

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА,
ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА
РЕМОНТ МАШИН»



КВАЛІФІКАЦІЙНА ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення екологічної безпеки ДВЗ транспортних засобів під час експлуатації у ТОВ «РОС АГРО» с. Вишняківка Кіровоградського району Кіровоградської області»

Виконав:

магістрант групи ТС23М-2 _____ Валерій ТАРАСЕНКО
(шифр групи) (підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник:

К.Т.Н, доцент _____ Олег БЕВЗ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

К.Т.Н, 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: 20 «Аграрні науки та продовольство»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітньо-професійна програма: «Технічний сервіс сільськогосподарської техніки»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ
«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Тарасенка Валерія Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Підвищення екологічної безпеки ДВЗ транспортних засобів під час експлуатації у ТОВ «РОС АГРО» с. Вишняківка Кіровоградського району Кіровоградської області»

керівник роботи Бевз Олег Вікторович, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь) (вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від «27» вересня 2024 року № 64-13

2. Строк подання здобувачем роботи « 10 » грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: 1. Матеріали дослідницької практики. 2. Екологія та автомобільний транспорт. 3. Підвищення рівня екологічної безпеки транспортними засобами.

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

Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень. Характеристика виробничої структури ТОВ «Рос Агро» м. Кропивницький. Проблема екологічної безпеки сільськогосподарського підприємства. Вплив транспортних засобів на забруднення навколишнього середовища. Актуальність теми та задачі дослідження.

Розділ 2. Аналіз факторів екологічного забруднення навколишнього середовища при експлуатації ДВЗ транспортних засобів. Дослідження впливу технічного стану дизельного ДВЗ на димність відпрацьованих газів. Утворення токсичних речовин при горінні палива. Розрахунок складу продуктів згоряння при використанні в ДВЗ багатокomпонентного палива.

Розділ 3. Системи нейтралізації відпрацьованих газів ДВЗ при використанні багатокomпонентного палива. Модель каталітичного нейтралізатора. Вибір основних параметрів активної зони нейтралізаторів.

Розділ 4. Експериментальні дослідження застосування багатокomпонентного палива на дизельних двигунах. Експериментальний випробувальний стенд. Порівняльні дослідження параметрів робочого процесу та аналіз індикаторного ККД при використанні багатокomпонентних палив. Дослідження екологічних показників ДВЗ при роботі на багатокomпонентних паливах.

5. Перелік ілюстративного матеріалу.

1. Актуальність теми та задачі дослідження.
2. Наслідки експлуатації транспортних засобів.
3. Утворення токсичних речовин при горінні палива.
4. Модель каталітичного нейтралізатора.
5. Схема експериментального випробувального стенда.
6. Порівняльні дослідження параметрів робочого процесу ДВЗ.
7. Дослідження екологічних показників ДВЗ.

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування напрямку наукових досліджень	01.11.2024	
2	Аналіз факторів екологічного забруднення навколишнього середовища при експлуатації ДВЗ транспортних засобів	12.11.2024	
3	Системи нейтралізації відпрацьованих газів ДВЗ при використанні багатокomпонентного палива	24.11.2024	
4	Експериментальні дослідження застосування багатокomпонентного палива на дизельних двигунах	06.12.2024	
5	Графічний матеріал	10.12.2024	

Магістрант _____ Тарасенко В.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Бевз О.В.
(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Метою даної роботи є розробка методології підвищення показників екологічної безпеки ДВЗ транспортних засобів та впровадження в експлуатацію комплексу нових технічних рішень щодо використання багатокomпонентного палива на основі спиртових добавок та зниження хімічного та фізичного забруднення навколишнього середовища транспортними засобами. Теоретичні дослідження виконані з використанням положень та методик розрахунку складу дизельного палива.

В першому розділі проведений аналіз ефективності виробничої діяльності ТОВ «Рос Агро» та обґрунтовано тему кваліфікаційної дипломної роботи її актуальність та задачі дослідження.

В другому розділі проведений аналіз факторів екологічного забруднення навколишнього середовища при експлуатації ДВЗ транспортних засобів. Проведений розрахунок складу продуктів згоряння при використанні в ДВЗ багатокomпонентного палива.

Третій розділ містить опис системи нейтралізації відпрацьованих газів ДВЗ при використанні багатокomпонентного палива. Описана модель каталітичного нейтралізатора.

В четвертому розділі проведені експериментальні дослідження застосування багатокomпонентного палива на дизельних двигунах. Описані порівняльні дослідження параметрів робочого процесу та аналіз індикаторного ККД при використанні багатокomпонентних палив та їх вплив на екологічні показники.

Кваліфікаційна дипломна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і переліку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 80 сторінок. Робота включає в себе 17 рисунків, 7 таблиць, 27 використаних літературних джерел.

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.	
1.1. Характеристика виробничої структури ТОВ «Рос Агро» м. Кропивницький	6
1.2. Проблема екологічної безпеки сільськогосподарського підприємства.....	7
1.3. Вплив транспортних засобів на забруднення навколишнього середовища.....	11
1.4. Актуальність теми та задачі дослідження.....	13
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ЕКОЛОГІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДВЗ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.	
2.1. Дослідження впливу технічного стану дизельного ДВЗ на димність відпрацьованих газів.....	17
2.2. Утворення токсичних речовин при горінні палива	20
2.3. Розрахунок складу продуктів згоряння при використанні в ДВЗ багатокomпонентного палива.....	27
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВЗ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО ПАЛИВА.	
3.1. Модель каталітичного нейтралізатора	41
3.2. Вибір основних параметрів активної зони нейтралізаторів.....	53
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО ПАЛИВА НА ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ.	
4.1. Експериментальний випробувальний стенд	57
4.2. Порівняльні дослідження параметрів робочого процесу та аналіз індикаторного ККД при використанні багатокomпонентних палив.....	60
4.3. Дослідження екологічних показників ДВЗ при роботі на багатокomпонентних паливах	68
ВИСНОВКИ	76
Список використаної літератури.....	78

ВСТУП

Під час проведення механізованих технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві сільськогосподарські агрегати є одними з головних об'єктів негативного впливу на навколишнє середовище. Останнє проявляється у забрудненні навколишнього середовища шкідливими продуктами згоряння дизельного палива в двигунах енергетичних засобів, механічним руйнуванням ґрунту внаслідок надмірного тиску рушіїв на ґрунт та їх буксування тощо, акустичним впливом на навколишнє середовище, вібрацією, яку створюють окремі агрегати сільськогосподарського виробництва агропромислового комплексу. Тому проблема охорони навколишнього середовища така ж важлива, як забезпечення людства продуктами харчування чи енергією. Вона набуває гострого глобального характеру, привертаючи увагу світової громадськості, державних органів, міжнародних організацій

В останні десятиліття ведеться активна робота у напрямку зниження токсичності відпрацьованих газів (ВГ) транспортних засобів з метою зниження забруднення навколишнього середовища. У зв'язку з цим проводяться дослідження, присвячені вивченню механізму впливу транспортних засобів на навколишнє середовище.

Тому метою більшості досліджень є вивчення та розробка ефективних технологічних процесів та конструкцій транспортних засобів, що забезпечують підвищення екологічних показників, при цьому як основну характеристику досліджень використовуються величини викидів, витрати енергії та матеріалів.

Дослідження, спрямовані на зниження токсичності та підвищення експлуатаційної економічності транспортних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), важливі для вирішення проблеми захисту навколишнього середовища від забруднення. Розробка нових надійних систем нейтралізації шкідливих складових ВГ, а також підвищення повноти згоряння палива в двигунах, особливо на режимах, що не встановилися, залишаються найбільш пріоритетними напрямками досліджень.

РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

1.1. Характеристика виробничої структури ТОВ «Рос Агро» м. Кропивницький.

В сьогоднішніх умовах товариство з обмеженою відповідальністю «Рос Агро» с. Вишняківка, Кропивницького району Кіровоградської області відіграє важливу роль, як з позиції створення нових конкурентноспроможних робочих місць та формування трудового потенціалу для розвитку підприємства.

Головний офіс знаходиться за адресою село Вишняківка, вул.. Молодіжна, 30б, Кропивницького району Кіровоградської області, а земельний фонд розташований в селі Вишняківка і Назарівка, що знаходиться в північно-західному напрямку на відстані 25 км від обласного центру, міста Кропивницький. Місцевість степова, пересічена балкою, яка тягнеться вздовж села і переділяє його на дві половини. У цій балці тече річка Чабанка, яка є правою притокою річки Сугоклеї. Дорожні шляхи які об'єднують господарство з обласним центром має тверде покриття. Продукція яка реалізується підприємством надходить не тільки до обласного центру та на теренах України, а й експортується закордон.

ТОВ «Рос Агро» (виконавчий директор Тарасенко Микола Миколайович) є базовим сільськогосподарським підприємством в селі і спеціалізується на вирощуванні зернових культур, бобових культур, насіння олійних культур, насіння багаторічних і однорічних трав, овочів і баштанних культур і є одним з лідерів району в цій галузі. Для зберігання зерна збудовано зерносховище об'ємом 20 тисяч тонн.

Частина врожаю йде на тваринницький напрям – господарство має власний свинокомплекс на 200 свиноматок, а загальне поголів'я становить понад 2,5 тис. свиней.

У господарстві працює 194 працівника, з них 48 механізаторів.

1.2. Проблема екологічної безпеки сільськогосподарського підприємства.

Під час проходження дослідницької практики у ТОВ «Рос Агро» мною було проаналізовано об'єкти сільськогосподарського виробництва які чинять негативний вплив на основні компоненти навколишнього середовища: ґрунт, воду і повітря. Проводячи аналіз причин забруднення навколишнього середовища було визначено, що найбільші викиди шкідливих речовин саме від пересувних джерел та стаціонарних об'єктів господарства, у тому числі тваринницької ферми та ремонтно-обслуговуючої майстерні загального призначення.

Таким чином господарство в екологічному відношенні обумовлює прояв деяких процесів, що виражаються у забрудненні ґрунтових та поверхневих вод, а також ерозії ґрунтів. Такими об'єктами в господарстві є тваринницька ферма, сільськогосподарські угіддя, технології вирощування сільськогосподарських культур, технічні засоби при виробництві та переробці продукції, транспорт, склади, майданчики для ремонту і зберігання техніки.

У сільськогосподарському виробництві все ширше застосовуються інтенсивні технології, які включають в себе багаторазові проходи по полю потужних і важких машинно-тракторних агрегатів (МТА), збиральних комбайнів, вантажних технологічних і транспортних мобільних засобів. Все це призводить до розбалансування природного навколишнього середовища.

При цьому негативний вплив МТА відбувається за такими напрямками: викиди ВГ двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) ущільнення ґрунту та руйнування її структури в результаті впливу ходових систем мобільних енергетичних засобів та ґрунтообробних робочих органів [1].

Частка викидів ВГ від одних тільки тракторів перевищує 60 % від загального обсягу викидів в атмосферу забруднюючих речовин і понад 75 % від усіх мобільних енергетичних засобів. За останні 10-15 років потужність тракторів збільшилась в 1,5-3 рази, а їх маса – 2-3 рази, при одночасному збільшенні маси сільськогосподарської техніки в 1,5 рази [2].

Одним з найбільших факторів забруднення навколишнього середовища є транспортні засоби (ТЗ) [3, 4] рис. 1.1.

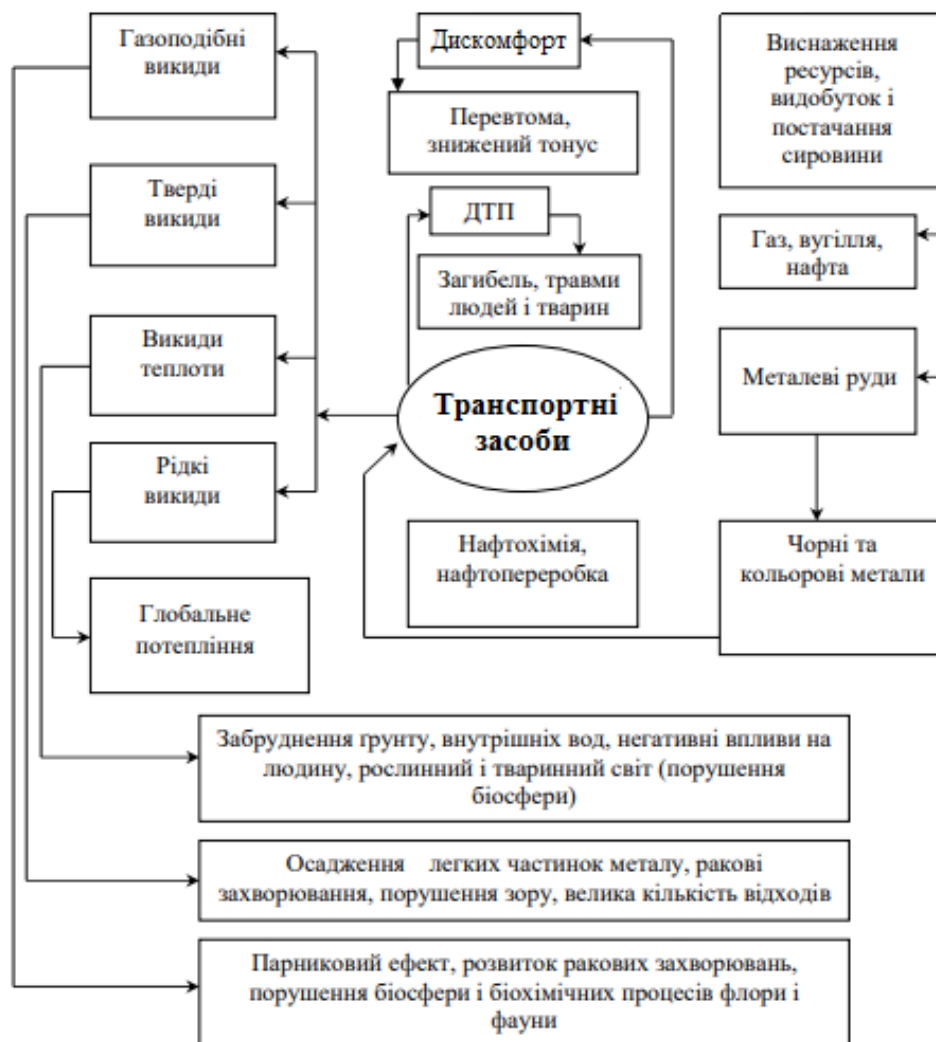


Рис 1.1 – Наслідки експлуатації транспортних засобів.

Всі ці фактори вимагають комплексного розгляду з подальшим вирішенням даної проблеми. Однак це практично неможливо виконати без запровадження нових норм і стандартів. Суть даного питання повинна полягати в комплексному вивченні і оцінці впливу МТА на навколишнє природне середовище й розробці екологічних критеріїв, що дозволяють управляти екологічною безпекою при роботі МТА.

При виконанні механізованих технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві МТА є одними з головних об'єктів негативного впливу на навколишнє середовище [5] рисунок 1.2.



Рисунок 1.2 – Негативний вплив роботи машинно-тракторних агрегатів на стан екосистеми.

1.3. Вплив транспортних засобів на забруднення навколишнього середовища.

Щорічно в атмосферу нашої планети транспортними засобами із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) викидають близько 400 мільйонів тон оксиду вуглецю (CO), 70 мільйонів тон вуглеводнів (C_nH_m), 35 мільйонів тон оксидів азоту (NO_x). Подальше зростання урбанізації та величезне збільшення парку транспортних засобів із ДВЗ породжує небезпеку значного забруднення навколишнього середовища [1].

В останні десятиліття ведеться активна робота у напрямку зниження токсичності ВГ транспортних засобів з метою зниження забруднення навколишнього середовища. У зв'язку з цим проводяться дослідження, присвячені вивченню механізму впливу транспортних засобів на навколишнє середовище в процесі реалізації їх «життєвого циклу». Для цього розглядаються енергетичні витрати, обсяги викидів шкідливих речовин, споживання природних ресурсів, пов'язаних із видобутком сировини, виготовленням транспортних засобів, їх експлуатацією, ремонтом, обслуговуванням та іншими факторами екологічного забруднення.

Дослідження, спрямовані на зниження токсичності та підвищення експлуатаційної економічності транспортних ДВЗ, важливі для вирішення проблеми захисту навколишнього середовища від забруднення. Розробка нових надійних систем нейтралізації шкідливих складових ВГ, а також підвищення повноти згоряння палива в двигунах, особливо на режимах, що не встановилися, залишаються найбільш пріоритетними напрямками досліджень.

Зниження токсичності та підвищення економічності двигунів транспортних засобів досягаються також поліпшенням якості регулювання складу паливно-повітряної суміші, насамперед на невстановлених режимах, що характеризуються підвищеними питомими витратами палива та викидами шкідливих речовин з ВГ. Ефективним методом на робочий процес двигуна з метою зниження токсичності ВГ є вдосконалення системи паливоподачі та її

управління відповідно до режиму роботи двигуна, для чого застосовуються системи управління паливоподачі.

Відомо, що одним з основних методів знешкодження ВГ ДВЗ транспортних засобів є їхня каталітична нейтралізація, що здійснюється шляхом пропускання ВГ через каталітичний нейтралізатор (КН). В даний час в більшій частині застосовуються окислювально-відновні КН, що забезпечують нейтралізацію одночасно за трьома компонентами - CO , C_nH_m , NO_x [5].

Незважаючи на тривалий період розвитку поршневих ДВЗ, їхній коефіцієнт корисної дії (ККД) досить низький. Однією з причин є значні втрати з ОГ теплоти, що утворилися в циліндрах двигунів у результаті термохімічних реакцій окислення палива. До теперішнього часу найбільша увага в процесі вдосконалення ДВС приділялася досягненню максимальної потужності, малої маси та розмірів двигуна, мінімальних виробничих витрат. Тепер першому плані як найважливіший критерій оцінки двигуна виступає мінімізація споживання їм палива. Зниження споживання палива досягти непросто, і, крім того, воно може несприятливо впливати на інші параметри двигуна.

Перспективи розвитку поршневих ДВС традиційних схем визначають, що резерви їх подальшого вдосконалення за багатьма напрямками вичерпуються, зокрема й у тому, як підвищення паливної економічності з допомогою вдосконалення процесів сумішоутворення, горіння, газообміну тощо. тому дуже перспективним стає напрямок використання теплоти ВГ з метою отримання з неї додаткової роботи, що зрештою призведе до підвищення паливної економічності та ефективного ККД. Завдання отримання роботи з теплоти ВГ може бути вирішено за допомогою низки утилізаційних систем, серед яких на техніці автомобільної найбільш перспективні паросилові установки, термоелектрогенератори [5, 6].

Кожне з таких питань, як зниження токсичності ВГ, зменшення рівня шуму та регенерація теплоти ВГ, з якої викидається в атмосферу до 40 % енергії палива, що спалюється, є самостійною складною і дуже актуальною науково-технічною проблемою, безпосередньо пов'язаною з техніко-екологічними

показниками автомобіля і що вимагає для свого вирішення спеціальних, ув'язаних між собою підходів.

На сучасному етапі розвитку автотранспортної галузі практично відсутні методики розрахунку екологічних показників автомобіля, що враховують конструктивні, регульовальні, експлуатаційні та інші параметри. У багатьох наявних дослідженнях розглядається покращення одного екологічного параметра або показника, наприклад, зниження концентрації оксиду вуглецю в ВГ або оксидів азоту. При цьому не враховується те, що їх вміст в ВГ взаємопов'язаний, домагаючись зниження одного компонента, збільшують другий і навпаки [7, 8].

