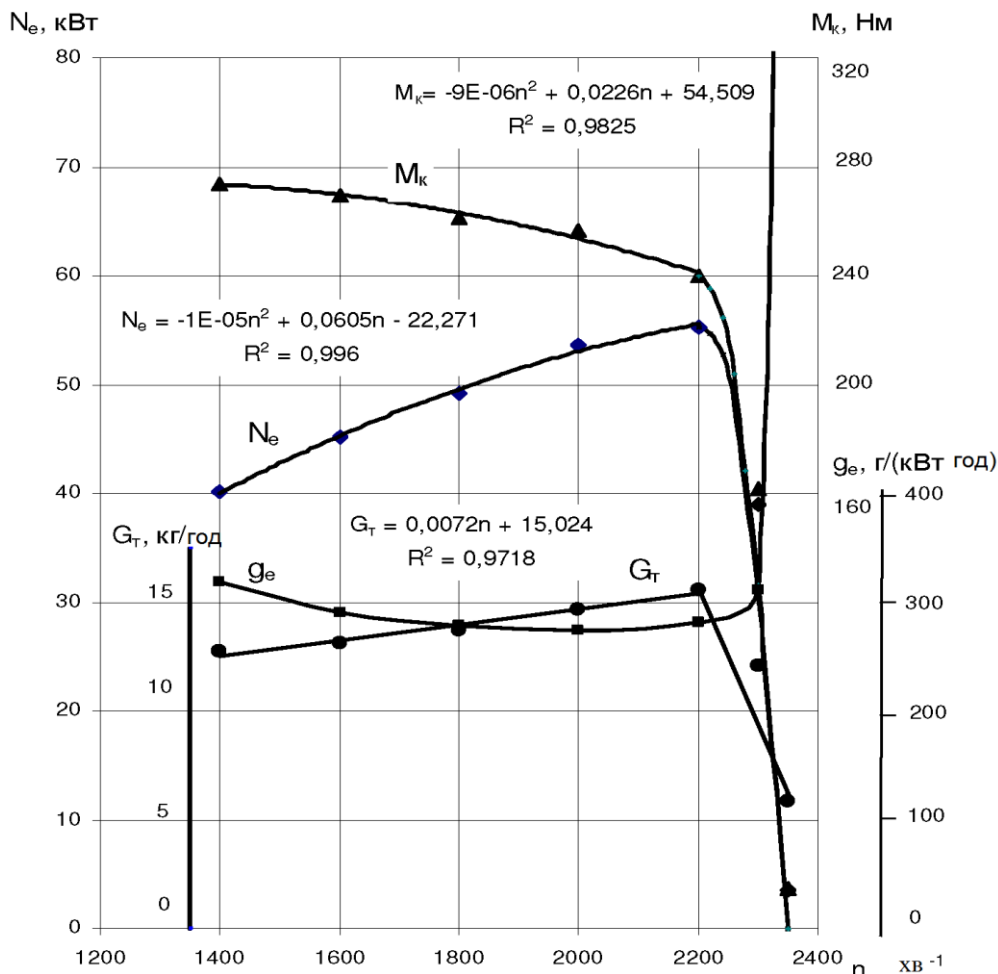


Рисунок 3.2 - Регуляторна зовнішня швидкісна характеристика двигуна 4Ч 11/12,5 під час роботи на дизельному паливі

Аналіз отриманої характеристики підтверджує, що робота експериментального двигуна здійснюється у швидкісному діапазоні, встановленому заводом-виробником. Криві регуляторної характеристики складаються із двох гілок регуляторної (від 2350 хв⁻¹ - режим холостого ходу, до 2200 хв⁻¹ - номінальний режим) і коректорної (від 2200 хв⁻¹ - номінальний режим, до 1400 хв⁻¹ - режим максимального моменту, що крутить).

Відповідно до мети та поставлених завдань досліджень, спрямованих на підвищення паливної економічності двигуна 4Ч 11/12,5 за рахунок

використання водної інжекції, нами було проведено зняття показників швидкісних характеристик двигуна при подачі 10, 20 і 30% - ної частки води в впускний колектор двигуна за допомогою інжекції. Замір відсоткового вмісту води у складі паливоповітряної суміші вироблявся ваговим способом, від ваги - витраченого дизельного палива.

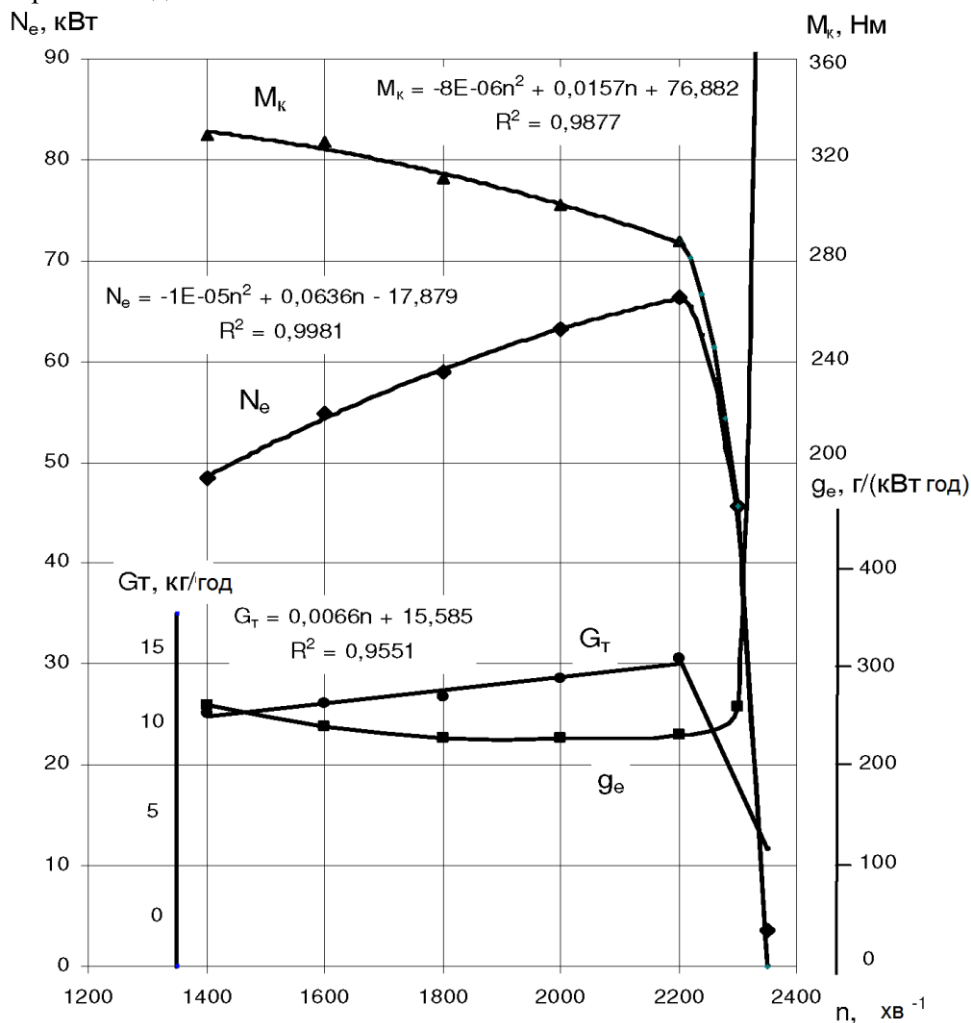


Рисунок 3.3 - Регуляторна зовнішня швидкісна характеристика двигуна 4Ч 11/12,5 під час роботи на суміші дизельного палива та води (30 %)

На малюнку 4.3 представлений фрагмент експериментальних досліджень, коли був отриманий максимальний ефект від подачі води (30% частка води) у

впускний колектор експериментального двигуна 4Ч 11/12,5.