У пропонованій дисертаційній роботі обґрунтовуються шляхи підвищення показників екологічної безпеки двигуна автомобіля на основі вдосконалення робочого процесу шляхом модернізації його конструкції, систем та елементів; установкою додаткових пристроїв, що забезпечують зниження вмісту основних токсичних компонентів ВГ, що дозволяють здійснювати регенерацію теплоти ВГ. Як базу для теоретичних та експериментальних досліджень покладено вітчизняні дизельні двигуни.

1.4. Актуальність теми та задачі дослідження.

Автомобільні двигуни дають значну кількість викидів, що створюють хімічне і теплове забруднення навколишнього середовища, вони служать також джерелом шуму і вібрації. Відомо, що близько 60 % забруднень повітряного басейну більшості країн викликано роботою транспорту. Донедавна у вдосконаленні робочого процесу ДВС найбільшу увагу приділялося потужним та паливно-економічним показникам. На етапі розвитку автомобільних ДВС першому плані виступають критерії, що характеризують їх негативний вплив на довкілля, вимоги зниження концентрації токсичних компонентів в ВГ, зменшення рівнів шуму і вібрації, і навіть теплового випромінювання. Вирішення кожного з цих питань є самостійною, складною та дуже актуальною

науково-технічною проблемою, що вимагає для свого вирішення в умовах експлуатації нових наукових підходів.

Завдання раціонального витрачання природних копалин енергоресурсів з року в рік стає все актуальнішим. Незважаючи на тривалий період розвитку ДВЗ, їхній коефіцієнт корисної дії (ККД) залишається досить низьким. Одна з причин – значні втрати теплоти з ОГ. Зниження споживання палива досягти непросто, крім того, це може вплинути на інші параметри двигуна, наприклад, динамічні [2].

На сучасному етапі розвитку ДВЗ перспективи традиційних схем зумовлені тим, що резерви їх подальшого вдосконалення за вищезазначеними проблемними напрямками вичерпуються, в тому числі і за таким, як підвищення паливної економічності. Сьогодні і в найближчій перспективі конкурентоспроможність поршневих ДВЗ може ефективно забезпечуватися новими комбінованими конструктивно-технологічними рішеннями, заснованими як на використанні відомих традиційних переваг, так і альтернативних технологіях: акумулювання тепла, вторинного його використання в системах сумішоутворення альтернативних змішувальних горючих, теплоутизаційних каталітичного теплового конвертування ВГ у системах газовипуску, що в кінцевому підсумку призводить до підвищення паливної економічності, ефективного ККД, зниження димності та токсичності відпрацьованих газів.

Проте реалізація таких концептуальних конструктивно-технологічних підходів, заснованих на поєднанні (комбінуванні) традиційними та новітніми технологіями, що досягли сьогодні досить високого технічного рівня, потребує якісно нового науково-прикладного осмислення в теорії та практиці експлуатації ДВЗ.

В даній кваліфікаційній роботі пропонується новий узагальнений науково обґрунтований багатofакторний підхід вирішення зазначених проблем стосовно умов використання багатокomпонентних палив у ДВЗ, що забезпечує комплексне зниження негативного впливу транспортних засобів на навколишнє

середовище. Сформульовано рекомендації щодо підвищення екологічної безпеки та ефективності роботи двигунів на основних режимах роботи.

Мета роботи полягає в розробці методології підвищення показників екологічної безпеки ДВЗ транспорту, розробки та впровадження в експлуатацію комплексу нових технічних рішень щодо використання багатокomпонентного палива на основі спиртових добавок та зниження хімічного та фізичного забруднення навколишнього середовища транспортними засобами.

Задачі дослідження.

1. Розробка теоретичних основ підготовки, формування та застосування багатокomпонентного палива для ДВЗ стосовно умов експлуатації, що включає розрахунок складу ВГ при використанні в ДВЗ багатокomпонентного палива, науково-технічну концепцію підготовки та застосування багатокomпонентного палива.

2. Експериментальне обґрунтування концептуальних положень методології підвищення екологічної безпеки ДВЗ на стендах та в експлуатації, з розробкою методик дослідження, підбором необхідного обладнання, аналізом експериментального матеріалу з виявленням перспективних напрямів результатів дослідження.

Об'єкт дослідження. Двигун внутрішнього згорання, що працює на багатокomпонентному паливі на основі спиртових добавок.

Предмет дослідження. Комбіновані робочі процеси, що поєднують нові концептуальні принципи формування багатокomпонентного палива, нейтралізації відпрацьованих та підвищення екологічної безпеки ДВЗ.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані з використанням положень та методик розрахунку складу дизельного палива. Експериментальні дослідження виконані з використанням стандартних та приватних методик та сучасних приладів та обладнання. Обробка результатів досліджень проводилася з використанням методів математичної статистики.

Наукова новизна роботи:

1. Розроблено методику розрахунку багатокomпонентного палива.

2. Отримано нові результати експериментальних досліджень впровадження систем формування багатокomпонентного палива.

3. Створено математичні моделі та інженерні методики розрахунку основних параметрів ДВЗ.

Практична цінність полягає у розробці методики визначення термічних властивостей багатокomпонентних палив, аналізу складу продуктів згоряння палив у ДВЗ.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ЕКОЛОГІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДВЗ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.

Транспортні засоби мають пряме відношення до всіх аспектів проблем захисту природи, оскільки він прямо впливає на довкілля через багатомільйонний парк та різноманітну експлуатаційну інфраструктуру.

Двигуни внутрішнього згорання створюють основний екологічний вплив на навколишнє середовище у процесі реалізації потреби в транспорті при виконанні різноманітної роботи. Екологічне забруднення двигуном систематизується у такі групи: газоподібні, енергетичні, рідкі, тверді та інші.

Оцінку екологічної небезпеки ДВЗ при їх роботі на режимах, що відповідають реальним умовам експлуатації транспортного засобу, рекомендується здійснювати за питомою величиною нанесеної шкоди, яка завдається навколишньому середовищу від впливу шкідливих речовин, що викидаються з відпрацьованими газами в атмосферу.

2.1 Дослідження впливу технічного стану дизельного ДВЗ на димність відпрацьованих газів.

Ідентифікація причин у вигляді розрегулювання або відмов систем двигуна в тому випадку, якщо вони супроводжуються зміною протікання робочого процесу згорання, може бути заснована на тому, що кожна конкретна причина і будь-яка комбінація причин такого роду обов'язково повинна проявитися в складі ВГ також для неї (цієї причини або комбінації причин) властиве шкідливе поєднання складових ВГ. Причому очевидно, що чим більше використовується в аналізі класифікуючих факторів - аргументів (складових ВГ), в кожному з яких причина проявляється тільки для її властивій функціональної залежності, тим з більшою надійністю буде проводитися ідентифікація несправностей [5].

З точки зору оцінки технічного стану двигуна ТЗ в умовах експлуатації певний інтерес представляє режим вільного прискорення (ВП), що обумовлено рядом обставин. По-перше, на режимі ВП проявляються всі відмови двигуна і паливної апаратури, пов'язані з порушенням робочого процесу і, отже, зміною складу ВГ. По-друге, він порівняно легко відтворюється в умовах експлуатації, та при короткочасній роботі дизеля при навантаженні і, по-третє, за цими причинами він є тестовим при оцінці димності ВГ в ряді вітчизняних та міжнародних стандартів.

Реалізація даного підходу стосовно ідентифікації відхилень регулювань паливоподачі може вирішуватися в два етапи:

1) встановити характер зв'язку у формі множинних рівнянь регресії основних регулювальних параметрів паливної апаратури (ПА) $g_{\text{цп}}$, $P_{\text{ф}}$, $\mu f_{\text{ф}}$, $\Theta_{\text{впр}}$, при їх варіюванні в межах експлуатаційних відхилень за однофакторним планом, зі складом ВГ (K , CO , NO_x , C_mH_n , CO_2) на режимі ВП.

2) на основі математичної моделі розробити алгоритм розпізнавання відхилень регулювань від нормованих значень параметрів ПА, реалізованих за допомогою ЕОМ.

Виконані із застосуванням теорії планування багатфакторних досліджень експерименти на дизелі Д-240 в режимі ВП дозволили отримати рівняння множинної регресії у формі лінійної і ступеневої моделі [9].

Ступенева модель ($y = ax_1^{h1} \cdot x_2^{h2} \cdot x_3^{h3} \cdot x_4^{h4} \cdot x_5^{h5}$);

$$g_{\text{цп}} = 174,484 \cdot K^{0,1333} \cdot \text{CH}^{1,132} \cdot \text{NO}_x^{0,243} \cdot \text{CO}_2^{34,869} \cdot \text{CO}^{-0,878};$$

$$P_{\text{ф}} = 2,470 \cdot K^{-0,962} \cdot \text{CH}^{0,65} \cdot \text{NO}_x^{0,374} \cdot \text{CO}_2^{3,735} \cdot \text{CO}^{-0,0193};$$

$$\mu f_{\text{ф}} = 0,198 \cdot K^{0,248} \cdot \text{CH}^{0,709} \cdot \text{NO}_x^{-0,13} \cdot \text{CO}_2^{0,186} \cdot \text{CO}^{-0,0437};$$

$$\Theta_{\text{впр}} = 460,849 \cdot K^{0,3873} \cdot \text{CH}^{0,164} \cdot \text{NO}_x^{0,621} \cdot \text{CO}_2^{-4,91} \cdot \text{CO}^{-1,018}.$$

Середня похибка апроксимації (в %) $g_{\text{цп}}$: 0,157; $P_{\text{ф}}$: 0,112; $\mu f_{\text{ф}}$: 0,068; $\Theta_{\text{впр}}$: 0,799.

Лінійна модель $y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5$:

$$g_{\text{цп}} = -227,818 + 0,3285 \cdot K + 0,111 \cdot \text{CH} - 0,062 \cdot \text{NO}_x + 2288,304 \cdot \text{CO}_2 \cdot 0,033 \cdot \text{CO};$$

$$P_{\text{ф}} = -204,37 \cdot 3,041 \cdot K + 1,831 \cdot \text{CH} + 0,191 \cdot \text{NO}_x + 12,305 \cdot \text{CO}_2 \cdot 0,0301 \cdot \text{CO};$$

$$\mu f_{\text{ф}} = 0,4517 + 0,0005 \cdot K - 0,004 \cdot \text{CH} \cdot 0,002 \cdot \text{NO}_x + 0,125 \cdot \text{CO}_2 - 0,002 \cdot \text{CO};$$

$$\Theta_{\text{впр}} = -395,011 - 2,664 \cdot K + 0,149 \cdot \text{CH} - 0,49 \cdot \text{NO}_x + 398,192 \cdot \text{CO}_2 + 0,0479 \cdot \text{CO}.$$

Середня похибка апроксимації (в %) $g_{\text{цп}}$: 0,114; $P_{\text{ф}}$: 0,198; $\mu f_{\text{ф}}$: 0,0137; $\Theta_{\text{впр}}$: 0,542.

де $g_{\text{цп}}$ – установче значення циклової подачі палива на номінальному режимі роботи дизеля, мм³/цикл;

$P_{\text{ф}}$ – установче значення початкового тиску впорскування палива, МПа;

$\mu f_{\text{ф}}$ – пропускна здатність розпилювачів форсунок, мм²;

$\Theta_{\text{впр}}$ – установчий кут випередження впорскування палива;

K , CO , NO_x , CH , CO_2 – інтегральні значення, відповідно, димності ВГ, %; концентрація оксиду вуглецю, млн.⁻¹; сумарних вуглеводнів, млн.⁻¹; діоксиду вуглецю, %, виміряні після збору ВГ при роботі дизеля в режимі ВП в еластичну ємність (пробовідбиральний «мішечок»).

Як видно, дана математична модель з високим ступенем збіжності з результатами експериментальних досліджень дозволяє ідентифікувати по комплексу вимірювань K , CO , NO_x , CH , CO_2 в режимі ВП значення регулювальних параметрів ПА.

Для вирішення поставленого завдання стосовно ТЗ з дизельним двигуном КамАЗ-5425 була проведена математична обробка результатів експерименту на номінальному режимі роботи ($n_{\text{ном}}$) і режимі максимального крутного моменту ($n_{\text{мах}}$) дизеля КамАЗ-5425 і отримані залежності, встановлюють кореляційні зв'язки значень регулювальних параметрів паливної системи дизеля КамАЗ-5425 зі складом відпрацьованих газів, які наведені в таблиці 2.1.

На практиці використання одержаних залежностей може викликати певні труднощі обчислювального характеру. У зв'язку з цим на підставі отриманих

залежностей була побудована номограма для визначення найбільш вірогідних значень регулювальних параметрів паливної системи дизеля КамАЗ-5425 за результатами аналізу складу відпрацьованих газів, яка наведена на рисунку 2.1

Таблиця 2.1 – Кореляційні залежності

Режим	Залежність	Коефіцієнт кореляції
N=1822 хв ⁻¹	NO _x = -214,441+43,542Θ	0,91
	K= -71,000+1,450g	0,88
	CO= -1163,345+345+156,949 K _{cy}	0,90
	C _m H _n = 71469+0,472K _{cy}	0,92
	K= -11,637+2,655K _{cy}	0,87
	C _τ = 7,773+0,195g	0,96
N=2622 хв ⁻¹	NO _x = -342,253+42,437 Θ	0,93
	K= -40,267+0,962g	0,85
	CO= -489,645+869,973 K _{cy}	0,94
	C _m H _n = -58,001+15,704 K _{cy}	0,86
	K= -5,277+1,969 K _{cy}	0,92
	C _τ = 16,887+0,182g,	0,93
III	K _{cy} = 21,467+0,002 _g ² ; -0,031P _ф ² ;	0,85

Розроблена номограма дозволяє на основі аналізу складу ВГ дизелів КамАЗ-5425 оперативно діагностувати значення регулювальних параметрів паливної системи: кута випередження впорскування палива, середньої циклової подачі, тиску початку впорскування палива форсунками, а також визначати часову витрату палива.

2.2. Утворення токсичних речовин при горінні палива.

В камері згорання теплових двигунів на механізм утворення продуктів неповного згорання і характер побічних реакцій, які протікають при горінні впливає структура фронту полум'я.

У дифузійному полум'ї (камера згорання дизеля) паливо та окислювач дифундують у фронт полум'я, де у вузькій області змішування протікає хімічна реакція та досягається максимальна температура. До цієї області примикає з боку палива область його термічного розпаду в якій без окислювача утворюються поряд з проміжними продуктами розпаду водень і сажа. Водень,

дифузуючи у фронт полум'я, згоряє, а частинки сажі збільшуються за рахунок розпаду на поверхні вуглеводнів і коагуляції окремих сажевих частинок при їх дифузії і вигоряють у фронті полум'я зі значно меншою швидкістю. Частина сажевих частинок дифундує у бік палива. З боку окислювача до фронту полум'я примикає область утворення NO, яка дифундує в обидві сторони. При дифузії у бік фронту полум'я NO розкладається з високою швидкістю при температурі полум'я області, яка обмежена вмістом у суміші кисню. При дифузії від фронту полум'я NO також розкладається, але по мірі зниженням T відбувається загартовування, тобто концентрація перестає змінюватись при зменшенні рівноважного значення концентрації NO [9].

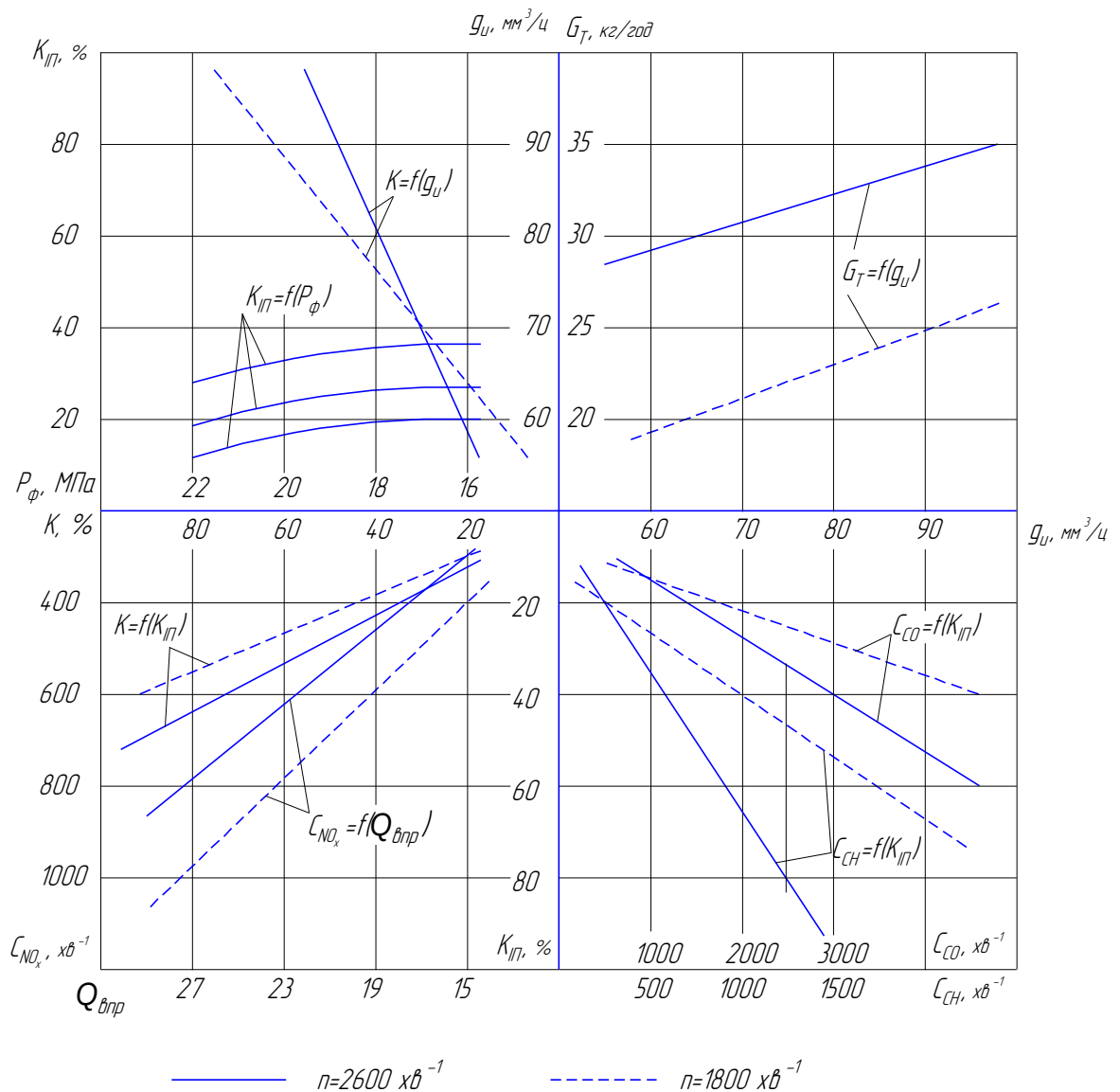


Рисунок 2.1 – Номограма діагностування регулювальних параметрів паливної апаратури дизельного двигуна.

У полум'ї, що розповсюджується по гомогенній суміші в двигунах із зовнішнім сумішоутворенням, повнота згоряння залежить в першу чергу від складу суміші. Якщо надлишковим компонентом (порівняно зі стехіометричним складом) є паливо ($\alpha < 1$), має місце неповнота його окислення (наприклад, до CO), а якщо надлишковим компонентом є окислювач ($\alpha > 1$), то більш інтенсивними будуть реакції утворення NO. Проте сприятливі для утворення NO умови обмежені ($\alpha < 1,05$) і при зростанні надлишку окислювача через зниження температури концентрація оксидів азоту у продуктах згоряння зменшується.