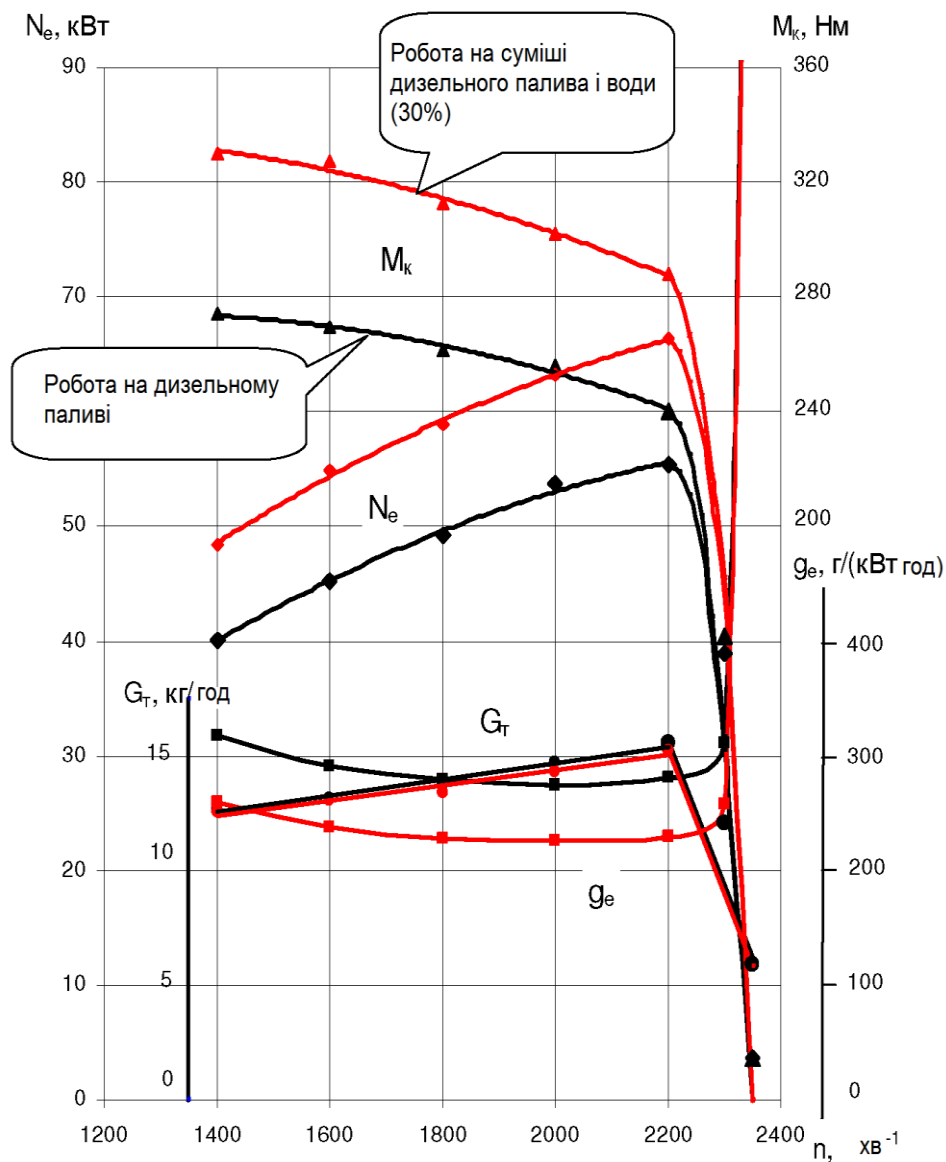


Рисунок 3.4 - Поєднана регуляторна зовнішня швидкісна характеристика двигуна 4Ч 11/12,5

Аналіз представлених характеристик показує, що годинна витрата палива стандартного та експериментального двигуна залишилася практично незмінною. Деякий розбіжність ліній годинної витрати палива (G_x) пояснюється

похибкою вимірювальної апаратури, коливаннями частоти обертання колінчастого валу двигуна, а також нестійкою роботою регулятора (зазори, коливання пружних елементів, коливання частоти обертання та палива). які є суттєвими і навіть у сукупності не перевищували 5 %.

Ця обставина легко зрозуміла, так як паливний насос пов'язаний з колінчастим валом двигуна жорстким механічним зв'язком, тому циклова подача палива насосом залежить тільки від швидкісного режиму роботи двигуна і не залежить від складу робочої суміші. Оскільки інжекція води здійснювалася у впускний колектор експериментального двигуна, то кількість води, що подається, не впливало на витрату дизельного палива. Однак завдяки застосуванню водної інжекції сталося збільшення ефективної потужності: на номінальному режимі - на 10,84 кВт (на 19,59 %); на режимі максимального моменту, що крутить, - на 8,23 кВт (на 20,50 %).

Відповідно відбулося збільшення та крутного моменту двигуна: на номінальному режимі – на 47,05 Н-м (на 19,59 %); на режимі максимального крутного моменту - на 56,18 Н-м (на 20,51%).

Розрахунок коефіцієнта пристосовності для двигуна 4Ч 11/12,5, який працює на дизельному паливі з додаванням 30% води, показує, що він склав

$$K_{\pi} = \frac{330,08}{287,24} = 1,1491$$

тобто він збільшився на 0,88% (на дизельному паливі $K_{\pi} = 1,1403$).

З метою наочного уявлення про економію дизельного палива при використанні водної інжекції за даними зовнішніх швидкісних характеристик була побудована комбінована характеристика експериментального двигуна 4Ч 11/12,5 щодо витрати дизельного палива залежно від ефективної потужності - (рисунок 3.5).

Аналіз представленої характеристики показує, що отримані експериментальні дані щодо годинної витрати палива з 99% довірчою

ймовірністю можуть бути описані лінійними рівняннями. На підставі порівняння отриманих рівнянь можна зробити висновок, що при застосуванні водної інжекції з часткою води, що дорівнює 30 %, відносна економія дизельного палива досягає 36 г/кВт ефективної потужності .

3.2. Оцінка впливу водної інжекції на екологічні показники роботи двигуна

Другим завданням лабораторного циклу експериментальних досліджень була оцінка впливу водної інжекції на екологічні показники роботи двигуна 4Ч 11/12,5.