Якщо температура в області горіння гетерогенної суміші невисока, тоді теплоти, що підводиться в зону розпаду вуглеводнів, може не вистачити для забезпечення їхнього розпаду до кінцевих продуктів, температура при цьому падатиме, ендотермічний процес - самогальмуватиметься. В результаті в продуктах згоряння будуть присутні незгорілі вуглеводні палива, що випарувалося. Причинами падіння температури є охолодження суміші в пристінковій зоні.

Шкідливі та токсичні речовини, що містяться у відпрацьованих газах двигунів, залежно від механізму їх утворення можна розділити на такі групи:

а) вуглецевмісні речовини – продукти повного та неповного згоряння палива (CO₂, CO, вуглеводні, у тому числі поліциклічні ароматичні, сажа);

б) речовини, механізм утворення яких безпосередньо не пов'язаний із процесом згоряння палива (оксиди азоту – по термічному механізму);

в) речовини, викид яких пов'язаний з домішками, що містяться в паливі (з'єднання сірки, свинцю, інших важких металів), повітрі (кварцовий пил, аерозолі), а також утворюються в процесі зносу деталей (оксиди металів).

Розглянемо докладніше механізми утворення тих речовин, вміст яких у відпрацьованих газах двигунів нормується або передбачається нормувати в майбутньому.

Монооксид вуглецю CO (безбарвний, дуже отруйний газ без запаху) – утворюється в ході передполум'яних реакцій, при згорянні вуглеводневого

палива з деяким недоліком повітря, а також при дисоціації CO_2 (при температурах більше 200 K). Утворення CO є одним із принципово можливих напрямів реакцій у механізмі горіння (окислення) вуглеводнів, яке можна представити як:



Реакція радикалу RCO, що призводить до утворення CO, може протікати внаслідок одночасної взаємодії з чотирма компонентами:



що характерно для бензинових карбюраторних двигунів.

У дизелях, що працюють при ($\alpha > 1$), ймовірність зазначених перетворень у фронті полум'я мала і в газах, що відпрацювали, міститься менше CO, але в циліндрах знаходяться додаткові джерела його появи:

- низькотемпературні ділянки полум'я стадії займання палива;
- краплі палива, що надходять у камеру на пізніх стадіях впорскування та згоряють у дифузійному полум'ї при нестачі кисню;
- частини сажі, що утворилася в період поширення турбулентного полум'я за гетерогенним зарядом в якому при загальному надлишку кисню можуть створюватися зони з його дефіцитом та здійснюватися реакції типу:



Діоксид вуглецю CO_2 є не токсичною, але шкідливою речовиною у зв'язку з фіксованим підвищенням його концентрації в атмосфері та її впливом на зміну клімату. Робляться кроки щодо регламентування його викиду об'єктами енергетики, промисловості та транспорту.

Основна частка що утворилася в камері згорання CO окислюється до CO_2 , не виходячи за межі камери згорання, при замірах частка діоксиду вуглецю у відпрацьованих газах становить 10-15 %, тобто у 300-450 разів більше, ніж у атмосферному повітрі. Найбільший внесок в утворення CO_2 робить реакція:



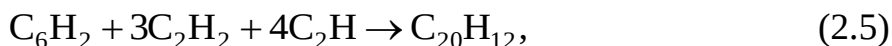
яка є незворотною. Окислення CO в CO₂ відбувається у випускній трубі, а також в нейтралізаторах (допалювачах) відпрацьованих газів, які встановлюються на сучасних ТЗ для примусового окиснення CO і вуглеводнів, що не згоріли, до CO₂ у зв'язку з необхідністю виконання норм токсичності.

Величина викидів CO₂ залежить від фізико-хімічних та теплофізичних властивостей палив та їх витрати. При використанні в якості моторного палива водню в продуктах згоряння CO₂ відсутній.

Вуглеводні C_xH_y – кілька десятків найменувань речовин, що утворюються в результаті:

- реакцій ланцюгово-теплого вибуху - піролізу та синтезу (поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), альдегіди, феноли);
- неповноти згоряння внаслідок порушення процесу горіння (через припинення реакцій окиснення вуглеводнів при низьких температурах, неоднорідності паливо-повітряної суміші, пропусків запалювання в окремих циклах або циліндрах двигуна (незгорілі компоненти палива та мастила).

Найбільш токсичні із вуглеводнів ПАВ. Максимальний рівень токсичності (агресивність і концентрація) має бенз(α)пірен C₂₀H₁₂. Гіпотетична реакція утворення C₂₀H₁₂ при піролізі вуглеводневих палив при температурі понад 873 К може бути виражена у вигляді:



де C₆H₂ – полірадикал, що представляє початок утворення сажі;

C₂H₂, C₂H – елементні блоки. Бенз(α)пірен утворюється одночасно з сажею за подібним механізмом, який розглядається нижче.

Тверді частинки включають нерозчинні (твердий вуглець, оксиди металів, діоксид кремнію, сульфати, нітрати, асфальти, сполуки свинцю) і розчинні в органічному розчиннику (смоли, феноли, альдегіди, лак, нагар, важкі фракції, що містяться в паливі та мастилі).

Тверді частки у відпрацьованих газах дизелів з наддувом складаються на 68-75 % з нерозчинних речовин, на 25-32 % - з розчинних.

Сажа (твердий вуглець) є основним компонентом твердих нерозчинних частинок. Утворюється при об'ємному піролізі (термічному розкладанні вуглеводнів у газовій або паровій фазі при нестачі кисню). Механізм утворення включає кілька стадій;

- утворення початкової стадії;
- зростання початкової стадії до первинних частинок (шестикутних пластинок графіту);
- збільшення розмірів частинок (коагуляція) до складних утворень - конгломератів, що включають 100-150 атомів вуглецю;
- вигоряння.

Виділення сажі з полум'я відбувається при $\alpha=0,33-0,7$. У дизелів локальні збагачені паливом зони утворюються частіше і в повній мірі реалізуються перелічені процеси сажеутворення. Тому викиди сажі з відпрацьованими газами у дизелів більше, ніж у двигунів з іскровим запалюванням. Утворення сажі залежить від властивостей палива: чим більше відношення С/Н у паливі, тим вихід сажі вищий.

Важливий процес, що визначає рівень емісії сажі при горінні – її вигоряння у високотемпературному турбулентному газовому потоці при температурі 850-920 К. У процесі вигоряння є значущими дифузія та сорбція на поверхні конгломератів сажі твердих голкоподібних утворень ПАВ, що відносить її до класу небезпечних забруднень.

До складу твердих частинок крім сажі входять сполуки сірки і свинцю.

Сірка, що міститься в моторному паливі, під час горіння інтенсивно окислюється в SO_2 за принципом схожості з механізмом утворення СО. Діоксид сірки може окислюватися (із значно меншою швидкістю) до SO_3 за рівнянням:



Далі відбувається реакція SO_3 із парами води. Приводить до утворення H_2SO_4 , яка протікає на стінках при температурі нижче 815 К.

Свинець у складі твердих частинок (через використання етилованих бензинів) є у вигляді сполук галогенідів свинцю, які утворюються за подібним механізмом утворення сажі.

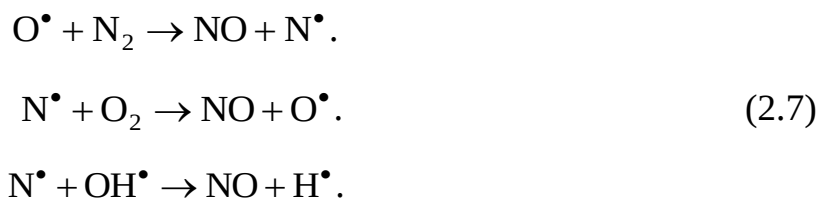
Оксиди азоту NO_x представляють набір наступних сполук: N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 і N_2O_5 . Переважає NO (99 % у бензинових двигунах та більше 90 % у дизелях).

У камері згоряння NO може утворюватися:

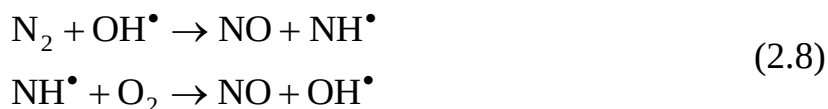
- 1) при високотемпературному окисненні азоту повітря (термічний NO);
- 2) в результаті низькотемпературного окислення азотовмісних сполук палива (паливний NO);
- 3) через зіткнення вуглеводневих радикалів з молекулами азоту у зоні реакцій горіння за наявності пульсацій температури (швидкий NO).

У камерах згоряння домінує тепловий NO , що утворюється з молекулярного азоту під час горіння бідної паливо-повітряної суміші та суміші, близької до стехіометричної, за фронтом полум'я в зоні продуктів згоряння.

Переважно при згорянні бідних та помірно багатих сумішей ($\alpha \geq 0,8$) реакції відбуваються за ланцюговим механізмом.



У багатих сумішах ($\alpha < 0,8$) здійснюються також реакції:



У бідних сумішах вихід NO визначається максимальною температурою ланцюгово-теплового вибуху (максимальна температура 2800-2900 К), тобто кінетикою утворення. У багатих сумішах вихід NO перестає залежати від максимальної температури вибуху та визначається кінетикою розкладання. При горінні бідних сумішей значно впливає на утворення NO нерівномірність

температурного поля в зоні продуктів згоряння і присутність парів води, яка в ланцюговій реакції окислення N_2 є інгібітором.

Висока інтенсивність процесу нагрівання, а потім охолодження суміші газів у циліндрі ДВЗ призводить до утворення суттєво нерівномірних концентрацій реагуючих речовин. Відбувається якби заморожування (загартування) утвореного NO лише на рівні максимальної концентрації, який виявляється у випускних газах через різке уповільнення швидкості розкладання NO. Азотовмісні складові палива (аміни, циклічні сполуки у вигляді піридину, карбазолу) є важливими джерелами утворення паливного NO вже при температурах 1300-1400 К, тому що на це потрібно енергії менше, ніж на руйнування зв'язків молекулярного азоту. Ці речовини легше входять у реакцію окислення, ніж атмосферний азот.

Можна виділити дві характерні зони:

I (до $T < 850$ К, каталітичне окиснення палива) - NO не утворюється;

II (до $T < 1500$ К, горіння в псевдозрідженому шарі твердого палива) - утворюється переважно паливний NO.

Теоретичний аналіз процесів горіння вуглеводневого палива необхідно враховувати при розрахунку та дослідженні застосування багатокомпонентного комбінованого палива, процесів утилізації вихідної теплоти відпрацьованих газів ДВЗ.

2.3. Розрахунок складу продуктів згоряння при використанні в ДВЗ багатокомпонентного палива.

Перспективним варіантом захисту навколишнього середовища від небезпеки забруднення ВГ є використання ДВЗ багатокомпонентних палив, що забезпечують мінімальний вміст токсичних компонентів у продуктах згоряння.

Однією з найважливіших завдань, що виникають під час аналізу можливостей використання ДВЗ перспективних багатокомпонентних палив, є розрахунок складу продуктів згоряння, що дозволяє оцінювати ефективність

використання досліджуваних компонентів палива з погляду зниження токсичності ВГ.

При вивченні індивідуальних хімічних сполук, формули речовин та їхня молекулярна вага повинні бути відомі. Якщо молекулярна вага окремих компонентів палива невідома, а її склад заданий елементарним ваговим складом (g_i), що має місце при використанні багатоконпонентних палив, то еквівалентну хімічну формулу записують для умовної молекулярної ваги ($m=100$) у вигляді:

$$A_a B_b C_c \dots, \quad (2.9)$$

$$\text{в свою чергу: } a = \frac{g_a}{m_a} \cdot m = \frac{g_a}{m_a} \cdot 100, \quad b = \frac{g_b}{m_b} \cdot m = \frac{g_b}{m_b} \cdot 100,$$

де m_a, m_b - атомна маса елементів, що входять до палива.

У деяких випадках розрахунки зручніше робити не на 1 моль, а на 1 кг палива. Тоді замість молекулярної формули можна записати питому хімічну формулу речовини:

$$A_{\bar{a}} B_{\bar{b}} C_{\bar{c}} D_{\bar{d}} \dots \quad (2.10)$$

Індекси $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$, в формулі (2.10) відрізняються від відповідних індексів у рівнянні (2.9) в m раз $\frac{a}{\bar{a}} = \frac{b}{\bar{b}} = \frac{c}{\bar{c}} = \frac{d}{\bar{d}} \dots = m$. Тоді відповідно до рівняння (2.9) отримаємо: $\bar{a} = \frac{g_a}{m_a}, \bar{b} = \frac{g_b}{m_b}$.

Якщо компонент палива заданий не елементарним складом, а у вигляді суміші речовин з ваговим вмістом кожного з них дорівнює $g_1; g_2$, то для всієї суміші:

$$g_1 \cdot (A_{\bar{a}}; B_{\bar{b}}; C_{\bar{c}}; \dots) + g_2 \cdot (A_{\bar{a}}; B_{\bar{b}_1}; C_{\bar{c}_2}; \dots) + \dots = (A_{\bar{a}}; B_{\bar{b}}; C_{\bar{c}}; \dots),$$

або

$$\frac{g_1}{m_1} \cdot (A_a; B_b; C_c; \dots) + \frac{g_2}{m_2} \cdot (A_a; B_{b_1}; C_{c_2}; \dots) + \dots = (A_a; B_b; C_c; \dots), \quad (2.11)$$

де $(A_{\bar{a}}; B_{\bar{b}}; C_{\bar{c}})$ - питома формула суміші.

Величини індексів у рівнянні (2.10) визначаються за формулами:

$$\bar{a} = g_1 \bar{a}_1 + g_2 \bar{a}_2 + \dots + g_n \bar{a}_n, \quad \bar{b} = g_1 \bar{b}_1 + g_2 \bar{b}_2 + \dots + g_n \bar{b}_n,$$

або

$$\begin{aligned} \bar{a} &= g_1 \frac{a_1}{m_1} + g_2 \frac{a_2}{m_2} + \dots + g_n \frac{a_n}{m_n}, \\ \bar{b} &= g_1 \frac{b_1}{m_1} + g_2 \frac{b_2}{m_2} + \dots + g_n \frac{b_n}{m_n}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Умовна молекулярна вага суміші визначається із залежностей:

$$m = m_A a + m_B b + \dots m_D d, \quad (2.13)$$

$$m = \frac{a}{\bar{a}} = \frac{b}{\bar{b}} = \dots = \frac{d}{\bar{d}}. \quad (2.14)$$

При експлуатації ДВЗ дійсне співвідношення між окислювачем і паливом відрізняється від стехіометричного і враховується коефіцієнтом надлишку окислювача (α):

$$\alpha = \frac{\chi}{\chi_0}, \quad \chi = \alpha \chi_0, \quad (2.15)$$

де χ , χ_0 - дійсне та стехіометричне співвідношення між окислювачем та паливом.

При відомому значенні стехіометричного співвідношення можна скласти умовну хімічну формулу для багатокomпонентного палива, що відповідає заданому значенню співвідношення повітря/паливо (при $\alpha > 1$ паливо містить надлишок окисних елементів, при $\alpha < 1$ – надлишок горючих елементів).

Молекулярна формула багатокomпонентного палива:

$$A_a B_b C_c D_d \dots, \quad (2.16)$$

де:

$$a = a_r + \alpha \cdot \chi'_o \cdot a_o; \quad b = b_r + \alpha \cdot \chi'_o \cdot b_o, \dots,$$

в свою чергу: χ'_o - стехіометричне співвідношення кількості молей окислювача на один моль палива.

Питома формула для багатокomпонентного палива:

$$A_{\bar{a}}B_{\bar{b}}C_{\bar{c}}D_{\bar{d}}\dots, \quad (2.17)$$

де: $a_r; b_r; c_r$; або $\bar{a}_r; \bar{b}_r; \bar{c}_r \dots$ - число грам-атомів елементів в відповідних умовних формулах палива, $a_o; b_o; c_o$, або $\bar{a}_o; \bar{b}_o; \bar{c}_o \dots$ - в відповідних формулах окислювача.

$$\bar{a} = \frac{\bar{a}_r + \chi_o \cdot \alpha \cdot \bar{a}_o}{1 + \alpha \cdot \chi_o}; \quad \bar{b} = \frac{\bar{b}_r + \chi_o \cdot \bar{b}_o}{1 + \alpha \cdot \chi_o}, \quad (2.18)$$

де: χ_o - стехіометричне співвідношення між окислювачем і паливом.

При розрахунках температури згоряння користуються повною ентальпією палива - J , що вимірюється сумою термодинамічної ентальпії - i та хімічної енергії палива - $Q_{\text{хім}}$:

$$J = i + Q_{\text{хім}} = \int_{T_{\text{max}}}^{T_n} C_p \cdot dT + Q_{\text{хім}}. \quad (2.19)$$

Повна ентальпія багатокomпонентного палива визначається сумою повних ентальпій окислювача - J_o та пального J_r :

$$\text{- для 1 кг палива } J = \frac{J_r + \chi \cdot J_o}{1 + \chi}, \text{ ккал/кг}; \quad (2.20)$$

$$\text{- для 1 моля палива } J_m = m \cdot J, \text{ ккал/моль}.$$

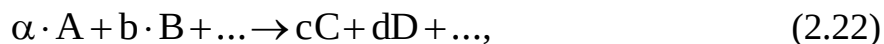
Повна ентальпія окислювача пального або будь-якої речовини, що є сумішшю різних хімічних сполук, визначається за ентальпіями складових речовин (J_i) та їх ваговими частками (g_i):

$$J = \sum_{i=1}^{i=n} g_i J_i, \text{ ккал/кг}. \quad (2.21)$$

Чисельні значення повних ентальпій залежать від прийнятої системи відліку, для визначення якої необхідно задати початкову температуру відліку ($T_{\text{поч}}$) і початкові рівні хімічних енергій аналізованих речовин.

Якщо відсутні табличні значення ентальпії речовин, що входять у паливо, для обчислення повних ентальпій можна використовувати теплові ефекти хімічних реакцій, що включають розглянуту речовину та інші речовини, для

яких відомі табличні значення повних ентальпій. Нехай у загальному вигляді задана реакція:



де: $a, b, c, d, \dots$ - кількість молей речовини $A, B, C, D, \dots$

Рівняння збереження енергії (при постійних тисках та температурах) для цієї реакції має вигляд:

$$aJ_a + bJ_b \leftrightarrow cJ_c + dJ_d \pm Q_{\text{реак}}. \quad (2.23)$$

Відносячи до одного молу речовини A отримаємо:

$$J_A + bJ_b = cJ_c + dJ_d \pm Q_{\text{реак}}, \text{ ккал/моль речовина } A. \quad (2.24)$$

За допомогою цього рівняння може бути розрахована величина повної ентальпії J_A при будь якій температурі, якщо при тій же температурі відомі величини J_B, J_C, J_D і $Q_{\text{реак}}$.

Розрахунок рівноважного складу продуктів згоряння вихідної паливної суміші довільного складу проводиться за умовною формулою:

$$N_x(A_{a_o}, B_{b_o}, C_{c_o}, D_{d_o}),$$

де: N_x – кількість молей палива, вихідного складу, що містить m – елементів; $A; B; C; D$ - елементи, що входять у паливо, $a_o; b_o; c_o, d_o$ - число атомів цих елементів відповідно.