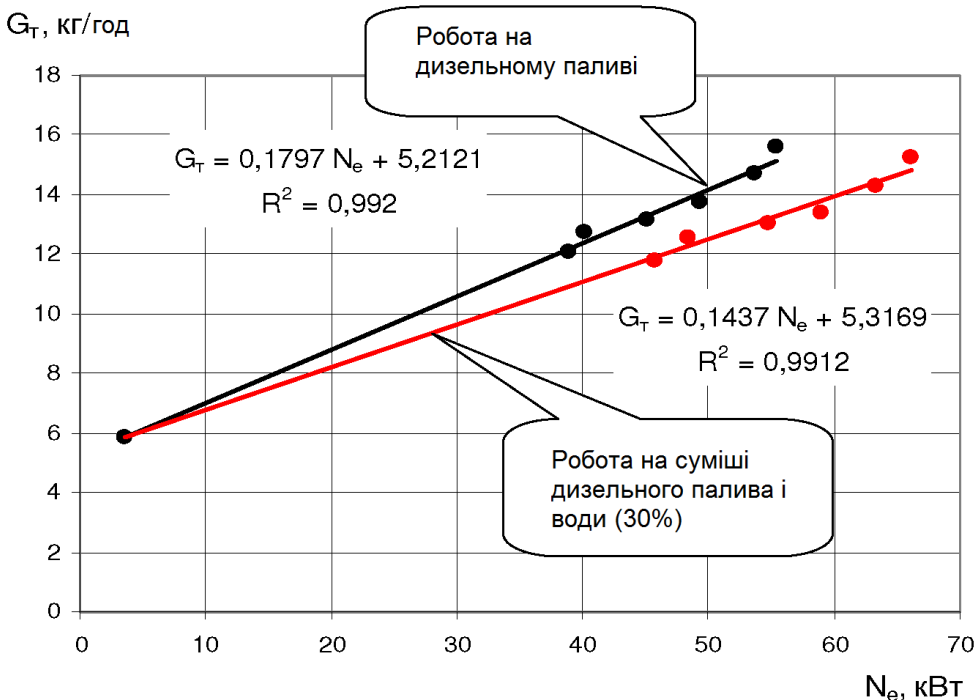


Рисунок 3.5 - Комбінована характеристика двигуна 4Ч 11/12,5 щодо витрат дизельного палива залежно від ефективної потужності

Як основні оціночні екологічні показники були обрані:

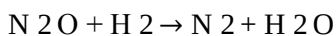
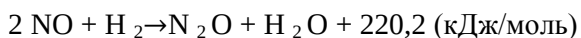
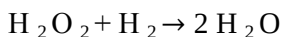
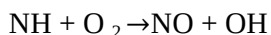
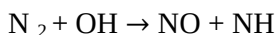
- вміст CO у відпрацьованих газах двигуна, мг/м;
- вміст NO_x у відпрацьованих газах двигуна, мг/м;
- димність газів, що відпрацьовали, %.

Зі списку вище перелічених екологічних показників роботи дизельного -

двигуна найбільшу небезпеку для навколишнього середовища становлять оксиди азоту. Це пояснюється тим, що оксиди азоту добре реагують з водою (зокрема, NO_2) з утворенням суміші азотної HNO_3 та азотистої HNO_2 кислот, які надзвичайно агресивні по відношенню до живих організмів та рослин. Особливо гостро ця небезпека відчувається в сільськогосподарському виробництві, що має справу з живими організмами, якому властива підвищена вологість повітря, наявність вільної (наприклад, краплинної) вологи на рослинах, ґрунті, кормах і т.п.

На думку К.В. Треліною [136]: «Такими якостями оксидів азоту можна пояснити жорсткі вимоги щодо їх допустимого вмісту в повітрі робочої зони ($\text{ГДК}_{\text{рз}} = 5 \text{ мг/м}^3$) порівняно з оксидом вуглецю ($\text{ГДК}_{\text{рз}} = 20 \text{ мг/м}^3$) і вуглеводневими ($\text{ГДК}_{\text{рз}} = 30 \text{ мг/м}^3$)».

Застосування водної інжекції, на думку [1, 10, 17, 24, 66, 67, 74, 107, 108, 136], сприяє зниженню оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного двигуна. Як уже було зазначено раніше (див. 2.3), вода, що присутня в зоні горіння, не тільки є ініціатором каталітичних ланцюгів у реакціях горіння, але й одночасно бере участь у розвитку самих ланцюгів. За висновками Н.П. Самойлова та ін [8]: «Зниження емісії шкідливих речовин обумовлено впливом води, в першу чергу, на хімічні реакції горіння. Процес утворення NO у присутності водяної пари може протікати за наступними реакціями :



З рівнянь видно, що концентрація оксидів азоту збільшується зі зростанням концентрації молекулярного кисню. Вода розбавляє горючу суміш,

зменшуючи тим самим відносну концентрацію кисню, що сприятливо впливає зниження NO у відпрацьованих газах.

Нормативні вимоги ГОСТ Р 41.96-2011 [38] до вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах автотракторних двигунів представлені в таблиці 4.1.

Крім того, на утворення оксидів азоту великий вплив має температура в зоні горіння палива. За даними [136], збільшення концентрації NO зі зростанням температури середовища по експоненційному закону». З урахуванням цього, застосування водної інжекції забезпечить подачу води в зону горіння, що сприятиме зниженню температурного режиму циклу, і, отже, призведе до зменшення утворення оксидів азоту.

Таблиця 4.2 - Нормативні вимоги до вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах автотракторних двигунів

Правила ЄЕС	Рік введення	Вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах			
		Nx	CO	CH	Тверді частки
ECR R 49.00	1982	18,00	14,00	3,50	Не регламентовано
Evro 0	1988	14,40	11,20	2,50	Не регламентовано
Evro 1	1993	8,00	4,50	1,10	0,36
Evro 2	1996	7,00	4,00	1,10	0,15
Evro 3	2000	5,00	2,00	0,60	0,10
Evro 4	2005	3,50	1,80	0,50	0,09
Evro 5	2008	2,00	1,50	0,25	0,02

Результати експериментальних досліджень щодо впливу об'єму подаваної води на температуру відпрацьованих газів дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 на різних режимах роботи представлені на малюнку 4.6.

Аналіз представлених результатів показує, що зі збільшенням об'єму води, що подається температура відпрацьованих газів знижується з середньою інтенсивністю близько 1°С на 1% подачі води в залежності від режиму роботи двигуна. Найбільше зниження температури відпрацьованих газів відзначено на режимі максимального моменту, що крутить (на коректорної гілки швидкісної характеристики). Дослідження щодо визначення вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах експериментального двигуна 4Ч 11/12,5 проводилися при

оптимальній цикловій подачі води (30 % від об'єму дизельного палива) шляхом іжекції в впускний колектор. Результати проведених досліджень представлені на -рисунок 3.7 – 3.9.

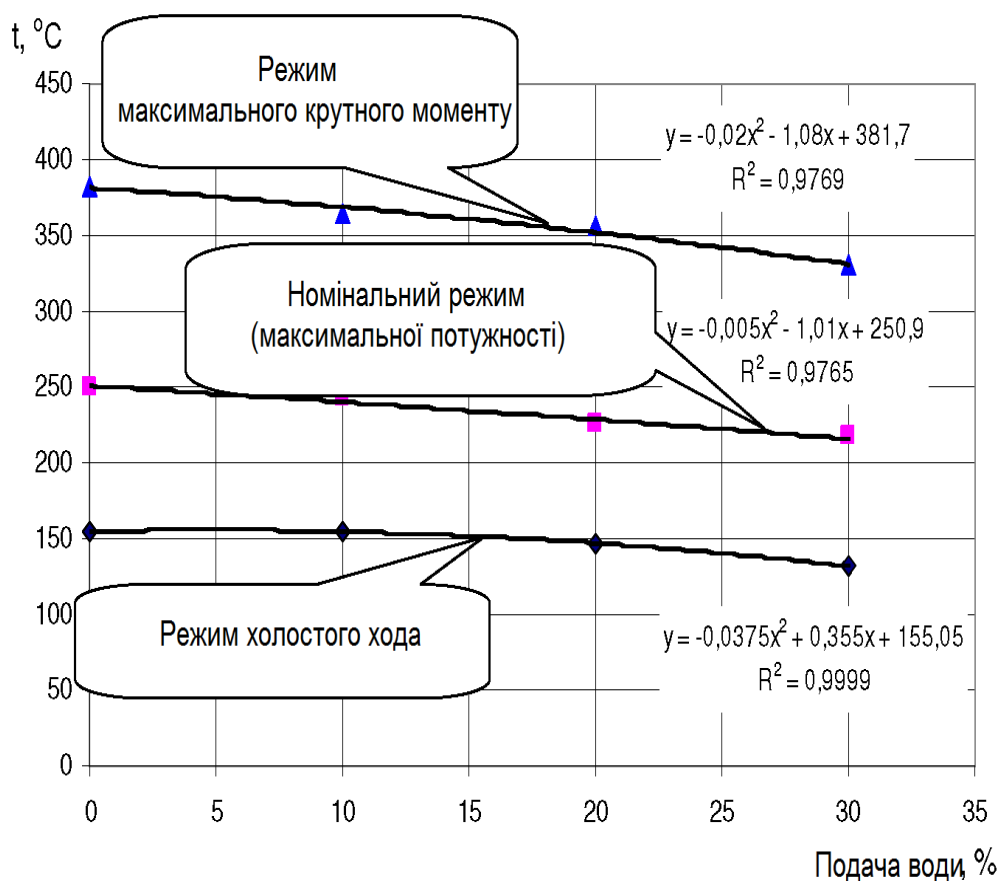


Рисунок 3.6 - Вплив об'єму води, що подається на температуру відпрацьованих газів дизельного двигуна 4Ч 11/12,5

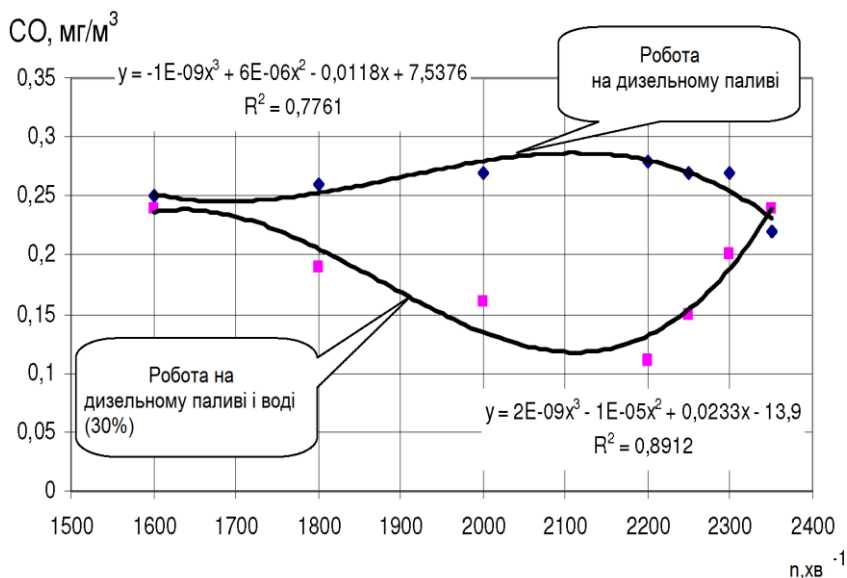


Рисунок 3.7 - Зміна вмісту CO у відпрацьованих газах дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 залежно від частоти обертання колінчастого валу

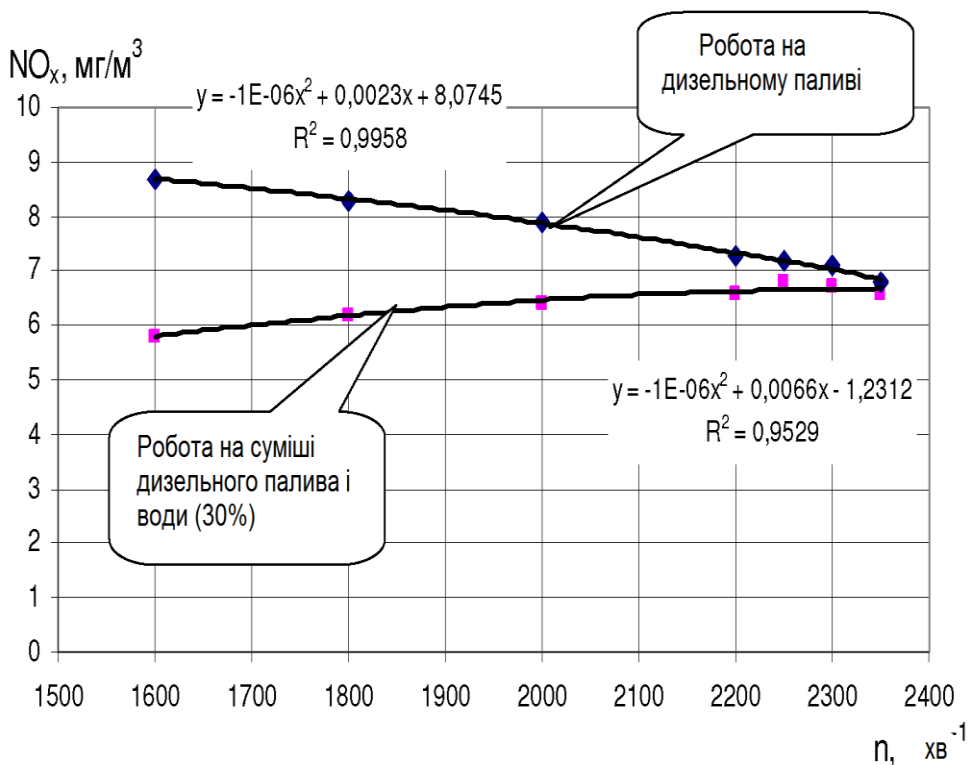


Рисунок 3.8 - Зміна вмісту $N_x y$ 119 відпрацьованих газів дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 залежно від частоти обертання колінчастого валу

Аналіз наведених результатів показує, що застосування водної інжекції у впускний колектор двигуна благотворно позначається на екологічних - показниках його роботи. Практично у всіх випадках відзначається загальне зниження шкідливих викидів, проте воно досить сильно відрізняється по відношенню до різних компонентів цих викидів.

Найбільший ефект від застосування водної інжекції спостерігається по відношенню до оксиду вуглецю (чадний або світильний газ), зниження вмісту якого на номінальному режимі роботи двигуна досягає 0,17 мг/м (зниження на 39,3 %). Задля справедливості слід зазначити, що на режимах холостого ходу і максимального крутного моменту (перевантаження) цей ефект знижується практично до нуля.