В ході реакції згоряння, дисоціації та можливої іонізації утворюються Z речовини, у тому числі: Z_1 - електрично нейтральних молекул і атомів, що знаходяться в газоподібному стані, Z_2 - електрично нейтральних молекул і атомів у конденсованому стані, Z_3 - позитивних іонів, Z_e - вільних електронів і Z_i - негативних іонів.

Умовна реакція утворення всіх цих речовин Z з вихідного палива в загальному вигляді, з урахуванням можливої іонізації може бути записана наступним чином:

$$N_x(A_{a_0}, B_{b_0}, C_{c_0}, D_{d_0}) \rightarrow \sum_{i=1}^{i=z} N_i(A_{a_i}, B_{b_i}, C_{c_i}, D_{d_i}) + \sum_{i=z_1+1}^{i=z_1+z_2} N_i(A_{a_i}, B_{b_i}, C_{c_i}, D_{d_i}) + \\ + \sum_{i=z_{21}+1}^{i=z_2+z_3} N_i(A_{a_i}, B_{b_i}, C_{c_i}, D_{d_i}) + \sum_{i=z_3+1}^{i=z_3+z_4} N_i(A_{a_i}, B_{b_i}, C_{c_i}, D_{d_i}) + Z_e \bar{e} \quad (2.25)$$

Для визначення складу продуктів реакції необхідно обчислити Z невідомих, що характеризують концентрації або парціальний тиск компонентів (N_i або P_i), а також невідома кількість молей вихідного палива - N_x . Таким чином, кількість невідомих дорівнює $Z+1$ і для вирішення поставленої задачі необхідно скласти систему із $Z+1$ незалежних рівнянь.

У цю систему рівнянь увійдуть:

1. Рівняння балансу елементів:

$$a_0 N_x = \sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i \quad b_0 N_x = \sum_{i=1}^{i=z} b_i N_i \quad (2.26)$$

Число цих рівнянь дорівнює числу елементів - m .

2. Рівняння балансу електростатичних зарядів при іонізації:

$$N_e + \sum N_{ie} \sum 2N_{ie} + \dots = \sum N_{ie} + \sum 2N_{ie} + \dots, \quad (2.27)$$

що характеризує електростатичну рівноважність іонізованого газу.

3. Рівняння дисоціації та іонізації у формі рівняння при розрахунку на N_i - молей вихідних речовин:

- для газів:

$$K_i = \frac{P_i}{P_A^{a_i} \cdot P_B^{b_i} \cdot P_C^{c_i}} = \frac{P_i}{N_A^{a_i} \cdot N_B^{b_i} \cdot N_C^{c_i}}; \quad (2.28)$$

- для конденсованих речовин:

$$K_{\text{іккон}} = \frac{1}{P_A^{a_i} \cdot P_B^{b_i} \cdot P_C^{c_i}} = \frac{1}{N_A^{a_i} \cdot N_B^{b_i} \cdot N_C^{c_i}}; \quad (2.29)$$

- для позитивних іонів:

$$K_{ic} = \frac{P_{ie^+} P_{e^-}}{P_i}; \quad (2.30)$$

- для негативних іонів:

$$K_{ic} = \frac{P_{ie^+}}{P_i P_{e^-}}. \quad (2.31)$$

4. Рівняння сумарного числа молей для речовин у довільному агрегатному стані:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=z} N_i, \quad (2.32)$$

або рівняння сумарного тиску суміші газових компонентів (для газів) у формі закону Дальтона:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=z} P_i N_i. \quad (2.33)$$

Рівняння (2.26)...(2.33) у сукупності утворюють систему $Z+1$ рівнянь, що містить шукане $Z+1$ невідомих. Необхідною та достатньою умовою вирішення цієї системи є визначення елементарного складу палива, що задається вмістом у ньому хімічних елементів (або завданням тих самих умов для деякої вихідної суміші, що знаходиться в проміжному стані). Тобто задається: a_0 - зміст грам-атомів елемента - А; b_0 - зміст грам-атомів елемента - В і так далі.

Тиск (P) і температура (T), за яких визначається рівноважний склад суміші, є граничними умовами.

Система рівнянь (2.26)...(2.33) являє собою звичайні рівняння алгебри, частина з яких (рівняння дисоціації та іонізації) можуть бути нелінійними.

Як один з методів наближених обчислень може бути використаний метод ітерації (послідовних наближень). У існуючій практиці термодинамічних розрахунків рівноважного складу продуктів згоряння на основі цього методу у поєднанні з винятком невідомих використовується кілька можливих способів та прийомів розрахунків. Недоліками цих способів рішень є відсутність загальної розрахункової схеми та обмеження застосування тільки для композицій палива, для яких вони проведені. У деяких випадках через відсутність збіжності послідовних наближень при заданих вихідних параметрах виконання таких методик розрахунків може бути неефективним використання ЕОМ.

Вдається доцільною систему рівнянь алгебри вирішити методом послідовних наближень щодо поправок, що вносяться в наступні наближення. Такі системи забезпечують можливість створення уніфікованої методики обчислень на ЕОМ.

Логарифмуючи систему рівнянь (2.26)...(2.33) отримуємо:

1. Рівняння балансу елементів на підставі рівняння (2.26):

$$\text{- для атомів A: } \lg \sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i - \lg a_0 N_x = 0; \quad (2.34)$$

$$\text{- для атомів B: } \lg \sum_{i=1}^{i=z} b_i N_i - \lg b_0 N_x = 0.$$

2. Рівняння електричної нейтральності для іонізуючого газу на підставі рівняння (2.27):

$$\lg \left[N_{\bar{e}} + \sum_{i=1}^{i=z} N_{i\bar{e}} + 2 \sum_{i=1}^{i=z} N_{i\bar{e}} + \dots \right] - \lg \left[\sum_{i=1}^{i=z} N_{ie^+} + 2 \sum_{i=1}^{i=z} N_{ie^-} + \dots \right] = 0. \quad (2.35)$$

3. Рівняння дисоціації та іонізації на підставі (2.28):

- для газів:

$$\lg P_i - a_i \lg P_a - b_i \lg P_b - c_i \lg P_c - \dots - \lg K_i = 0; \quad (2.36)$$

- для конденсованих речовин:

$$- a_i \lg P_A - b_i \lg P_B - c_i \lg P_C - \dots - \lg K_{\text{іккон}} = 0; \quad (2.37)$$

- для позитивних іонів:

$$\lg P_{ie^+} + \lg P_{e^+} - \lg P_i - \lg K_{ie^+} = 0; \quad (2.38)$$

- для негативних іонів:

$$\lg P_{ie^-} + \lg P_{e^-} - \lg P_i - \lg K_{ie^-} = 0. \quad (2.39)$$

4. Рівняння загального числа молей:

$$\text{- для всіх речовин: } \lg \sum_{i=1}^{i=z} N_i - \lg N_{\Sigma} = 0; \quad (2.40)$$

$$\text{- для газів: } \lg \sum_{i=1}^{i=z} P_i - \lg P_{\Sigma} = 0. \quad (2.41)$$

Для лінеаризації рівнянь (2.26)...(2.33) на межах початкового наближення розкладемо кожен член цих рівнянь у ряд Тейлора за ступенями відхилень:

$$F(x_i) = F(x_i)_0 + \left[\frac{\partial F(x_i)}{\partial x_i} \right] \Delta x_i + \dots \text{нелінійні члени}, \quad (2.42)$$

де: Δx_i - відхилення величини x_i від значення, прийнятого при початковому наближенні:

- для тиску: $\Delta \lg P_i = \lg P_i - \lg P_i^0$;
- для концентрацій: $\Delta \lg N_i = \lg N_i - \lg N_i^0$;
- для температури: $\Delta \lg T = \lg T - \lg T^0$;
- для числа молей палива: $\Delta \lg N_x = \lg N_x - \lg N_x^0$.

Нехтуючи нелінійними членами розкладання, рівняння збереження елементів (2.26) для елемента А можна записати як:

$$\left(\lg \sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i \right)_0 + \frac{1}{\left(\sum a_i N_i \right)_0} \cdot \sum \left[\frac{\partial (a_i N_i)}{\partial (\lg N_i)} \right] \Delta \lg N_i - (\lg a_0 N_x)_0 - \frac{1}{a_0 N_x^0} \left(\frac{\partial (a_0 N_x)}{\partial (\lg N_x)} \right) \Delta \lg N_x = 0. \quad (2.44)$$

Для спрощення запису вводимо позначення:

$$(\lg \sum a_i N_i)_0 - (\lg a_0 N_x)_0 = \delta_A; \quad (2.45)$$

$$\left(\sum a_i N_i \right)_0 = L_A. \quad (2.46)$$

Тоді рівняння збереження елемента А набуде вигляду:

$$\sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i^0 \Delta \lg N_i - L_A \Delta \lg N_x = -\delta_A L_A. \quad (2.47)$$

Аналогічно можуть бути перетворені інші рівняння балансу та рівняння (2.26) та (2.33).

В результаті виконаних перетворень отримано наступну систему рівнянь у лінеарізованому вигляді:

Рівняння балансу елементів:

- для атомів А:

$$\sum a_i N_i^0 \Delta \lg N_i - L_A \Delta \lg N_x = -\delta_A L_A; \quad (2.48)$$

$$L_A = \sum a_i N_i^0; \quad \delta_A = \lg \sum a_i N_i^0 - \lg b_0 N_x^0.$$

Рівняння електростатичної нейтральності при іонізації:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{L_{e^-}} \left(N_{e^-}^0 \Delta \lg N_{e^-} + N_{e^-}^0 \Delta \lg N_{ie^-} + 2 \sum N_{ie^{--}}^0 \Delta \lg N_{ie^{--}} \right) - \\ & - \frac{1}{L_{e^+}} \left(\sum N_{ie^+}^0 \Delta \lg N_{ie^+} + 2 \sum N_{ie^{++}}^0 \Delta \lg N_{ie^{++}} \right) = -\delta_{e^-}; \\ & L_{e^-} = \left(N_{e^-}^0 + \sum N_{ie^-}^0 + 2 \sum N_{ie^{--}}^0 + \dots \right); \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$L_{e^+} = \left(\sum N_{ie^+}^0 + 2 \sum N_{ie^{++}}^0 + \dots \right);$$

$$\delta_{e^-} = \lg \left(N_{e^-}^0 + \sum N_{ie^-}^0 + 2 \sum N_{ie^{--}}^0 + \dots \right) - \lg \left(\sum N_{ie^+}^0 + 2 \sum N_{ie^{++}}^0 + \dots \right).$$

Рівняння рівноваги при дисоціації та іонізації:

- для газів:

$$\Delta \lg P_i - a_i \Delta \lg P_A - b_i \Delta \lg P_B - c_i \Delta \lg P_C - L_{K_i} \Delta \lg T = -\delta_i;$$

$$\delta_i = \lg P_i^0 - a_i \lg P_A^0 - b_i \lg P_B^0 - \dots - \lg K_i^0;$$

$$L_{K_i} = \left[\frac{\delta(\lg K_i)}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0, \quad (2.50)$$

- для конденсованих речовин:

$$-a_i \Delta \lg P_A - b_i \Delta \lg P_B - c_i \Delta \lg P_C - \dots - L_{K'_i} \Delta \lg T = -\delta_{ik};$$

$$\delta_{ik} = -a_i \lg P_A^0 - b_i \lg P_B^0 - \dots - \lg K'_i;$$

$$L_{K'_i} = \left[\frac{\delta(\lg K'_i)}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0, \quad (2.51)$$

- для позитивних іонів:

$$\Delta \lg P_{ie} - \Delta \lg P_{e^-} - \lg P_i - L_{K_{ie^+}} \Delta \lg T = -\delta_{ie^+}; \quad (2.52)$$

$$L_{K_{ie^+}} = \left[\frac{\delta(\lg K_{ie^+})}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0,$$

- для негативних іонів:

$$\Delta \lg P_{ie^-} + \Delta \lg P_{e^-} - \Delta \lg P_i - L_{K_{ie^-}} + \Delta \lg T = -\delta_{ie^-}; \quad (2.53)$$

$$\delta_{ie^+} = \lg P_{ie^+}^0 - \lg P_{e^-}^0 - \lg P_i^0 - \dots - \lg K_{ie^+}^0;$$

$$L_{K_{ie^+}} = \left[\frac{\delta(\lg K_{ie^-})}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0.$$

Рівняння загального числа молей:

- для всіх речовин:

$$\sum N_i \Delta \lg N_i = -\partial_n N_2^0; \quad (2.54)$$

$$N^0 = \sum N_i^0; \quad \delta_N = \lg \sum N_i^0 - \lg N_2^0,$$

- для газів:

$$\sum P_i \Delta \lg P_i = \delta_p P_\Sigma^0;$$

$$P_\Sigma^0 = \sum P_i^0; \quad \delta_p = \lg \sum P_i^0 - \lg P_\Sigma^0. \quad (2.55)$$

У цій системі лінійних рівнянь невідомими є виправлення $\Delta \lg N_i$, $\Delta \lg P_i$, $\Delta \lg T$; $\Delta \lg N_x$, які у подальшому відповідно до залежностей (2.43) використовуються для уточнення рішень. Уточнення здійснюється за формулами:

$$\text{- для тиску: } \Delta \lg P_i = \lg P_i^0 + \Delta \lg P_i;$$

$$\text{- для концентрацій: } \lg N_i = \lg N_i^0 + \Delta \lg N_i; \quad (2.56)$$

$$\text{- для температури: } \lg T = \lg T^0 + \Delta \lg T;$$

$$\text{- для числа молей палива: } \lg N_x = \lg N_x^0 + \Delta \lg N_x.$$

Кількість поправок відповідає числу невідомих, що визначають рівномірний склад хімічно реагує суміші.

Для забезпечення уніфікації розрахункових методик необхідно встановити однаковість у порядку запису рівнянь та єдиний алгоритм їх розв'язання.

В даний час розрахунок рівномірного складу продуктів згоряння в поршневих двигунах набув широкого поширення у якості вивчення утворення токсичних речовин і впливу різних факторів на цей процес. Для вирішення

цього завдання потрібно розробити математичну модель та скласти програму для розрахунку рівноважного складу продуктів згоряння на ЕОМ.

Для розрахунку складу продуктів згоряння кожному такті роботи двигуна необхідно розв'язати дві задачі:

- обчислення тиску та температури в кінці кожного такту;
- знаходження рівномірного складу продуктів згоряння.

Для знаходження температури і тиску в кінці кожного такту роботи ДВЗ необхідно задати характеристики двигуна, палива, робочої суміші в циліндрах ДВЗ і навколишнього середовища.

З відомих теоретичних досліджень можуть бути розраховані значення тиску і температури у кожному такті роботи ДВЗ.

Розглянемо докладно процедуру розрахунку складу продуктів згоряння.

Паливна суміш, що бере участь у процесах горіння при високій температурі являє собою багатокомпонентну суміш речовин у газоподібному та конденсованому стані. Розрахунок процесів горіння провадиться при деяких спрощеннях щодо стану суміші. Необхідність пояснюється вимогою достатньої простоти розрахунків.

Для суміші газів вважаємо, що вона складається із ідеальних індивідуальних речовин. Визначення рівномірного складу є частиною багатьох завдань високотемпературної енергетики і характеризуються великою різноманітністю методів розрахунку.

Аналіз робіт із розрахунку рівноважного складу продуктів згоряння показує, що існуючі методи можна класифікувати так:

1. Приватні методи (метод виключення невідомих, метод спроб і помилок, метод ітерацій, метод ступінчастого розрахунку рівноваги);
2. Загальні методи, які використовують константи рівноваги;
3. Методи чисельного інтегрування.

З найчастіше застосовуваних методів розрахунку рівноважного складу продуктів згоряння обрано метод виключення невідомих із системи з її рішенням методом Якоби.

Існують різні підходи визначення рівноважного складу продуктів згоряння. У даній дипломній роботі застосована методика розрахунку рівноважного складу, в якій враховується 18 компонентів ВГ: O, O₂, O₃, H, H₂, OH, H₂O, C, CO, CO₂, CH₄, N, N₂, NO, NO₂, NH₃, HNO₃, HCN.

Для визначення вмісту зазначених компонентів необхідно скласти систему з 18 рівнянь. Для цього використовуємо 14 рівнянь рівноваги та 4 рівняння матеріального балансу.

Рівняння рівноваги:

$$K1 = P(O) / (P(O_2)^{(1/2)}); \quad (2.57)$$

$$K2 = P(O_3) / (P(O_2)^{(3/2)}); \quad (2.58)$$

$$K3 = P(H) / (P(H_2)^{(1/2)}); \quad (2.59)$$

$$K4 = P(H_2)^2 \cdot P(O_2) / (P(H_2O)^2); \quad (2.60)$$

$$K5 = P(OH) / (P(O_2)^{(1/2)} \cdot P(H_2)^{(1/2)}); \quad (2.61)$$

$$K6 = P(C) \cdot P(O_2) / P(CO_2); \quad (2.62)$$

$$K7 = P(C)P(O_2)^{(1/2)} / P(CO); \quad (2.63)$$

$$K8 = P(C) \cdot P(H_2)^2 / P(CH_4); \quad (2.64)$$

$$K9 = P(N) / (P(N_2)^{(1/2)}); \quad (2.65)$$

$$K10 = P(N) \cdot (O) / P(NO); \quad (2.66)$$

$$K11 = P(O_2)^{(1/2)} \cdot P(NO) / P(NO_2); \quad (2.67)$$

$$K12 = P(N_2)^{(1/2)} \cdot P(H_2)^{(3/2)} / P(NH_3); \quad (2.68)$$

$$K13 = P(NO)^3 \cdot P(H_2O) / (P(HNO_3)^2 \cdot P(NO)); \quad (2.69)$$

$$K14 = P(C) \cdot P(N_2)^{(1/2)} \cdot P(H_2)^{(1/2)} / P(HCN), \quad (2.70)$$

де K1...K14 – константа хімічної реакції;

P(...) – парціальний тиск відповідного компонента;

P – загальний тиск вихлопних газів (дорівнює сумі парціальних тисків).

Рівняння матеріального балансу:

$$A_p (P(O) + 2P(O_2) + 3P(O_3) + P(OH) + P(H_2O) + 3P(HNO_3) + P(CO) + 2P(CO_2) + 2P(NO_2) + P(NO)) = P(C) + P(CO) + P(CO_2) + P(CH_4) + P(HCN); \quad (2.71)$$

$$\begin{aligned}
& B_p (P(\text{NO}_2) + P(\text{N}) + 2P(\text{N}_2) + P(\text{NO}) + P(\text{NH}_3) + P(\text{HNO}_3) + P(\text{HCN})) = \\
& = P(\text{O}) + 2P(\text{O}_2) + 3P(\text{O}_3) + P(\text{OH}) + P(\text{H}_2\text{O}) + 3P(\text{HNO}_3) + P(\text{CO}) + \\
& + 2P(\text{CO}_2) + 2P(\text{NO}_2) + P(\text{NO});
\end{aligned} \tag{2.72}$$

$$\begin{aligned}
& Y_p (P(\text{H}) + 2P(\text{H}_2) + P(\text{OH}) + 2P(\text{H}_2\text{O}) + 4P(\text{CH}_4) + 3P(\text{NH}_3) + \\
& + P(\text{HNO}_3) + P(\text{HCN})) = P(\text{C}) + P(\text{CO}) + P(\text{CO}_2) + P(\text{CH}_4) + P(\text{HCN}),
\end{aligned}$$

де $A_p=0,32$; $B_p=0,26595$; $Y_p=0,4444$ – константи, що характеризують склад суміші (тобто концентрації компонентів).