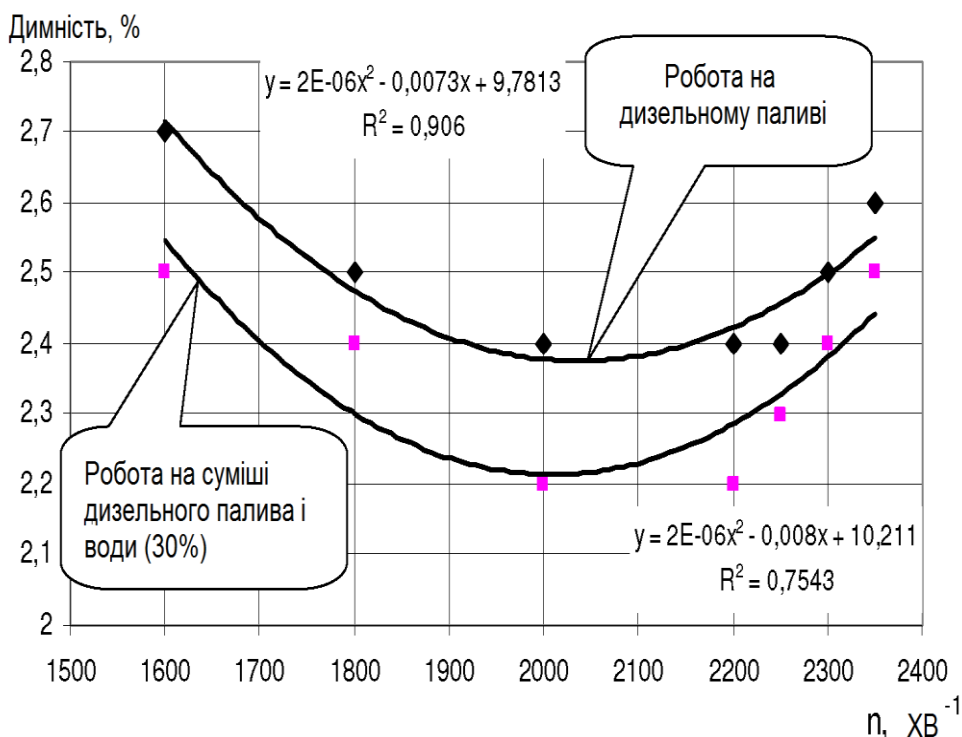


Рисунок 3.9 - Зміна димності відпрацьованих газів дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 залежно від частоти обертання колінчастого валу

Значне зниження спостерігається також щодо оксидів азоту, особливо на коректорної гілки швидкісної характеристики. Тут особливо помітна роль водної інжекції як засобу додаткового охолодження двигуна. Як відомо (див. вище), зниження середньої температури робочого циклу сприяє зниженню викидів оксидів азоту. Зниження викидів оксидів азоту на режимі максимального моменту, що крутить, досягає $2,90 \text{ мг/м}^3$ (зниження на 33,3 %).

Зниження димності відпрацьованих газів експериментального дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 в залежності від частоти обертання колінчастого валу - спостерігається на всіх режимах його роботи. Найбільший ефект спостерігається на номінальному режимі та в режимі невеликих перевантажень (на початку коректорної гілки швидкісної характеристики). Максимальне зниження димності відпрацьованих газів досягає 0,20% (зниження на 8,33%).

Потрібно зазначити, що якщо користуватися розмірністю ГОСТ Р 41.96-2011 [38], згідно з яким вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна вимірюється в розрахунку на одиницю потужності за годину роботи (г/кВт год), то отриманий ефект від використання водної інжекції буде ще більшим, оскільки відбувається збільшення ефективної потужності двигуна, в середньому на 20%, залежно від режиму роботи.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що застосування водної інжекції благотворно впливає на ефективні та екологічні показники роботи дизельного двигуна. Водночас питання «Як це відбувається?» як і раніше, залишається відкритим. З метою відповіді на поставлене питання було проведено індикування досліджуваного двигуна.

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

4.1. Обґрунтування ефективності дослідження по результатам індикування дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції

Індикування експериментального дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 відбувалося в такий спосіб. З'єм сигналу (надлишковий тиск усередині циліндра) здійснювався встановленим в головці першого циліндра п'єзоелектричним датчиком тиску. Посилення сигналу здійснювалося за допомогою самостійно зібраного підсилювача з лінійною характеристикою. Посилений сигнал передавався аналого-цифровому перетворювачу ЛА-50 USB , розробленому ЗАТ «Руднєв-Шиляєв». Запис сигналу здійснювався програмою Viewer , яка входила до комплекту програм ADC Utility для роботи з платами збору даних фірми ЗАТ «Рудне -Шиляєв». Програма призначена для перегляду, обробки та запису у різних файлових форматах сигналів, записаних числами різної розрядності (8, 16, 32 біти) і, що дуже важливо, дозволяє працювати в багатоканальному режимі.

Прикладна комп'ютерна програма Viewer була використана як для перегляду та обробки сигналу, так і як конвертер сигналів з одних файлових форматів до інших.

На малюнку 4.1 представлений фрагмент обробки запису процесу індикування експериментального двигуна 4Ч 11/12,5 за допомогою прикладної комп'ютерної програми Viewer .

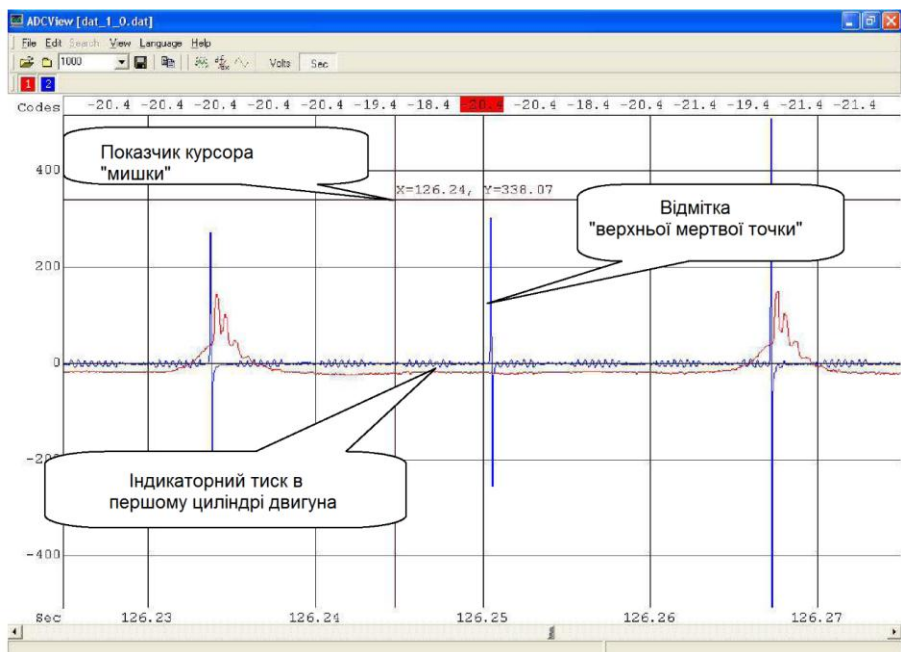


Рисунок 4.1 - Фрагмент запису робочого процесу в першому циліндрі при індикуванні двигуна 4Ч 11/12,5

В результаті обробки даних індикування двигуна 4Ч 11/12,5 було встановлено, що при використанні водної інжекції (30% від циклової подачі дизельного палива) у впускний колектор відзначено стійке підвищення індикаторного тиску, в середньому, на 18.22%. На малюнку 4.2 представлені дані, отримані методом накладання ідентичних робочих процесів на - швидкісному режимі, що встановився.

Подальший аналіз результатів індикування також показує, що, судячи з характеру збільшення індикаторного тиску, зменшується час затримки самозаймання дизельного палива, що має призводити до збільшення жорсткості роботи дизельного двигуна. Однак, у процесі проведення експериментальних - досліджень збільшення «жорсткості» роботи досвідченого дизельного двигуна не відзначено. Дана обставина може бути пояснена тим, що швидкість наростання і зниження індикаторного тиску при використанні водної інжекції менше (в середньому, на 5.15%), ніж при роботі на дизельному паливі, тому

робочий процес в циліндрі двигуна протікає більш плавно.