В якості 18-го рівняння запишемо рівняння Дальтона, що встановлює зв'язок між повним тиском суміші та парціальним тиском окремих компонентів:

$$\begin{aligned}
P = & P(\text{O}) + P(\text{O}_2) + P(\text{O}_3) + P(\text{H}) + P(\text{H}_2) + P(\text{OH}) + P(\text{H}_2\text{O}) + P(\text{C}) + \\
& + P(\text{CO}) + P(\text{CO}_2) + P(\text{CH}_4) + P(\text{N}) + P(\text{N}_2) + P(\text{NO}) + P(\text{NO}_2) + \\
& + P(\text{NH}_3) + P(\text{HNO}_3) + P(\text{HCN}).
\end{aligned} \tag{2.73}$$

За допомогою наведених вище 18 рівнянь можна визначити рівноважний склад продуктів згоряння, що залежить від температури, тиску та концентрації реагуючих речовин.

В результаті проведеної роботи отримали програму для розрахунку рівноважного складу продуктів згоряння у поршневому двигуні.

У записаній матриці прийнятий розподіл невідомих по стовпцях і невідомих по рядках дозволяє одержати в лівому верхньому куті одиничну матрицю, що дає змогу проводити в процесі розрахунків виключення частини невідомих.

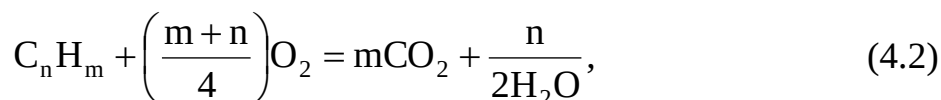
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВЗ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО ПАЛИВА.

3.1. Модель каталітичного нейтралізатора.

Одним з основних засобів, що забезпечують ефективне зниження кількості CO, C_nH_m і NO_x в ВГ є каталітичні нейтралізатори, які дозволяють без значних змін конструкції двигуна істотно знизити токсичність ВГ [8].

Сутність процесів каталітичної нейтралізації полягає у взаємодії токсичних компонентів ВГ між собою або з надлишковим киснем, внаслідок чого шкідливі сполуки переходять у нетоксичні.

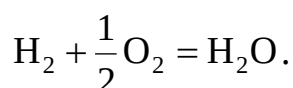
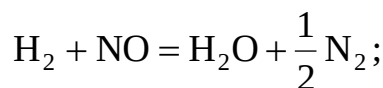
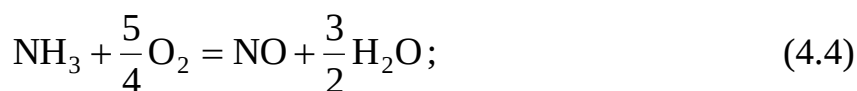
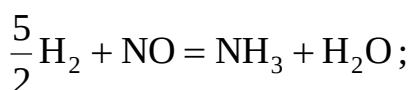
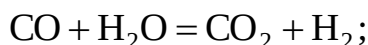
Основним підсумком процесів є окислення CO та C_nH_m:



а також відновлення NO_x продуктами неповного згоряння палива, головним чином CO:



Крім того, між компонентами ВГ та киснем може протікати цілий ряд побічних реакцій, зокрема:



та деякі інші.

Каталітичний нейтралізатор ВГ можна вважати складною технічною системою, так як він має кілька складових частин, які виконують свої функції і пов'язані між собою, що вимагає системи управління і контролю, має безліч гідравлічних, фізичних і хімічних взаємно пов'язаних процесів, що відбуваються в ньому.

Створення моделі складної технічної системи дозволяє отримувати можливість розв'язання прямих завдань, у яких визначаються реакції системи із заданою структурою при впливі на неї зворотних завдань аналізу, в яких за відомою реакцією системи з відомою структурою та властивостями визначають обурення, що викликали цю реакцію; задач синтезу, що вимагають знаходження структури системи та її параметрів, що забезпечують задану властивість; індуктивних завдань рішення яких необхідне для перевірки гіпотез, опису системи та виявлення її властивостей.

Оскільки метою створення математичної моделі каталітичного нейтралізатора є вивчення та опис фізико-хімічних процесів, що відбуваються поза ДВЗ та призводять до зниження рівнів його шкідливих викидів, виділення зв'язків параметрів навколишнього середовища з умовами експлуатації, то модель, в основному, необхідна для вирішення завдань аналізу та синтезу. У коло питань, що підлягають розгляду при моделюванні, входить визначення впливу умов навколишнього середовища на процеси каталітичного очищення газів нейтралізаторами різних схем з різними типами каталізаторів; пошук шляхів зниження гідравлічних опорів нейтралізаторів за збереження високого ступеня очищення газів.

Модель, що описує явища та процеси, що відбуваються у складній системі - каталітичному нейтралізаторі, необхідно вважати динамічною, оскільки ми розглядаємо її у часі процесів каталітичного очищення. Модель має вигляд «сірої скриньки», оскільки частина підсистем відома і описується математичними виразами, а частина - напівемпіричними рівняннями та регресійними залежностями.

При розробці моделі передбачалося, що у процесі розв'язання завдань потрібно з певної сукупності рішень вибирати ті, які забезпечать екстремуми функції, що представляє критерій якості розглянутих рішень. Виходячи з рекомендацій при вирішенні подібних завдань [3, 10], було визнано доцільним оптимізацію здійснювати за допомогою модифікованого стандартного алгоритму з спрямованим конусом і випадковим вибором пробного кроку. Алгоритм є окремим випадком ймовірнісного пошуку. Такий підхід дав можливість вести оптимізацію функції, аналітичне вираження якої від параметрів, що варіюються, повністю невідомо і достатньо лише знати його значення при заданих параметрах; пошуку глобального екстремуму; при малій чутливості до виду оптимізації функції забезпечити працездатність зі збільшенням числа параметрів, що варіюються, і будь-яким комплексом обмежень, що накладаються на величину, одержувану в процесі розрахунку. Як приклад розглянуто багатоступінчастий каталітичний нейтралізатор, представлений на рисунку 3.1.

Особливістю розгляду процесів в каталітичному нейтралізаторі є те, що необхідно враховувати одночасно процеси розширення і тепловіддачі газів, проходження газів через шари фільтра і пористі стінки, процеси окислення і відновлення, раптового звуження потоку газів. Всі ці особливості враховані в описаних математичних моделях [11].

Виходячи з існуючих уявлень про газову динаміку та каталіз, побудована модель ламінарно-дифузійного процесу нейтралізатора, представлена на рисунку 3.2.

Відповідно до моделі каталітичний нейтралізатор розбивається на сім зон, що дають уявлення про протікаючі процеси. При збільшенні числа ступенів кількість зон може збільшитися. У першій зоні в трубі відбувається охолодження ВГ, що йдуть від вихлопного колектора ДВЗ. Тут спостерігається активний теплообмін, інтенсивність якого залежить від наявності теплової ізоляції та температури навколишнього середовища.

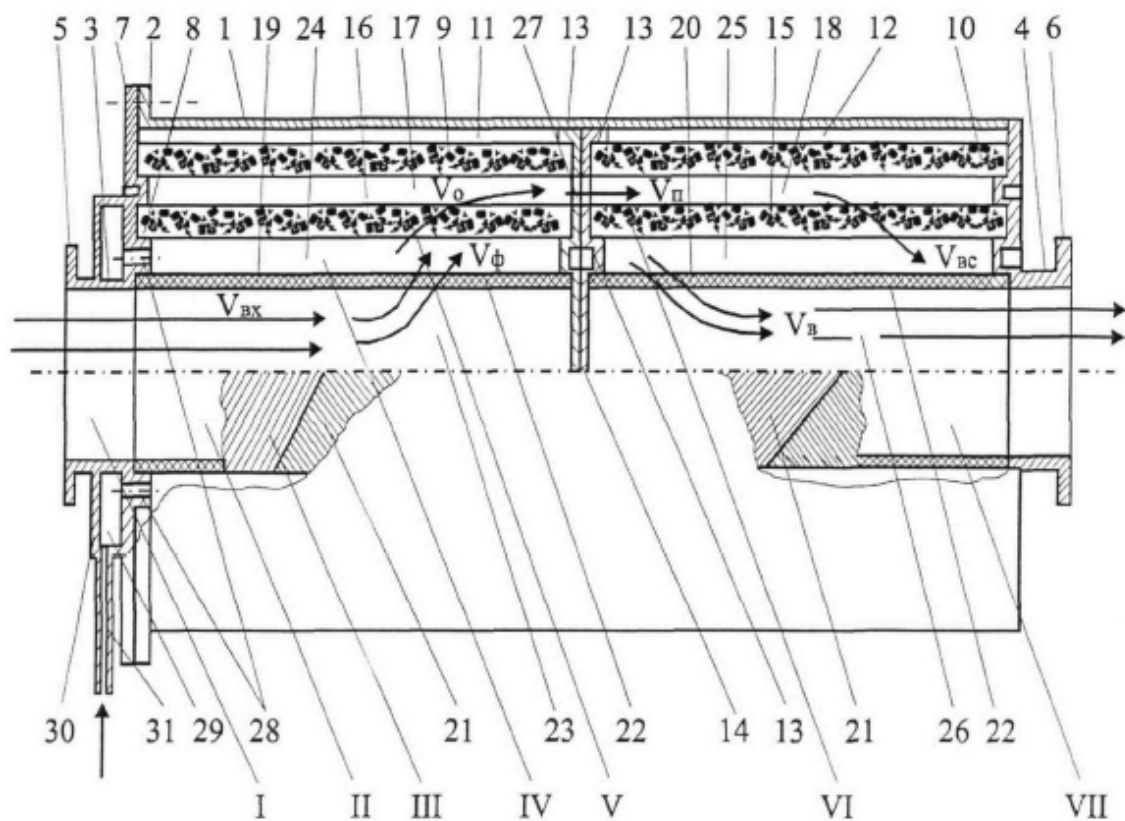


Рисунок 3.1 – Схема багатоступінчастого каталітичного найтралізатора:
 1 – корпус; 2, 5 і 6 – фланці; 3 – вхідний патрубок; 4 – вихідний патрубок;
 7 – торцева кришка; 8 – направляючі бурти; 9 і 10 – пористі металокерамічні
 окисно-відновлювальні блоки; 11 і 12 – кільцеві порожнини; 13 – бурти;
 14 – внутрішня перегородка; 15 – металокерамічний відновлювальний блок;
 16 – металокерамічний окисний блок; 17 і 18 – кільцеві порожнини;
 19 і 20 – фільтри; 21 – композитні вуглецеві нитки; 22 – сітчастий каркас;
 23 – приймальна порожнина; 24 – порожнина вигорання сажі; 25 – порожнина
 допалювання сажі; 26 – вихідна порожнина; 27 – вікно; 28 – канал;
 29 – внутрішня порожнина; 30 – колектор; 31 – канал підведення допоміжного
 газу; $V_{вх}$, $V_{ф}$, $V_{в}$, $V_{п}$, $V_{вс}$, $V_{о}$ – швидкості газу; I, II, III, IV, V, VI, VII – зони
 нейтралізатора.

Друга зона – виходу з труби та входу в КН характеризується розширенням газів. Тут може відбуватися охолодження газів на режимах пуску та прогріву та виділення тепла у разі високих температур, окислення продуктів неповного згоряння при надлишку кисню. Як правило, в КН без теплоізоляції реакторів у цій зоні спостерігається падіння тиску $P_{вг}$ і температури $T_{вг}$, практично не змінюється вміст в ВГ сажі C_pH_m , CO , CO_2 , O_2 , H_2O і NO_x .

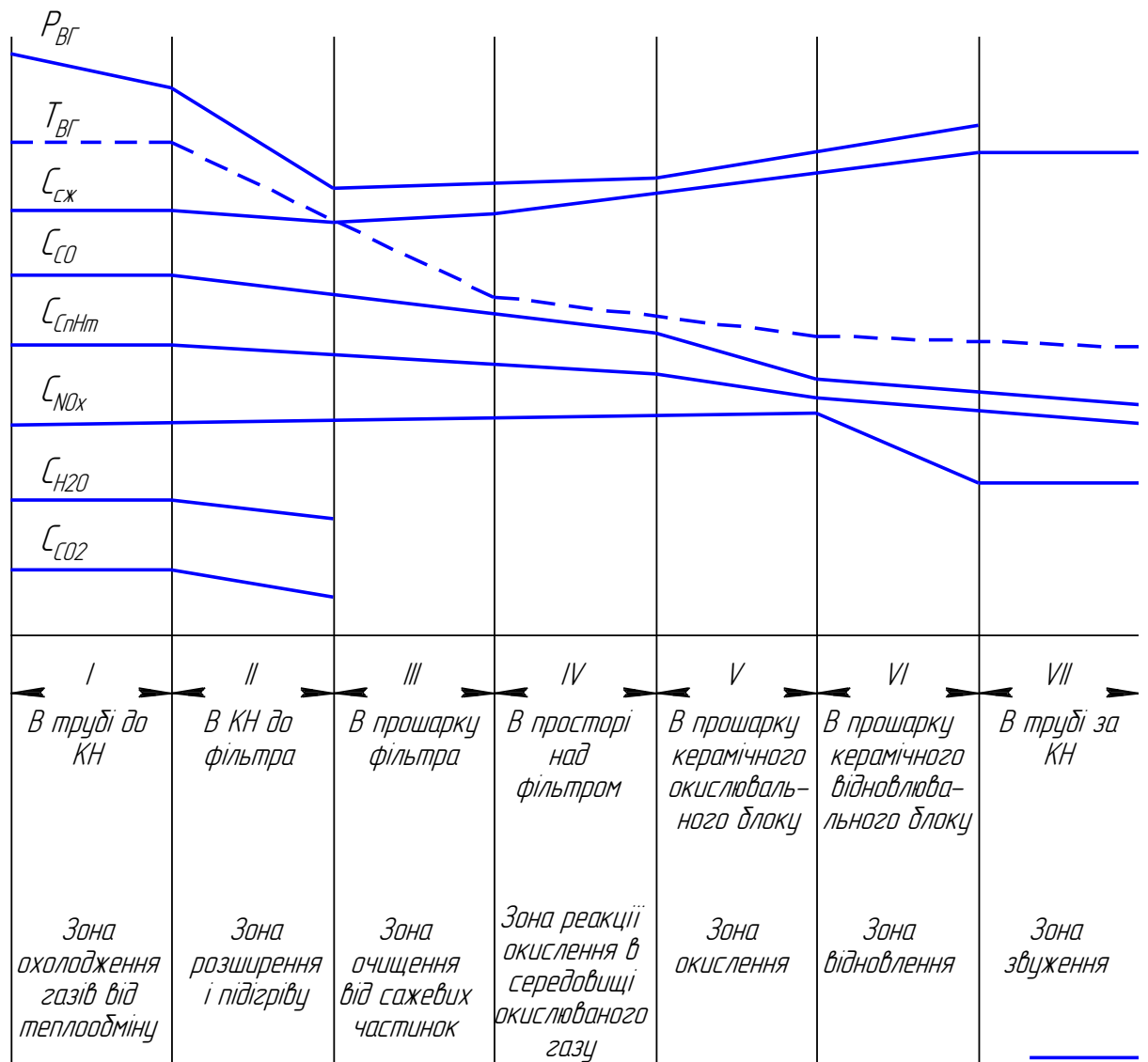


Рисунок 3.2 – Модель ламінарно-дифузійних процесів у багатоступінчастому каталітичному нейтралізаторі.

Третя зона – очищення ВГ від твердих частинок у шарі фільтра. Відбувається зростання тиску, падіння швидкості ВГ, може спостерігатися зростання температури внаслідок окислювальних процесів.

Четверта зона є окислювальною, де в умовах підведення окислювача відбувається доокислення продуктів неповного згоряння: CO до CO₂, сажі до CO, вуглеводнів - до CO, CO₂ і H₂O, при цьому температура T_{вг} підвищується.

У четвертій зоні вигоряє сажа, доокислюються продукти неповного згоряння і лише вміст оксидів азоту в ВГ залишається незмінним. У п'ятій зоні відбувається процес окислення у шарі керамічного окисного блоку.

Шоста зона є ступенем відновлення оксидів азоту в середовищі з нестачею кисню в присутності каталізатора відновного типу. Спостерігається підвищення $P_{вг}$ через гідравлічний опір каталізатора, зниження концентрацій оксидів азоту.

У сьомій зоні - трубі за КН відбувається звуження потоку ВГ, зростання $P_{вг}$ зниження $T_{вг}$ через посилений тепловідвід від труби. Хімічних перетворень у складі ВГ практично немає.

Роль математичної моделі полягає не лише у вивченні процесів, а й прискоренні підбору каталітичних ступенів очищення з прийнятними гідравлічними опорами для досягнення певної мети – зниження шкідливих викидів із ВГ ДВЗ.

Розрахунок параметрів каталітичних нейтралізаторів проведено за формулами та у порядку визначеному розрахунку. Значення прийнятих констант та параметрів представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення констант в розрахунку нейтралізатора.

№	Найменування показника	Позначення в алгоритмі	Розмірність	Значення констант
1	2	3	4	5
1	Показник адіабати для повітря	K_v		1,4
2	Прискорення сили тяжіння	g	м/с^2	9,81
3	Газова постійна для повітря	R_0	$\text{Дж/кмоль} \cdot \text{град}$	287,0
4	Час перебування в прошарку каталізатора	τ_n	С	$4,6 \cdot 10^{-2}$
5	Середній діаметр сажової частинки	$d_{сч}$	Нм	20
6	Середній радіус пори каталізатора	χ	Мкм	150
7	Питома маса ВГ при $T=273 \text{ К}$	$\gamma_{вг}$	кг/м^3	1,24
8	Питома маса каталізатора	γ_k	кг/м^3	2,4
9	Динамічна в'язкість ВГ при $T=273 \text{ К}$	μ_o	кгс/м^2	$1,5 \cdot 10^{-6}$
10	Постійна для відпрацьованих газів	C_r	-	173
11	Число Шмідта	S_c	-	0,78
12	Тиск навколишнього середовища	P_o	МПа	0,1
13	Температура навколишнього середовища	T_o	К	298

Продовження таблиці 3.1.

1	2	3	4	5
14	Вологість навколишнього середовища	W_o	%	50,0
15	Теоретично необхідна кількість повітря для спалювання 1 кг палива	I_o	кгв/кгт	14,45
16	Відносний склад палива: вуглець водень кисень	C H O	- - -	0,87 0,126 0,04
17	Найнижча теплота згоряння палива	H_u	МДж/кг	42,5
18	Теоретично необхідна кількість повітря для спалювання 1 кг палива	L_o	кмоль/кг	0,499

Розрахунок йде на ефективність зниження шкідливих викидів шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь, що описують кінетику перетворення токсичних речовин у нейтралізаторі.

Важливе значення під час розрахунків має вибір констант. До константів було віднесено значення умов навколишнього середовища, характеристики палива, характеристики ДВЗ та окремі характеристики каталітичних елементів, отримані при попередніх розрахунках.

У таблиці 3.2 і 3.3 наведено параметри ДВЗ прийняті при розрахунку каталітичних нейтралізаторів, а також результати розрахунків нейтралізаторів.

Таблиця 3.2 – Параметри дизелів прийняті при розрахунку нейтралізаторів

№	Параметри	Позначення	Розмірність	Тип дизеля	
				Д-440	Д-461
1	2	3	4	5	6
1	Повний робочий об'єм	$i \cdot V_n$	л	7,44	11,16
2	Кількість циліндрів	i	шт.	4	6
3	Номінальна потужність дизеля	N	кВт	75,4	125,6
4	Годинна витрата палива	G	кг/год	17,34	29,3
5	Годинна витрата повітря	V	м ³ /год	561,0	714,0
6	Коефіцієнт надлишку повітря	α	-	1,47	1,750

Продовження таблиці 3.2.

1	2	3	4	5	6
7	Тиск наддувного повітря	P_k	МПа	0,156	0,1813
8	Температура наддувного повітря	T_k	К	373,0	375,0
9	Частота обертання вала	n	хв.^{-1}	1750	1700

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку параметрів нейтралізатора

№	Параметри	Позначення	Розмірність	Тип дизеля	
				Д-440	Д-461
1	Середня швидкість газів в прошарку	u	м/с	1,00	1,00
2	Пористість каталізатора	n_k	-	0,37	0,37
3	Довжина прошарку каталізатора	l_k	м	0,14	0,14
4	Діаметр гранул каталізатора	d_k	м	0,005	0,005
5	Об'єм каталізатора	$V_{\text{кат}}$	м^3	0,0051	0,0064
6	Площа отворів решітки	F_p	см^2	31,80	39,90

Температура в реакторі нейтралізатора, що формує швидкості реакцій, визначається з наступного виразу:

$$T_p = T_{\text{вх}} + (M_{\text{ВГ}} ((Q_{\text{CO}} \cdot (C_{\text{CO}}^{\text{ВХ}} - C_{\text{CO}}^{\text{ВИХ}}) + Q_{\text{сж}} (C_{\text{сж}}^{\text{ВХ}} - C_{\text{сж}}^{\text{ВИХ}}) + Q_{\text{CH}} (C_{\text{CH}}^{\text{ВХ}} - C_{\text{CH}}^{\text{ВИХ}})) - (dQ_w / dt)) / c_p \cdot M_{\text{ВГ}}, \quad K, \quad (4.5)$$

де $T_{\text{вх}}$ – температура на вході в КН, К;

Q_{CO} , $Q_{\text{сж}}$, Q_{CH} – теплота згоряння CO, сажі, C_nH_m відповідно, кДж;

$C_{\text{CO}}^{\text{ВИХ}}$, $C_{\text{сж}}^{\text{ВХ}}$, $C_{\text{CH}}^{\text{ВИХ}}$ – концентрація сажі, CO, C_nH_m на виході з реактора КН;

C_p – теплоємність газів при постійному тиску ВГ дизелів;

$M_{\text{ВГ}}$ – кількість молей ВГ;

τ_p – час знаходження газу в реакторі, с.

В свою чергу:

$$c_p = P / RT, \text{ кмоль/м}^3; M_{\text{ВГ}} = w_p \cdot \rho / \mu; \tau_p = W_p / V_{\text{ВГ}};$$

$$dQ_w / dt = d_r \cdot F_p (T - T_w) \cdot 10^3, \text{ кДж/с}; \alpha_T - \text{Вт/м}^2\text{с}.$$

Основними реагуючими компонентами в реакторі каталітичного нейтралізатора є: CO, CO₂, H₂O, O₂, N₂, NO, NH₃, сажа, C_nH_m. Швидкість реакції визначаємо за виразами:

$$R_{+1} = K_{+1} \cdot C_{CO}^{0,7}; \quad (3.6)$$

$$R_{+3} = K_{+3} \cdot C_{CO} \cdot C_{H_2O}; \quad (3.7)$$

$$R_{-3} = K_{-3} \cdot C_{CO_2} \cdot C_{H_2}; \quad (3.8)$$

$$R_{+4} = K_{+4} \cdot C_{NO} \cdot C_{CO}; \quad (3.9)$$

$$R_{-4} = K_{-4} \cdot C_{N_2}^{0,5} \cdot C_{CO_2}; \quad (3.10)$$

$$R_{+9} = K_{+9} \cdot C_{сж} \cdot F_{ПП} : j_{сж} \cdot C_{O_2} \cdot P_{O_2}; \quad (3.11)$$

$$R_{+10} = K_{+10} \cdot C_{сж} \cdot F_{ПП} \cdot j_{сж} \cdot P_{H_2O}; \quad (3.12)$$

$$R_{+12} = K_{+12} \cdot C_{сж} \cdot F_{ПП} \cdot j_{сж} \cdot P_H, \quad (3.13)$$

де $C_{сж}$ - концентрація сажі, г/м³;

$F_{ПП}$ - питома поверхня сажі, м²/г;

$j_{сж}$ - швидкість осадження сажі, г/м²с;

P_{O_2} , P_{H_2O} , P_H - парціальний тиск.

В свою чергу:

$$j_{сж} = K_{сж} \cdot \exp - E / RT \cdot P_{O_2}.$$

Зміна змісту CO, C_nH_m, CO₂, H₂O, O₂, H₂, N₂, NO, NH₃ сажі по часу перебування в реакторі описуємо кінетичним рівнянням:

$$(dCO / d\tau)_{\Sigma} = -R_{-1} - R_{+3} + R_{-3} - R_{+4} + R_{-4} + (1/6)R_{+9} + R_{-10} + 2R_{+12}; \quad (3.14)$$

$$(dC_n H_m / d\tau)_{\Sigma} = R_{+2}; \text{ де } R_{+2} = K_{-2}^C C_n H_m \cdot C_{O_2}^{0,2}; \quad (3.15)$$

$$(dO_2 / d\tau)_{\Sigma} = -0,5R_{+1} - (x + 0,25y)R_{+2}^{-1,25}R_{+6} - (1/12)R_{-9} - R_{-11}; \quad (3.16)$$

де $R_{+6} = K_{+6}^C H_3 \cdot C_{O_2}^{1,25}$; $R_{+8} = K_{+8} C_{сж} F_{ПП} \cdot J_C \cdot C_{O_2}$; $R_{+11} = K_{+11} C_{H_2} \cdot C_{O_2}$.

$$(dCO_2 / d\tau)_{\Sigma} = R_{+1} + R_{-3} + R_{+4} + R_{+8} - R_{-8} - R_{+12} - R_{-3} - R_{-4}; \quad (3.17)$$

$$(dH_2O / d\tau)_{\Sigma} = R_{-3} + R_{-5} + R_{+6} + R_{+7} + R_{-10} + R_{+11}; \quad (3.18)$$

де $R_{-8} = K_{-8}^C CO_2$; $R_{+5} = K_{+5}^{C2,5} H_2 C_{NO}$; $R_{+7} = K_{+7}^C H_2 C_{NO}$; $R_{+12} = K_{+12}^{C2} CO$;

$$R_{-10} = K_{-10}^C CO^C H_2.$$

$$(dH_2 / d\tau)_{\Sigma} = R_{+3} + R_{-5} + R_{-7} + R_{+10}; \quad (3.19)$$

$$\text{де } R_{-5} = K_{-5}^C NH_3^C H_2 O; R_{-7} = K_{-7}^C H_2 OC_{N_2}^{0,5}.$$

$$(dNO / d\tau)_{\Sigma} = R_{-4} + R_{-5} + R_{-6} + R_{-7}; \quad (3.20)$$

$$\text{де } R_{-5} = K_{-5}^C NH_3^C H_2 O; R_{-7} = K_{-7}^C H_2 OC_{N_2}^{0,5}.$$

$$(dN_2 / d\tau)_{\Sigma} = R_{+4} + R_{+7}; \quad (3.21)$$

$$(dNH_3 / d\tau)_{\Sigma} = R_{+5} + R_{-6}; \quad (3.22)$$

$$\text{де } R_{-6} = K_{-6}^C NO^C H_2 O.$$

$$(dC_{\text{сж}} / d\tau)_{\Sigma} = R_{-7} + R_{-9} + R_{-10} + R_{-12}; \quad (3.23)$$

$$\text{де } R_{-9} = K_{-9}^C CO.$$

В основі реакцій, що протікають на каталізаторах, лежать процеси автоматизації та іонізації кисню, після чого його здатність хімічно взаємодіяти з CO та $C_n H_m$ зростає.

Кінетика окислення CO в умовах, типових для ВГ автомобільного двигуна, може бути описана такими рівняннями.

На окисних каталізаторах:

$$d(CO) / dt = -k_1 (CO)^{0,7}. \quad (3.24)$$

На платинових каталізаторах при малих ступенях перетворення CO:

$$d(CO) / dt = -k_2 (O_2 / CO). \quad (3.25)$$

при високих ступенях перетворення (80%):

$$d(CO) / dt = -k_3 (CO)^{0,5}. \quad (3.26)$$

Константи k_1 , k_2 , k_3 визначаються в першу чергу природою каталізатора, вмістом води і в меншій мірі концентрацією вуглеводнів в реакційній суміші, які впливають на адсорбцію реагентів на поверхні каталізатора. Платино-палладієві каталізатори більш чутливі до води та вуглеводнів у потоці ВГ, ніж каталізатори на основі перехідних металів. Встановлено, що за наявності

оксиду азоту в реакційній суміші помітно знижується активність платинових каталізаторів реакції окислення оксиду вуглецю.

Швидкість окислення вуглеводнів в загальному випадку описується рівнянням:

$$\frac{d(C_n H_m)}{dt} = -k_4 (C_n H_m)(O_2)^{0,2}. \quad (3.27)$$

Константи k_1 , k_2 , k_3 , k_4 можуть бути розраховані з виразу:

$$k = k_{сж} \cdot [-\exp(E/R)].$$

Значення енергії активації E та $\lg KV_0$ наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Константи реакції окислення водню та оксиду вуглецю для деяких каталізаторів.

Компонент ВГ		CO		C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	Ізобутан C ₄ H ₈
Енергія активації, ккал/моль.	Pt	18,1	-	12,4	-	17,0	22,6
	Pd	-	-	28,2	26,6	36,3	33,4
	CuO	-	24,5	26,1	24,5	28,7	-
	NiO	-	-	27,6	26,3	26,2	24,8
	Cr ₂ O ₃	-	-	28,0	27,7	21,9	30,9
lgKV ₀	Pt	7,89	-	1,26	-	1,39	5,58
	Pd	-	-	7,94	5,95	6,89	10,14
	CuO	-	10,27	6,83	4,12	3,68	-
	NiO	-	-	6,25	4,05	1,68	2,02
	Cr ₂ O ₃	-	-	6,82	5,13	1,47	5,15
Інтервал температур, °C		200...55 0	200...40 0	140...20 0	175...30 0	220...34 0	100...30 0

Розглядаючи нейтралізацію NO_x на каталізаторах, слід враховувати, що CO і водень взаємодіють з киснем із вищою швидкістю, ніж з NO_x. Тому для збереження в газовому потоці достатньої для нейтралізації NO_x, кількості цих відновників склад ВГ, що поступає в каталізатор, повинен бути слабовідновним або близьким до нейтрального.

Використовуючи тонке регулювання складу газів, що надходять на каталізатор по кисню, можна домогтися ефективної нейтралізації трьох основних токсичних компонентів. При зміні в даному випадку коефіцієнта

надлишку повітря (α) в діапазоні 0,97...0,98 ступінь перетворення для трьох токсичних компонентів ВГ двигуна перевищує 80 %.

Залежно від здатності ініціювати ті чи інші реакції, каталізатори умовно ділять на окислювальні, відновлювальні, трикомпонентні або біфункціональні. Наведена класифікація є умовною. Фактично, всіх каталізаторах відбуваються окислювально-відновні процеси. У більшості випадків один і той же каталізатор в залежності від складу газового потоку, в першу чергу від вмісту кисню, може бути окислювальним, відновним або трикомпонентним. При віднесенні каталізатора до того чи іншого типу зазвичай враховується його ефективність основної реакції нейтралізації конкретного токсичного компонента і здатність надійно працювати в заданому діапазоні зміни параметрів газового потоку.

Крім згаданих вище процесів на каталізаторі може протікати ряд побічних реакцій, в результаті яких утворюються сполуки або проміжні продукти, що є самостійною небезпекою для навколишнього середовища або істотно знижують ефективність процесу нейтралізації. Найбільш небезпечними з таких сполук є аміак, що утворюється при відновленні оксиду азоту воднем, та сірчаний ангідрид, що виділяється при окисленні двооксиду сірки. При створенні каталізаторів відновлення оксидів азоту, звертається увага на забезпечення переважного перебігу реакцій відновлення у напрямку утворення молекулярного азоту та придушення реакції синтезу аміаку.

Джерелом утворення двооксиду сірки в ВГ є сірка, що міститься в паливі та мастилах. В залежності від умов очищення нафтопродуктів вміст сірки у паливі може досягати 0,3 % за масою. У присутності кисню двооксид сірки окислюється на каталізаторі до триоксиду, який, взаємодіючи з парами води, утворює аерозолі сірчаної кислоти. За наявності каталізатора в сірчану кислоту переходить від 3 до 40 % сірки, що міститься в паливі, за відсутності нейтралізаторів кількість сірки, що окислюється до сірчаного ангідриду, не перевищує 2 %.

Виходячи з кількості виділеного при реакціях тепла каталітичні нейтралізатори можуть бути поділені на так звані ізотермні, що використовуються для очищення ВГ з малою теплотою згоряння (зокрема, дизелів), і адіабатні, що застосовуються при перетворенні ВГ бензинового двигуна. В останньому випадку на каталізаторі обробляються гази з високим вмістом продуктів згоряння, а отже і великою теплотою згоряння.

3.2. Вибір основних параметрів активної зони нейтралізаторів.

Ефективність роботи нейтралізаторів, його масові та габаритні показники, створюваний їм протитиск випуску, прямо пов'язаний з погіршенням економічних показників двигуна, залежать в основному від характеру перебігу газодинамічних процесів та масообміну [13].

Вище було показано, що при виникненні зони «запалювання» загальну швидкість хімічних перетворень можна без великої похибки прийняти рівної швидкості масопередачі реагуючого компонента до поверхні каталізатора. Це означає, що розрахунок профілю концентрацій по довжині шару гранульованого каталізатора можна виразити у такий вираз:

$$\frac{c}{c_0} = \exp \left[- \frac{S_v l}{1,38 Sc^{2/3} (Re^{0,41} - 1,5)} \right]. \quad (3.28)$$

Вводячи поняття ступеня очистки $\xi = 1 - c / c_0$ отримаємо:

$$\eta = 1 - \exp \left[- \frac{S_v l}{1,38 Sc^{2/3} (Re^{0,41} - 1,5)} \right]. \quad (3.29)$$

З використанням емпіричних залежностей запропонованих Аером і Тодесом [14] отримаємо:

$$\eta = 1 - \exp \left(- \frac{0,395 S_v l}{Re^{0,36} \cdot Sc^{2/3}} \right). \quad (3.30)$$

В обох формулах Re підраховується по фактичній швидкості газу в каналах каталізатора.

При підрахунку за формулами (3.29) та (3.30) ступінь очищення по отриманих результатах близькі, різницю можна розглядати як наслідок неточності використаних емпіричних залежностей.

Можна показати, що для тих самих пропозицій, які були зроблені при виведенні залежностей (3.29) і (3.30), стосовно нейтралізаторів з блочним каталізатором ступінь очищення:

$$\eta = 1 - \exp(-Eu), \quad (3.31)$$

де число Ейлера: $Eu = \frac{\Delta P}{\rho u^2} = \frac{f_c'}{2d_k}$.

Газодинамічний опір нейтралізатора є однією з найважливіших його характеристик. Зіставленням характеристик масообміну та газодинамічних в кінцевому рахунку і визначається геометрія шару каталізатора, а отже, і його основні параметри.

Повний опір нейтралізатора включає втрати тиску на вході, в активній зоні та на виході:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{акт}} + \Delta P_{\text{вих}}. \quad (3.32)$$

Для більшості реальних конструкцій втрати на вході та виході досить точно можуть бути визначені з виразу:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n f_{c_i} \cdot 0,5 u_i^2 \rho l_i. \quad (3.33)$$

Коефіцієнти місцевого опору визначають за довідковими даними [15]. Коефіцієнт опору в гранульованих шарах різного виду:

$$f_c = \frac{2\Delta P_{dk}}{\rho u^2 l} = f(Re). \quad (3.34)$$

Залежність f_c від Re для гранульованого шару характеризується плавним переходом ламінарної течії до турбулентного. Стабільна ламінарна течія у шарі порушується вже при дуже малих значеннях Re .

Як показали експериментальні дослідження, хороший збіг дослідних даних з розрахунковими досягається при використанні залежності:

$$f_c = \frac{8 \cdot 4,55}{Re} + 0,45.$$

Застосовуючи вказану емпіричну залежність можна визначити опір активної зони нейтралізатора:

$$\Delta P = f_c \left(\frac{S_v l}{\varepsilon^3} \right) \frac{G_\Sigma^2}{2q^2 \rho}.$$

Для частинок сферичної форми питома поверхня може бути обчислена з виразу:

$$S_v = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_k}.$$

Коефіцієнт різниці залежно від виду укладання кульок може змінюватися в межах 0,26-0,476, тому його в кожному конкретному випадку бажано визначати експериментально.

У нейтралізаторах з блочним каталізатором втрати тиску в активній зоні можуть бути досить точно оцінені за такими залежностями:

$$\Delta P = 0,5 f_c \rho u^2,$$

де $f_c = 64/Re$ при $Re < 2300$; $f_c = 0,316/Re^{0,25}$ при $Re > 2300$.

Газодинаміка шару каталізатора є лише одним із факторів, що визначають аеродинамічні характеристики нейтралізатора в цілому. Зокрема, рівномірність розподілу газу поверхнею шару залежить не стільки від абсолютної величини втрати тиску на ньому, скільки від відношення кінетичної енергії потоку газу у вхідній порожнині над реактором до перепаду тиску на шарі. Це повною мірою стосується і вихідної порожнини нейтралізатора.

Аналітичне розв'язання задачі перебігу газів через нейтралізатор можна отримати тільки в одновимірній постановці і з рядом пропозицій, що спрощують, що часто призводить до болючих похибок. Тому, як правило, доведення нейтралізатора проводять експериментально.

Досвід показує, що допустимий ступінь нерівномірності розподілу газу по поверхні нейтралізатора забезпечується, якщо швидкість потоку у вхідному та

вихідному перерізах нейтралізатора обрана досить малою, а перепад тиску на шарі становить не менше 30-40 % загального опору нейтралізатора.

Розподіл потоку газу за вхідним перерізом реактора характеризується коефіцієнтом нерівномірності:

$$k_{\sigma} = \left| 1 - \sqrt{\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P}} \right| 100\%.$$

Як показали випробування, прийнятна для практичних цілей рівномірність розподілу газу досягається, якщо значення k_{σ} не перевищує 20-25 % [22]. Для цього має виконуватися така умова: $(0,5\rho u^2)\Delta P_c < 0,15 \div 0,2$.

З урахуванням цієї умови, а також вимог компактності ступінь розширення вхідного дифузора F_1/F_0 вибирають в межах 2-2,5.

У тому випадку, коли з конструктивних міркувань неможливо забезпечити прийнятний розподіл газу шляхом підбору відповідних швидкостей його потоку на вході в реактор, для поліпшення рівномірності розподілу використовують дефлектори, форму і розташування яких експериментально підбирають.

Теоретичний аналіз та великі експериментальні дослідження дозволяють сформулювати досить прості правила, яких слід дотримуватись при проектуванні каталітичних нейтралізаторів.

Довжина гранульованого шару каталізатора має становити 10-15 діаметрів окремої гранули.