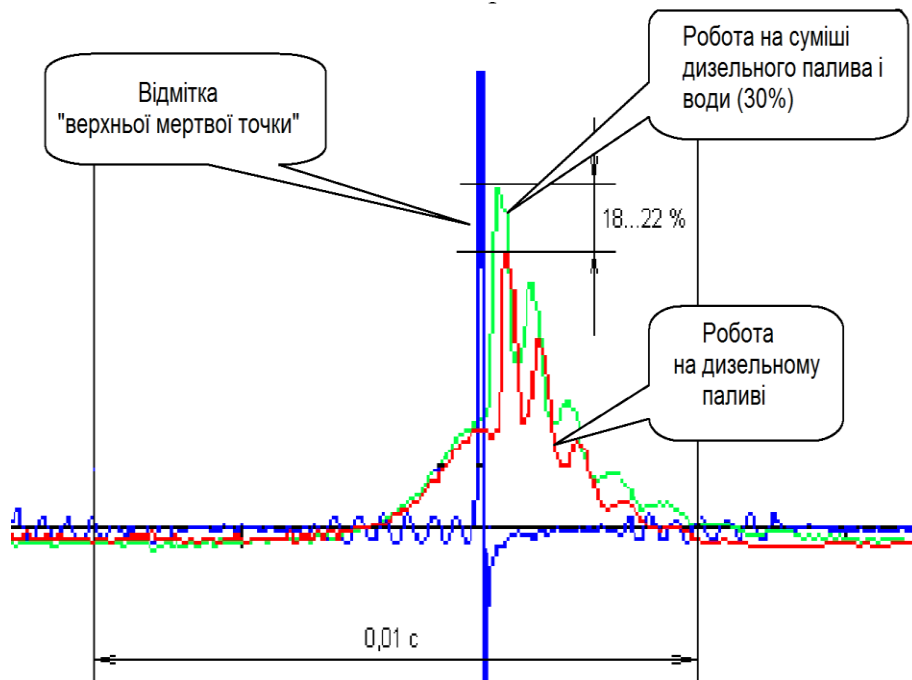


Рисунок 4.2 - Порівняння ідентичних робочих процесів на швидкісному режимі, що встановився, методом накладання

Зменшення часу затримки самозаймання дизельного палива (принаймні, моменту початку збільшення індикаторного тиску) може бути пояснено двома гіпотезами: або швидкість пароутворення перевищує швидкість горіння, або присутність води в зоні горіння сприяє поліпшенню горіння дизельного палива, або те й інше відбувається одночасно. Як та, так і інша висунуті гіпотези не суперечать результатам теоретичних та досліджень, проведених у теоретичній частині цієї роботи.

Використовуючи отримані результати експериментальних та теоретичних досліджень, зробимо математичне моделювання ефективних показників дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 при використанні водної інжекції.

На малюнку 4.3 представлено індикаторну діаграму дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 на режимі номінальної потужності, яка була отримана шляхом -

математичного моделювання за допомогою пакету прикладних програм Мікро - soft Excel з огляду на попередні дослідження.

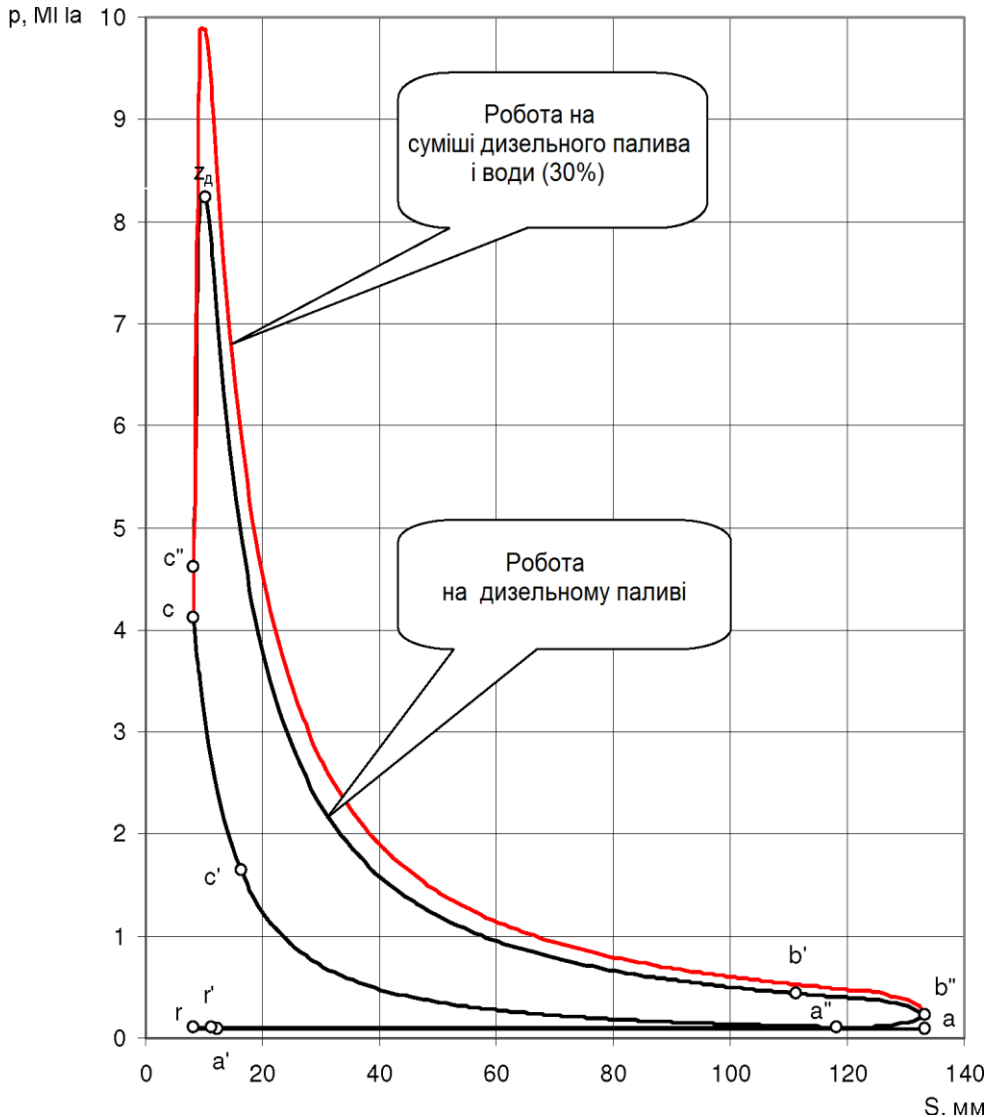


Рисунок 4.3 – Індикаторна діаграма дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 на режимі номінальної потужності

Зміна індикаторного тиску неминує призведе до зміни ефективних показників роботи двигуна (крутного моменту та потужності). У зв'язку з цим, як основний показник роботи двигуна будемо розглядати крутний момент

досліджуваного двигуна. Вибір даного показника пояснюється тим, що значення крутного моменту, у сукупності зі швидкісним режимом роботи двигуна, є вихідним для визначення його потужних показників. На малюнках 4.4 і 4.5 представлено зміну індикаторного крутного моменту по куту повороту колінчастого валу досліджуваного двигуна.