Газодинамічний опір каталітичного шару має бути не менше 40 % загального опору нейтралізатора.

Приведена до нормальних умов швидкість газу по повному передньому перерізу реактора не повинна перевищувати 1 м/с.

Стосовно нейтралізаторів з блочним каталізатором швидкість фільтрації газу за нормальних умов не повинна бути більше 10 м/с, а відношення розміру поперечного перерізу активної зони до довжини шару 1-0,4.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО ПАЛИВА НА ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ.

Відповідно до розв'язуваних задач зміст основних етапів випробувань склали дослідження індикаторного процесу робочого циклу ДВЗ при використанні багатокompонентного палива, вплив добавок до основного палива на зниження шкідливих речовин в ВГ.

Установки обладнані вимірювальною апаратурою та приладами для випробування ДВЗ згідно з ДСТУ 4276-2004 та дообладналися спеціальною вимірювальною апаратурою, у тому числі для вимірювання димності та токсичності.

Оснащення випробувальних стендів за обсягом і точності вимірювань відповідало вимогам стандартів на випробування дизелів. Вибір типів використовуваної вимірювальної апаратури здійснено з урахуванням відповідності діапазонів вимірювання параметра, що реєструється, і вимірювальної бази приладів з розрахунку досягнення найбільш високої точності вимірювання.

Методика виміру викидів шкідливих речовин у ВГ відповідала вимогам чинних стандартів.

4.1. Експериментальний випробувальний стенд.

Експериментальна установка, призначена для зняття індикаторної діаграми робочого циклу ДВЗ з оцінкою токсичності ВГ з двигуном Д-65. Схема експериментального стенда представлена на рисунку 4.1.

Оснoву установки (рис. 4.1) склали ДВЗ 1, з'єднаний карданним валом 2 з балансируною електромашиною, ваговий механізм 4, вимірювач витрати палива 5, водяна 8 та масляна системи охолодження 9, датчики та прилади обладнання для зняття індикаторної діаграми та оцінки токсичності ВГ. Силова установка підключалася до стендових систем мащення, охолодження, живлення,

завантаження, вентиляції, газовідведення. Стационарні системи мастила та охолодження забезпечували охолодження та контроль рівня охолоджувальної рідини та мастила в самовідвідних системах ДВЗ [19].

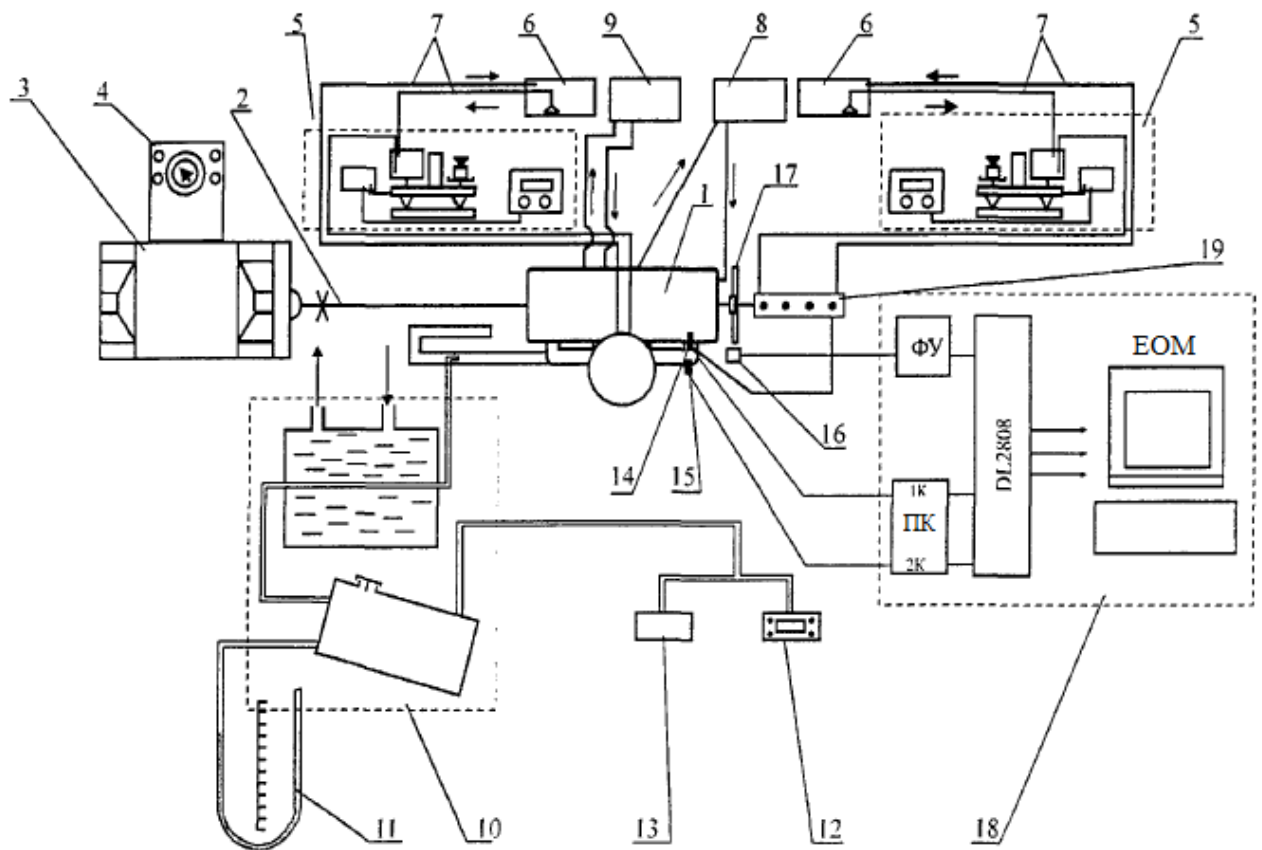


Рисунок 4.1 – Схема випробувального стенду ДВЗ: 1 – ДВЗ; 2 – карданний вал; 3 – балансна електромашина; 4 – ваговий механізм; 5 – вимірювач витрати палива; 6 – паливний бак; 7 – трубопроводи; 8 – водяна система охолодження; 9 – масляна система охолодження; 10 – холодильник; 11 – п'єзометр; 12 – газоаналізатор; 13 – газовідбірний пристрій; 14 – п'єзоелектричний датчик тиску ПД-14; 15 – п'єзоелектричний датчик тиску PDE 500/14-2; 16 – фотодатчик ІФД-05; 17 – фотодиск; 18 – реєструючі прилади та ЕОМ; 19 – ТНВД.

Відповідно до випробувань на установці застосовано подвійну систему живлення, що забезпечує подачу основного палива через штатну систему живлення ДВЗ та альтернативних видів палива, що надходять у циліндр через додаткову систему, таким чином забезпечувалася незалежна подача штатного та альтернативного видів палив. Крім того, системи додатково оснащувалися

масляними та паливними фільтрами, кранами та трубопроводами для промивання систем між серіями випробувань.

До випускного колектора ДВЗ приєднувалась фланцем труба для відведення ВГ до димососа системи вентиляції. На кінці труби встановлювалась заслінка регульована для підтримки необхідного тиску в ній. У трубі виконані люки для встановлення зондів газовідбірників.

Система відбору ВГ для визначення концентрації токсичних речовин (рис. 4.1) складалася з холодильника – 10, п'єзометра – 11, газовідбірного пристрою – 13 та газоаналізатора – 12, відбір ВГ проводився з випускної труби. Після охолодження газу фільтрувалися від сухих домішок та конденсату перед надходженням до газоаналізатора.

Холодильник складався з верхньої ємності, всередині якої трубою проходив газ і охолоджувався проточною водою, і нижньої ємності, в яку надходив газ після охолодження. В останній конденсат і тверді частинки осідали на дні, а очищений газ відводився в газовідвідний пристрій до газоаналізатора. У нижній ємності присутній клапан підтримки тиску на рівні 50...90 мм вод.ст., п'єзометр - 11 для контролю за тиском.

Витрата повітря визначалася за допомогою насадки з вільним входом та ресивера, призначеного для згладжування пульсацій коливань повітря, викликаних роботою циліндрів. Насадка виконана у формі сопла. Визначення витрати повітря здійснювалося за допомогою диференціального манометра по перепаду тиску.

У процесі випробувань використовували третій циліндр ДВЗ. Датчик ПД-14 вимірювання тиску в циліндрі є п'єзоелектричним, генераторного типу. Електричний сигнал генерувався кварцовим п'єзоелементом, що охолоджувався водою. Тиск в циліндрі через мембрану впливав на п'єзоелемент, в якому виникав ЕРС пропорційний тиску в циліндрі, ЕРС підсилювався в п'єзопідсилювачі.

При дослідженні 3 циліндра одночасно реєструвався підйом голки форсунки. Для цього використовувався датчик PDE 500/14-2 ємнісного типу, в

якому під впливом тиску переміщалася пластина конденсатора, що викликало зміну ємності конденсатора, а отже реактивного опору в ланцюзі. Ця зміна посилювалася в ємнісному підсилювачі та подавалася на реєстрацію.

Кут повороту колінчастого валу фіксувався датчиком фотоелектричного типу ІФД-05, для цього використовувався фотодиск, закріплений на колінчастому валу.

Запис електричних сигналів проводився у блоці пам'яті цифрового реєстратора DL2808, що має 8 каналів. Управління блоком пам'яті та обробка результатів здійснювалася на ЕОМ. Персональний комп'ютер збирав та обробляв інформацію.

4.2. Порівняльні дослідження параметрів робочого процесу та аналіз індикаторного ККД при використанні багатокomпонентних палив.

Фізико-хімічні властивості багатокomпонентних палив визначають зміну характеристик паливоподачі, сумішоутворення і згоряння, у зв'язку з чим, важливе значення набуває регулювання двигуна по куту початку подачі палива.

Для проведення моторних випробувань було обрано п'ять типів багатокomпонентних палив: 78, 88 і 93% дизельного палива, що містить, решта складена з етанолу; а також дизельного палива, що містить 85 і 95%, решта доповнювалася водою в необхідній пропорції.

Таблиця 4.1 – Склад багатокomпонентних палив

Тип палива	Вміст ДП, % до об'єму	Вміст присадок етанолу, % до об'єму	Вміст присадок води, % до об'єму
Д78А	78	22	-
Д88А	88	12	-
Д93А	93	7	-
Д85В	85	-	15
Д95В	95	-	5

При приготуванні альтернативних видів палив, що розглядаються в цій магістерській роботі, були використані основи теорії та фізико-хімічна модель змішування спиртових добавок та дизельного палива, описана в третьому

розділі. Після отримання спиртових палив було досліджено їх фізико-хімічні характеристики. Ці дані представлені у таблиці 4.2 [20].

Таблиця 4.2 – Властивості багатокomпонентних палив.

Характеристика палива	Д78А	Д88А	Д93А	Д85В	Д95В	(ДСТУ 7688:2015
1. Елементний склад						
С	0,706	0,766	0,7	0,758	0,730	-
Н	0,128	0,125	0,127	0,125	0,0129	
О	0,166	0,109	0,173	0,117	0,141	
2. Щільність, кг/м ³ (при температурі 20 °С)	818	829	816	825	821	860
3. В'язкість, сст. При 20 °С, мм ² /с	2,78	3,08	2,66	2,97	3,6	3,0...6,0
4. Цитанове число (розрахункове), од.	26	29	25	27	30	не менше 45
5. Прихована теплота випаровування, кДж/кг.	563	550	590	560	526	-
6. Найнижча теплота згорання, Дж/кг.	35300	37600	34900	37300	36400	-
7. Кількість повітря необхідного ждя спалювання 1 кг палива, кг/кг	11,8	12,7	11,7	12,5	12,2	-
8. Теплота згорання 1 кг стехіометричної суміші, МДж/кг	2,99	2,96	2,98	2,98	2,98	-
9. Температура спалаху, °С	18	20	16	19	22	40
10. Випробування на мідній пластинці	Витримує					

Як видно з таблиці 4.2, елементний склад відрізняється зниженням частки вуглецю та значною кількістю кисню. Частка водню зберігається майже

незмінною, відрізняючись від ДП на 0,3 %, тоді як частка кисню збільшена у 45 разів.

Відповідно, знижується теоретично необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг палива. Присутність великої частки кисню зумовлює зниження нижчої теплоти згоряння (до 18 %), що збільшує циклову передачу. Поряд із цим слід враховувати приблизно однакову теплоту згоряння 1 кг стехіометричної суміші, у зв'язку з цим потужність при роботі на багатокomпонентних паливах повинна незначно відрізнятись від потужності при використанні дизельного палива.

Збільшена прихована теплота випаровування визначає зниження температури робочого заряду, що ускладнить займання палива. Цей чинник разом із зниженим цетановим числом збільшить період затримки займання. Для компенсації цього необхідно змінити регулювання паливної апаратури.

Дослідження експериментальних фізико-хімічних властивостей композиційного палива проводилося за допомогою штатної акредитованої лабораторії.

Вимірювання щільності, в'язкості, температури спалаху проводилося згідно з методиками цієї лабораторії. Інші параметри багатокomпонентних палив були отримані розрахунковим шляхом.

Щільність багатокomпонентних палив нижче традиційного (табл. 4.2). Щільність композиції по мірі зменшення вмісту дизпалива зменшується. Зниження щільності палива може викликати збільшення коефіцієнта надлишку повітря, так як паливо дозується за об'ємними показниками і вагова витрата палива виявиться меншою, ніж для ДП.

Спільним для всіх видів розглянутих палив є таке:

- внаслідок великого значення прихованої теплоти випаровування спирту спостерігається зниження температури робочого заряду. Це зниження буде більше, чим збільшиться частка спирту у багатокomпонентному паливі. При цьому слід враховувати, що наводяться середні величини по всьому об'єму камери згоряння. Враховуючи нерівномірність розподілу палива за обсягом КС,

локальне зниження температури в первинних осередках самозаймання, збагачених паливом, буде набагато вищим.

- через невисоке цетанове число спирту зменшується загальне цетанове число багатокomпонентного палива. Цетанове число буде нижчим, чим вища частка спирту. Все це призводить до значного зростання періоду затримки самозаймання.

Таким чином, ці два фактори – зниження температури заряду та збільшення періоду індукції, дуже значно впливають на робочий процес. Сукупність даних факторів може призвести до явища незаймання суміші.

Таким чином, для визначення оптимального складу багатокomпонентного палива необхідно враховувати такі фактори:

1. Необхідність заміщення якомога більшої кількості дорожчого дизпалива.

2. Необхідно враховувати можливість незаймистості суміші. Проведені розрахункові дослідження показують, що із застосуванням вищих спиртів (що мають більше атомів вуглецю в молекулі) можливе заміщення більш значних кількостей дизпалива.

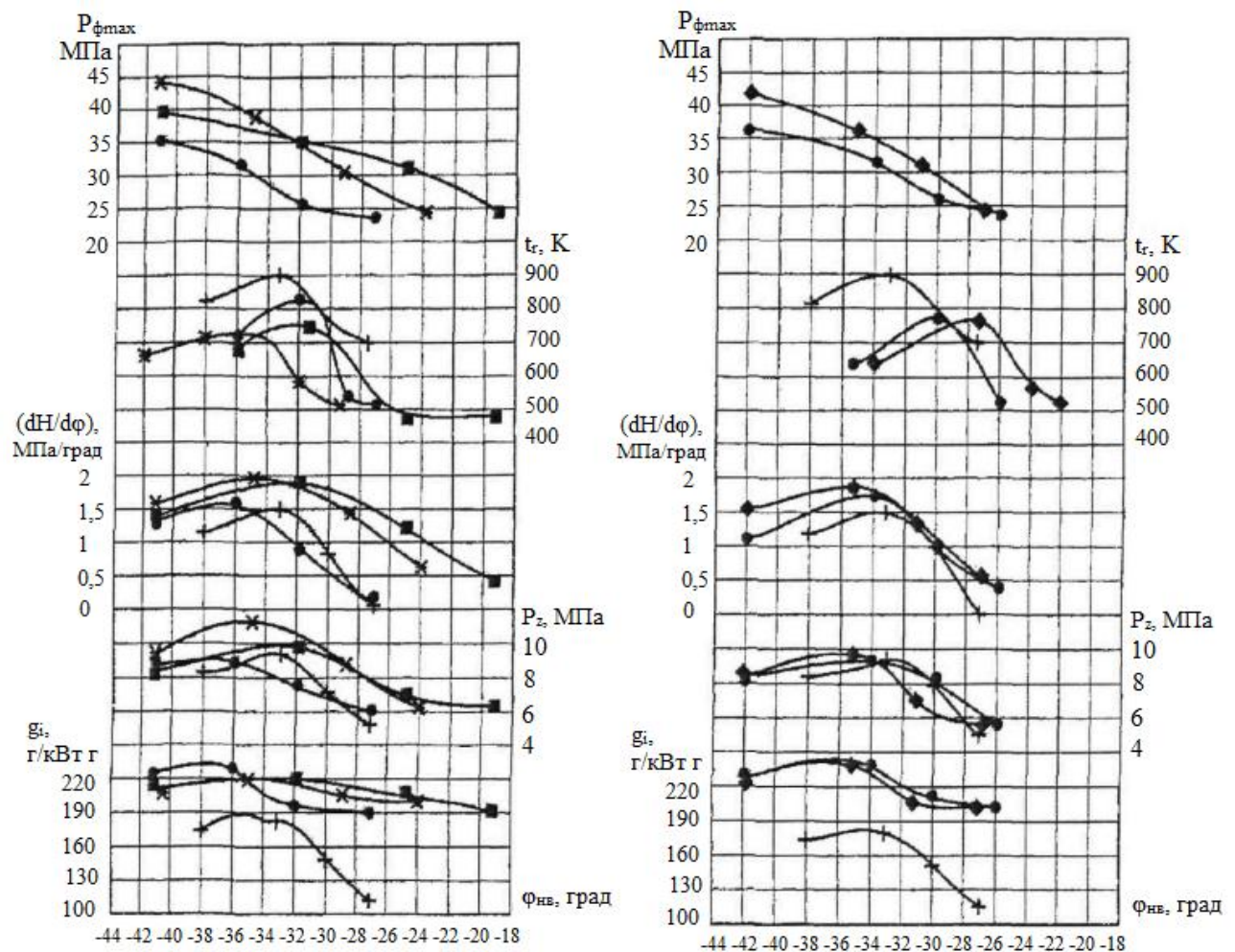
Інший несприятливий фактор, що виникає в міру зменшення частки ДП у багатокomпонентному паливі – зміна механічної та теплової навантаженості деталей ЦПГ.

Розрахункове та експериментальне дослідження робочого процесу дизеля при використанні багатокomпонентних палив проводилося для порівняльної оцінки параметрів робочого процесу двигуна та зіставлення з параметрами робочого циклу при використанні стандартного дизельного палива. Результати цього дослідження, крім перевірки адекватності моделі, дозволяють виявити можливості економії дизельного палива та зниження емісії токсичних компонентів з ВГ.

Для багатокomпонентних палив, як згадано вище, характерна велика величина енергії пароутворення, менше цетанове число, наявність кисню в молекулах палива. Усі ці чинники значно змінюють характер перебігу процесу тепловиділення.

На рисунку 4.2 представлена характеристика дизеля за кутом початку подачі палива. В експериментальному дослідженні після проведення регулювальних випробувань було прийнято такі кути початку подачі палива:

- для багатокomпонентних палив Д78А, Д88А - 27 град, п.к.в. до ВМТ; для палива Д93А – 26 град, п.к.в. до ВМТ; для палива Д85В – 19 град, п.к.в. до ВМТ; для палива Д95В – 28 град, п.к.в. до ВМТ;
- для дизельного палива (Д) – 24 град, п.к.в. до ВМТ.