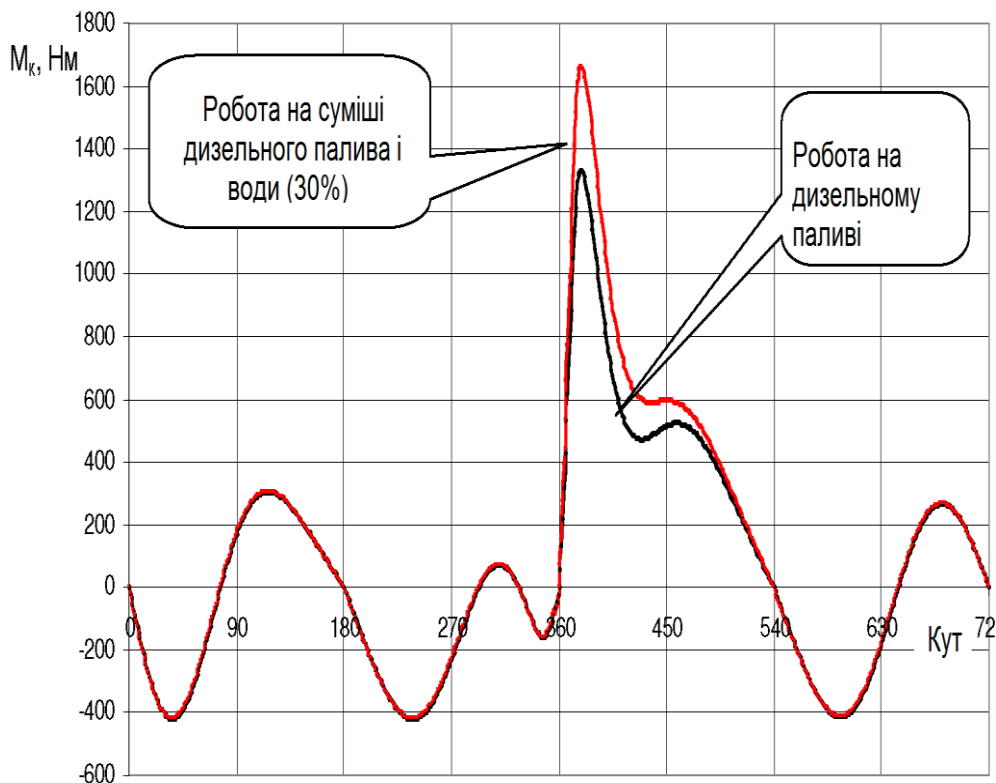


Рисунок 4.4 - Діаграма зміни індикаторного моменту, що крутить, в одному циліндрі дизельного двигуна 4Ч 11/12,5

Аналіз представлених результатів досліджень показує, що відбулося зростання індикаторного тиску.

Це свідчить про те, що обсяг досконалої роботи газів також збільшився, що є досить суттєвим результатом використання теплотворної здатності палива. Потрібно також відзначити, що зростання індикаторного тиску відбулося в тій частині індикаторної діаграми, де тиск газів найбільш ефективно

трансформується в індикаторний крутний момент двигуна (пояснюється особливостями кінематики кривошипно-шатунного механізму).

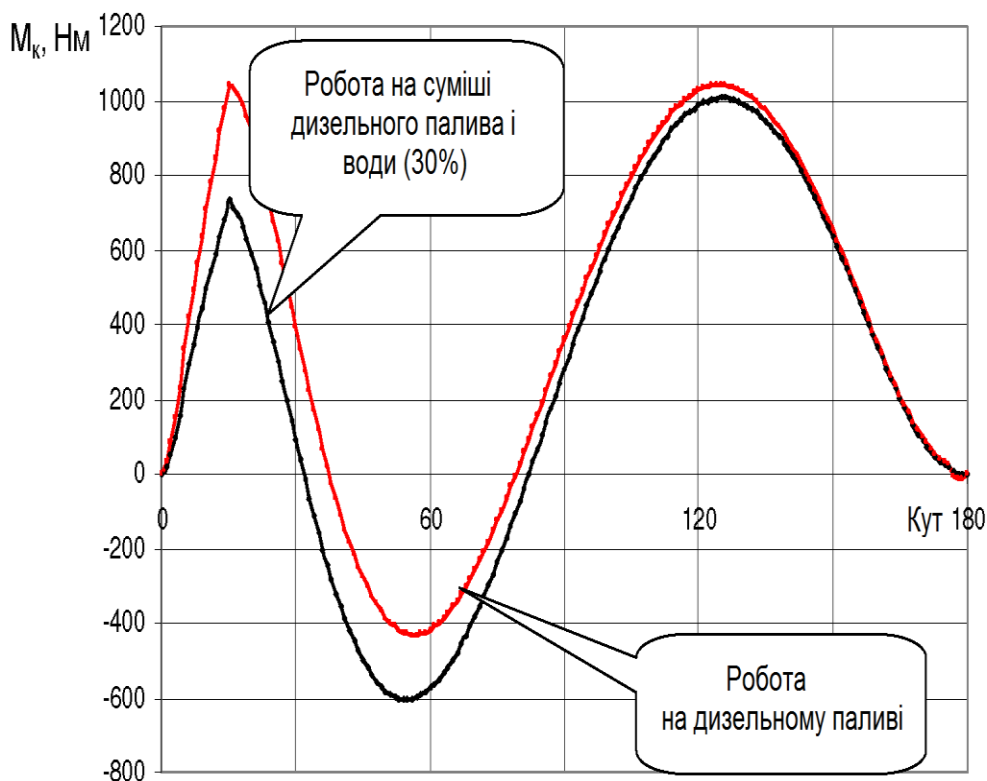


Рисунок 4.5 - Діаграма зміни сумарного індикаторного крутного моменту дизельного двигуна 4Ч 11/12,5

Даний ефект наочно демонструється діаграмою зміни індикаторного моменту, що крутить, в одному циліндрі досліджуваного двигуна (рисунок 4.13).

Для побудови кривої сумарного крутного моменту M_k чотирициліндрового дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 проведено підсумовування кривих крутних моментів кожного циліндра, зрушуючи одну криву щодо іншої на кут повороту кривошипа з кутовим інтервалом 180° ($720/4$, де 4 - число циліндрів двигуна). Даний прийом можливий, оскільки величини і характер зміни крутних моментів по куту повороту колінчастого валу всіх циліндрів двигуна

однакові і відрізняються лише кутовими інтервалами, тому для підрахунку сумарного моменту, що крутить, двигуна достатньо мати криву крутного моменту одного циліндра. Аналіз діаграми зміни сумарного індикаторного крутного моменту дизельного двигуна 4Ч 11/12,5 (рисунок 4.14) показує, що відбулося збільшення середнього сумарного індикаторного крутного моменту досліджуваного двигуна, причому основне збільшення крутного моменту відбулося в першій частині діаграми повороту колінчастого валу). Ця обставина ще раз свідчить про підвищення ефективності використання теплотворної здатності дизельного палива.

Результати експериментальних досліджень показують, що найбільший ефект від застосування водної інжекції у впускний колектор проявляється на режимі номінальної потужності і при роботі двигуна на коректорній галузі зовнішньої швидкісної характеристики.

ВИСНОВКИ

1. Результати індикування показали стійке підвищення індикаторного тиску в середньому на 18-22 %. Виявлено «пом'якшення» роботи досліджуваного двигуна, яке пояснюється зменшенням швидкості наростання та зниження індикаторного тиску (в середньому на 5.15 %), порівняно з роботою на дизельному паливі.

2. Експериментально встановлено, що найбільший приріст ефективної потужності дизельного двигуна 4 Ч 11/12,5 спостерігається при подачі води в обсязі, що дорівнює 27-32 % від обсягу циклової подачі дизельного палива.

3. При використанні водної інжекції відносна економія дизельного палива досягає 36 г/кВт-год ефективної потужності. Крім того, встановлено, що зі збільшенням об'єму води, що подається, температура відпрацьованих газів знижується, із середньою інтенсивністю близько 1 °С на 1 % подачі води, в залежності від режиму роботи двигуна. Найбільше зниження температури газів, що відпрацьовали, відзначено на режимі максимального крутного моменту.

4. При застосуванні водної інжекції на номінальному режимі роботи двигуна спостерігається зниження викидів оксиду вуглецю на 0,17 мг/м (зниження на 39,30 %). Зменшення викидів оксидів азоту на режимі максимального моменту, що крутить, на 2,90 мг/м (зниження на 33,30 %). Максимальне зниження димності газів, що відпрацьовали, на 0,20 % (зниження на 8,33 %).

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия. - Харьков: Изд-во Харьковского политехнического института, 2003. - 244 с.
2. Andrews G.E., Bartle K.D., Pang S.W. et al. The Reduction in Diesel Particulate Emissions, Using Emulsified Fuels // SAE Technical Paper Series. - 1988. - № 880348. - P. 1-9.
3. De Vita A. Multi-Cylinder D.I. Diesel Engine Tests with Unstabilized Emulsion of Water and Ethanol in Diesel Fuel // SAE Technical Paper Series. - 1989. - № 890840. - P. 1-15.
4. Strey R., Simon C. Russ- und NO_x- Reduktion dank Dieselmotoren-Wasser-Mikroemulsion // MTZ. - 2015. - Jg. 66. - № 6. - S. 485.
5. Klopfer M., Lang H.-P., Weiser T. Wasserabscheidkonzept für druckseitige Dieselmotoren-Filtersysteme // MTZ. - 2005. - Jg. 66. - № 6. - S. 460-464.
6. Okada H., Furuya T., Chol C. et al. Application of Emulsified Heavy Fuel to Marine Diesel Engines // Bulletin of Marine Engineering Society in Japan. - 2022. - Vol. 20. - № 1. - P. 1-9.
7. Birkenhagen S., Rulfs H. Untersuchungen zur direkten Reduktionsmittel- und Wassereinspritzung bei mittelschnellaufenden Dieselmotoren // MTZ. - 2001. - Jg. 62. - № 11. - S. 946-954.
8. Heinrich G., Prescher K., Finsterwalder G. Wasser- und Methanolzusätze bei Dieselmotoren-Verbrennung // MTZ. - 1984. - Jg. 45. - № 5. - S. 183-188.
9. Rainer P., Simon C. Einfluss der geschichteten Wassereinspritzung auf das Abgas- und Verbrauchsverhalten eines Dieselmotors mit Direkteinspritzung // MTZ. - 2004. - Jg. 65. - № 1. - S. 49-55.
10. Maxson T., Logan B., O'Brien S. Performance in Diesel and Biodiesels of Fluorosilicone Rubber Materials used for Automotive Quick Connector Fuel Line O-Rings and Other Sealing Applications // SAE Technical Paper Series. - 2001. - №

2001-01-1124. - P. 1-9.

11. Takasaki K., Fukuyoshi T., Otsubo M. et al. Improvement of Diesel Combustion using a Fuel-Water-Fuel Injection System // International Journal Japan Society of Mechanical Engineers. Part B. -1998. - Vol. 41. - № 4. - P. 975-982.

12. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. - Харьков: Вища школа, 2020. - 169 с.

13. Kuleshov A.S. Model for Predicting Air-Fuel Mixing, Combustion and Emissions in DI Diesel Engines over Whole Operating Range // SAE Technical Paper Series. - 2005. - № 2005-01-2119. - P. 1-10.

14. ГОСТ 14846-81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний.

15. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

16. Звонов, В.А. Применение метода математического планирования эксперимента для оценки токсичности двигателя [Текст] / В. А. Звонов, В.В. Фурса // Сб. «Двигатели внутреннего сгорания». - Харьков: ХГУ, 1973. Вып. 17. - С. 99 - 105.

17. Сахно В.П. Автомобілі: Тягово-швидкісні властивості та паливна економічність: навч. посібн. / В.П. Сахно, Г.Б. Безбородова, М.М. Маяк, С.М. Шарай. – К: В-во КВІЦ, 2004. – 174 с.

18. Врублевский А.Н. Выбор схемы и оптимизация параметров аккумулирующей топливной аппаратуры свободно поршневого двигателя / А.Л. Григорьев, А.Н. Врублевский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 12. – С. 127–132.

19. Viktor Anisimov, Vadym Ryaboshapka. Modeling of machine-tractor units workflow on the use of biofuels // Materials international scientific conference [«Conserving soils and water»]. Burgas, Bulgaria. 2016. PP. 74 – 75

20. Холод І.М. Удосконалення системи живлення газодизельного двигуна/ І. М. Холод, А. П. Холод, П. П. Степанов// Праці Таврійської державної агротехнічної академії; Таврійська державна агротехнічна академія; Таврійська державна агротехнічна академія. - Мелітополь 2006. – Вип. 37. – с. 146 – 156.

21. Мітков Б. В. Альтернативні палива транспортних засобів/Б. В. Мітков, В. Б. Мітков//Праці Таврійського агротехнологічного університету 2011, Вип 11,Т. 3.
22. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей. Том 3. Практические основы диагностирования. Харьков: Майдан, 2014. 443 с.
23. Маркович С. І. Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. / С. І. Маркович, О. В. Бевз ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2022. - 334 с.
24. Ouyang G. Common Rail Fuel Injection Technology in Diesel Engines. Wiley, 2019. 367 p
25. Lakshminarayanan P.A., Nayak N.S. Critical Component Wear in Heavy Duty Engine. Willey, 2011. 352 p.
26. Rahnejat H. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends. Woodhead Publishing, 2010. XXX, 1018 p.
27. Сандомирський М.Г. Трактори та автомобілі. Ч.1. Автотракторні двигуни // Навчальний посібник / М.Г. Сандомирський, М.Ф. Бойко, А.Т. Лебедєв– К.: Вища школа, 2000. – 357с.
28. Сахно В. П. Експлуатаційні властивості автомобілів / В. П. Сахно. – К.: Видавництво “КВІЦ”, 2006. – 174 с.
29. Форнальчик С.Ю., Олісевич М.С., Мاستикаш ОЛ., Пельо Р.А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: Навчальний посібник. – Львів: Афіша, 2004.-492 с.
30. Канарчук В.Є., Лудченко О.А., Чигиринець А.Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів: Підручник. – К.: Вища шк., 1994. – (У 3-х кн.): Кн. 1: Теоретичні основи: Технологія. – 342 с; Кн. 2: Організація, планування і управління. – 383 с; Кн. 3: Ремонт автотransпортних засобів. – 599 с.
31. Marusin V.B. Development of a mathematical model for the design and calculation of the indicators of a diesel engine fuel system / I.K. Danilov, A.V. Marusin, I.M. Popova, A.V. Marusin// Proceedings of the XII International Academic Congress “Science, Education and Technology in the Modern World” (United States,

Cambridge, Massachusetts, 18 - 20 April 2015). Volume III. "Harvard University Press", 2015. - p.95-101. ISBN: 978-0-865-83925-7

32. Маркович В.С. Стабілізація показників роботи дизеля в процесі експлуатації шляхом визначення раціональних значень регулювань паливної апаратури / В.С. Маркович, О.В. Бевз. // Збірник тез доповідей здобувачів вищої освіти LVII науково-технічної конференції, LIV науково-технічної конференції викладачів, аспірантів та співробітників «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2023» 20 квітня 2023 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 238 с.

33. Andrzej Kowaliwicz, Zbigniew Pajaczek, «Dual fuel engine fuelled with ethanol and diesel fuel,» Journal of KONES International Combustion Engines, т. 10, № 1-2, 2003.

34. R. Parthasarathi, S. Gowri and C.G. Saravanan, «Effects of ethanol- diesel emulsions on the performance, combustion and emission characteristics if DI diesel engine,» American Journal of Applied Sciences, т. 11, pp. 592-600, 2014