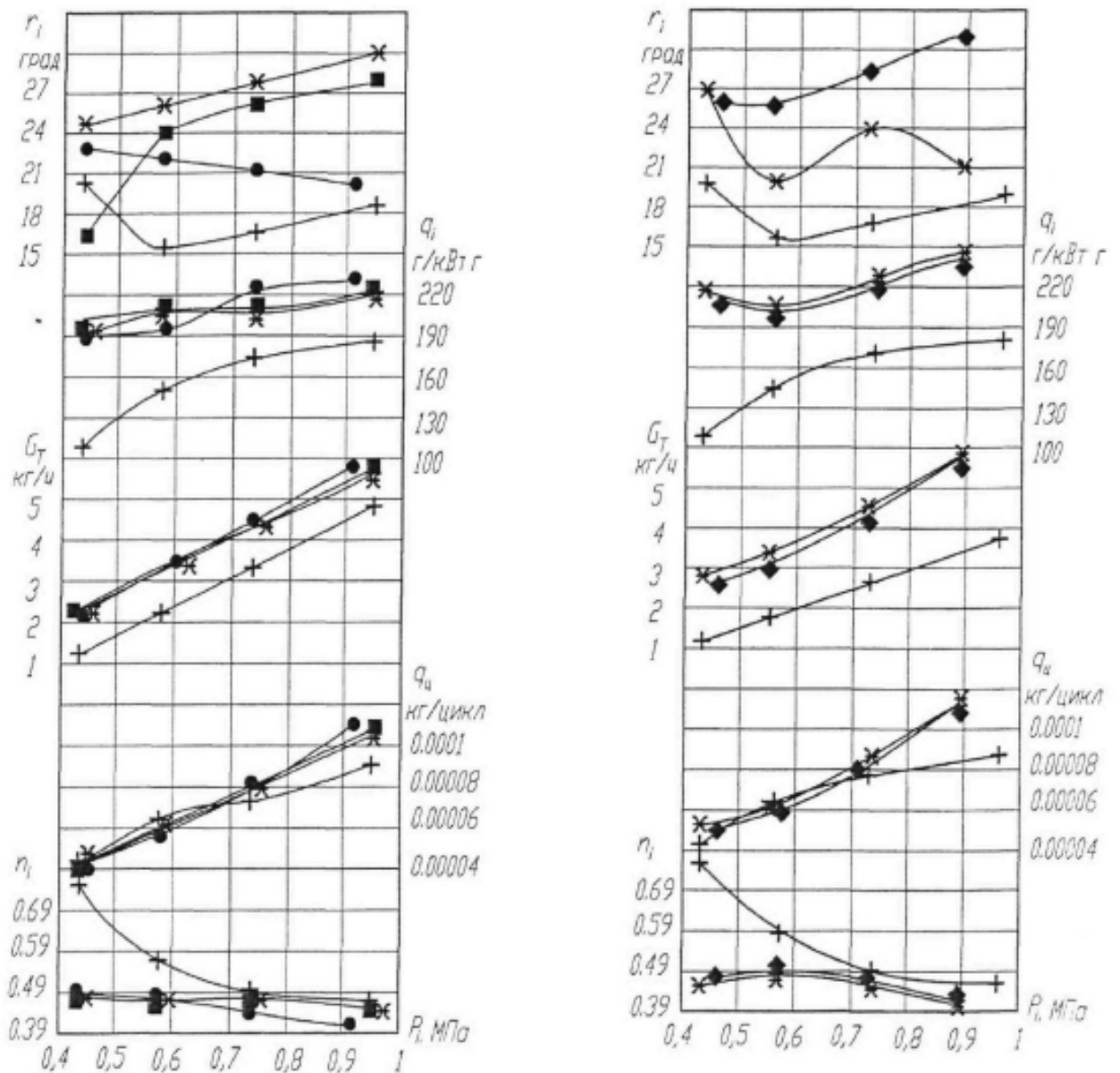
Паливо: × - Д, ■ – Д78А,
* - Д88А, ● – Д95А.

Паливо: × - Д, ● – Д85В,
◆ – Д95В.

Рисунок 4.2 – Характеристика дизеля Д-65 по куту початку подачі палива при $P_i=0,95$ МПа; $n=1750$ хв⁻¹.

З рисунка 4.3 видно, що підвищена питома витрата палива (g_i) пояснюється меншою теплотою згоряння багатокomпонентних палив, але порівнюючи економічність процесу можна побачити, що η_i змінюється в невеликих межах і

дорівнює індикаторному ККД при використанні дизельного палива. Лише при використанні багатокomпонентного палива Д78А η_i зменшується на 6 %.

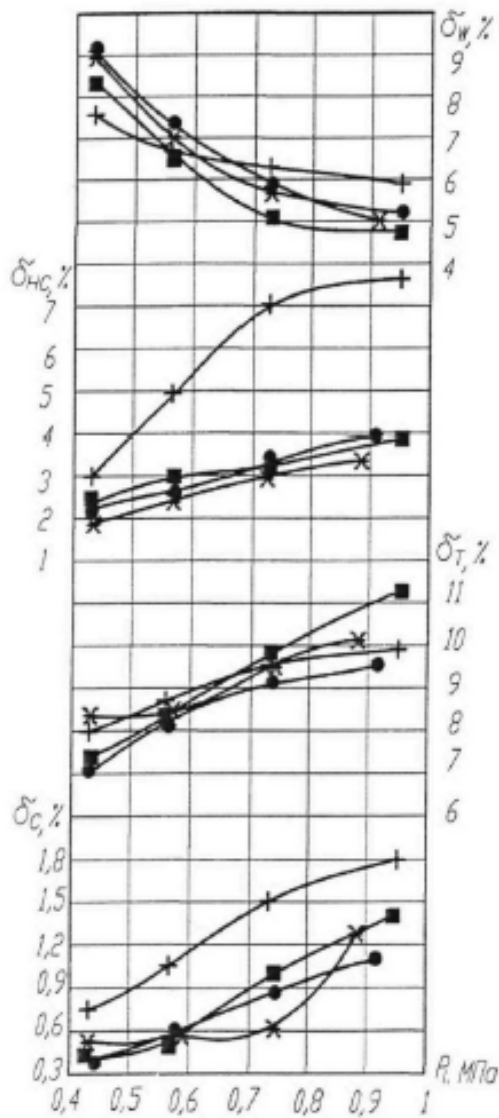


Паливо: $\times$ - D, $\blacksquare$ - D78A,
* - D88A, $\bullet$ - D95A.

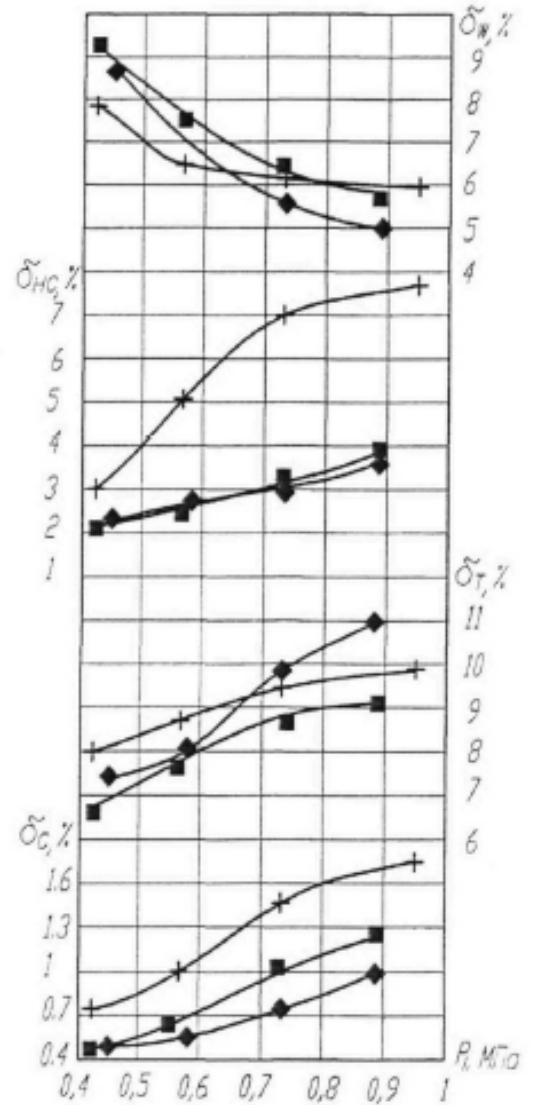
Паливо: $\times$ - D, $\bullet$ - D85B,
 $\blacklozenge$ - D95B.

Рисунок 4.3 – Навантажувальна характеристика: дизель Д-65; $n=1750$ хв⁻¹.

Зростання величини 1^{го} максимуму тепловиділення та дуже близьке розташування до ВМТ зменшує несвоєчасність введення тепла, але збільшує частку тепла, відведеного від РТ у районі ВМТ, а отже, збільшується коефіцієнт. Загальний перерозподіл складових невикористання теплоти зображено на рисунку 4.4.



Паливо: × - D, ■ - D78A,
* - D88A, ● - D95A.



Паливо: × - D, ■ - D85B,
♦ - D95B.

Рисунок 4.4 Залежність складових невикористання теплоти; навантажувальна характеристика; дизель Д-65; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$.

Зміна елементного складу багатокomпонентних палив, збільшення частки кисню та зниження частки вуглеводню викликають зменшення частки невикористання теплоти внаслідок зміни складу. Збільшена температура згоряння визначає підвищення втрати тепла в циклі через змінність теплоємності у функції температури. Таким чином, виходячи з рисунку 4.4, перерозподіл статей невикористання теплоти дозволяє (як показано на рис. 4.3 залишити індикаторний ККД незмінним або проявляється незначне, на 1-2 % відхилення).

Для порівняння розрахункових та експериментальних даних представлений приклад зіставлення результатів для палива Д88А (рисунок 4.5).

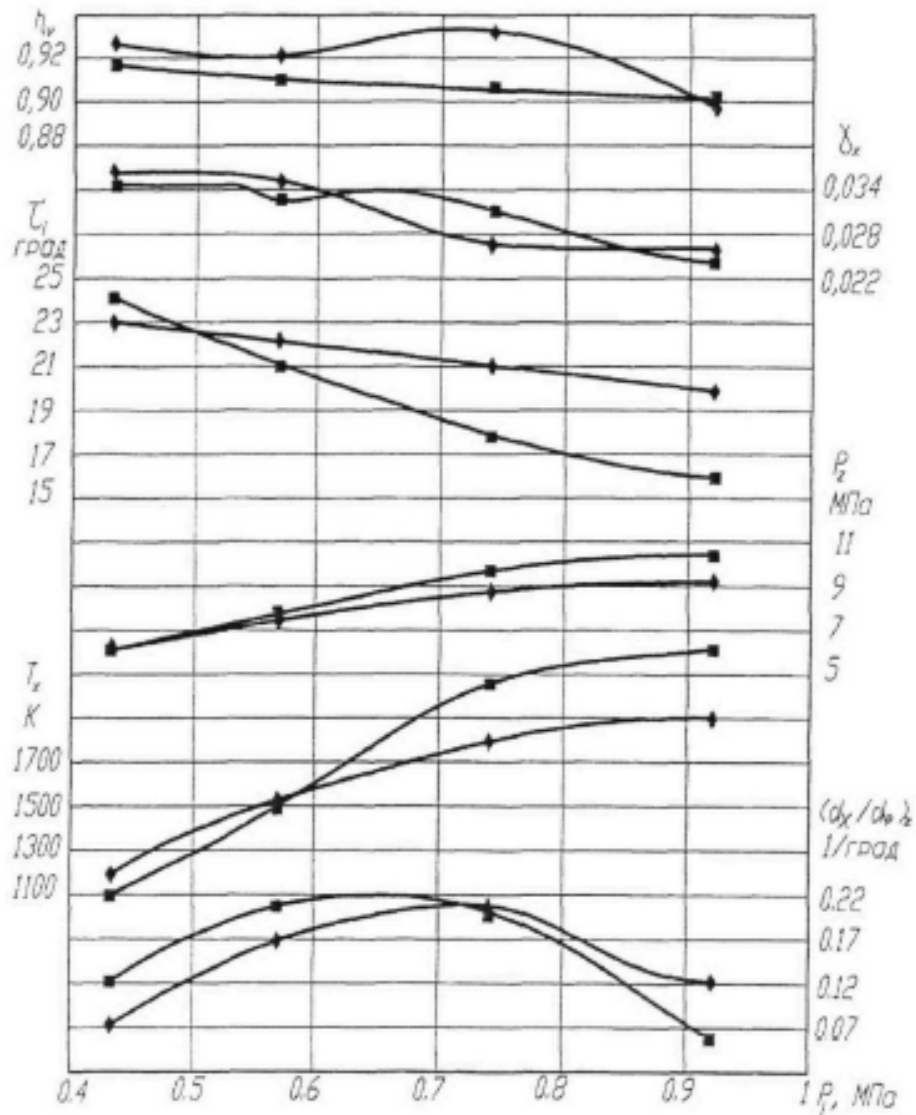


Рисунок 4.5 – Навантажувальна характеристика – багатокomпонентного палива Д88А; дизель Д-65; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$.

З рисунка 4.5 видно, що різниця між результатами розрахункового та експериментального дослідження не перевищує 10 % похибки. Виходячи з цього, можна відзначити, що описана модель робочого процесу перевірялася за результатами експериментальних досліджень і повною мірою відповідає вимогам, і може бути рекомендована до застосування на практиці.

4.3. Дослідження екологічних показників ДВЗ при роботі на багатокomпонентних паливах.

Екологічні властивості багатопаливних дизелів, що працюють на різних паливах, визначаються двома основними факторами: підвищеним шумом роботи двигуна і токсичністю його ВГ. Підвищена шумність двигуна, робота на полегшених паливах, обумовлена збільшенням показників динаміки процесу їх згорання.

Зміна фізико-хімічних властивостей альтернативних палив і процесів, що відбуваються в циліндрі двигуна будуть значно впливати на кількість утворених шкідливих речовин. Відповідно це має відбиватися і в розрахункових методиках.

Для встановлення відповідності механізмів утворення і вигорання сажі і утворення окису азоту в розрахунковій моделі, в експериментальних напрямках були проведені спеціальні експерименти. Були досліджені зміна поточної оптичної температури по куту повороту колінчастого вала і випромінююча здатність продуктів згорання [22].

Дані цих експериментальних досліджень безпосередньо пов'язані з утворенням сажі та оксидів азоту. Утворення оксидів азоту, при відсутності сполук азоту в паливі, носить термічний характер і напряму пов'язано з максимальною температурою циклу.

Ми бачимо помітний збіг характеру зміни температури в циліндрі і концентрації NO_x по куту повороту колінчастого валу дизеля Д-65 при використанні альтернативних багатокomпонентних спиртодизельних палив (рис. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9).

Випромінювальна здатність продуктів згорання пояснюється, перш за все, випромінювальною здатністю частинок сажі.

Таким чином, експериментальні дані дозволяють перевірити адекватність розрахункових методик.

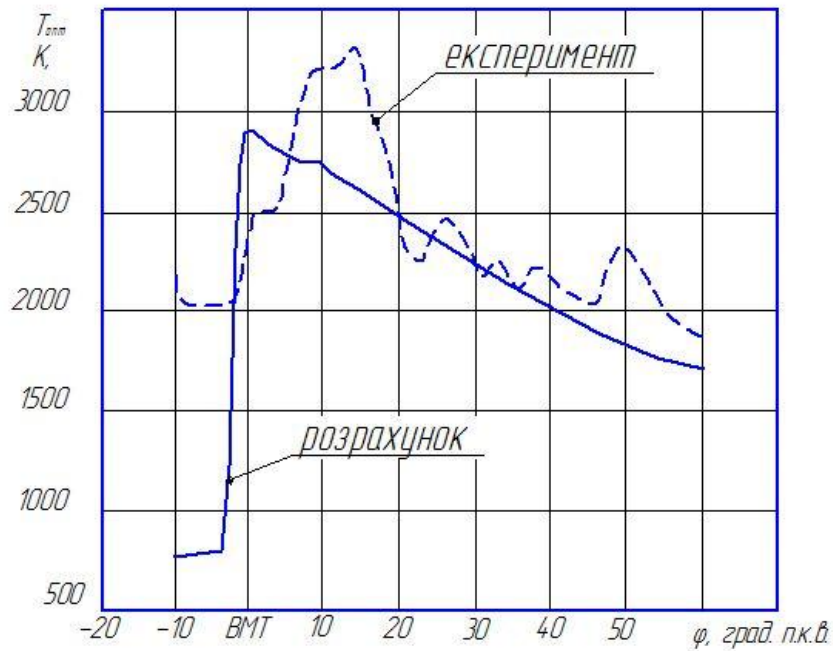


Рисунок 4.6 – Оптична температура палива Д78А при $P_i=0,74$ МПа; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$; дизель Д-65.

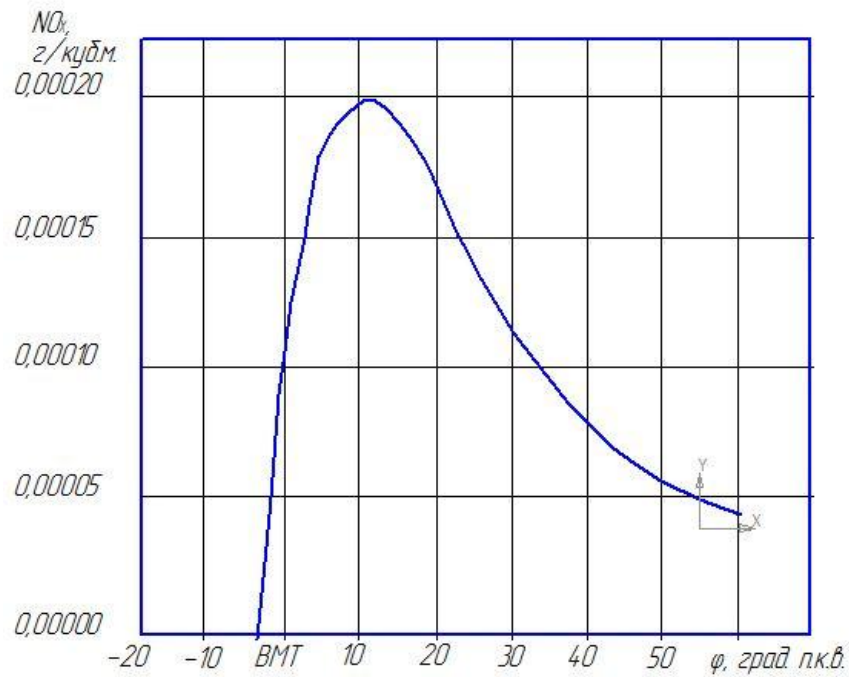


Рисунок 4.7 – Концентрація оксидів азоту (розрахунок) для палива Д78А при $P_i=0,74$ МПа; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$; дизель Д-65.

На рис. 4.6, 4.8 порівняні результати оптичного зондування циліндра і розрахункових даних по куту повороту колінчастого вала дизеля Д-65 для багатокomпонентних спирто-дизельних палив. На даних графіках можна

побачити, що експериментальні і розрахункові дані мають гарну збіжність (похибка становить 10-15 %) і повторюваністю. Це дозволяє зробити висновок про правильність обраних розрахункових методик.

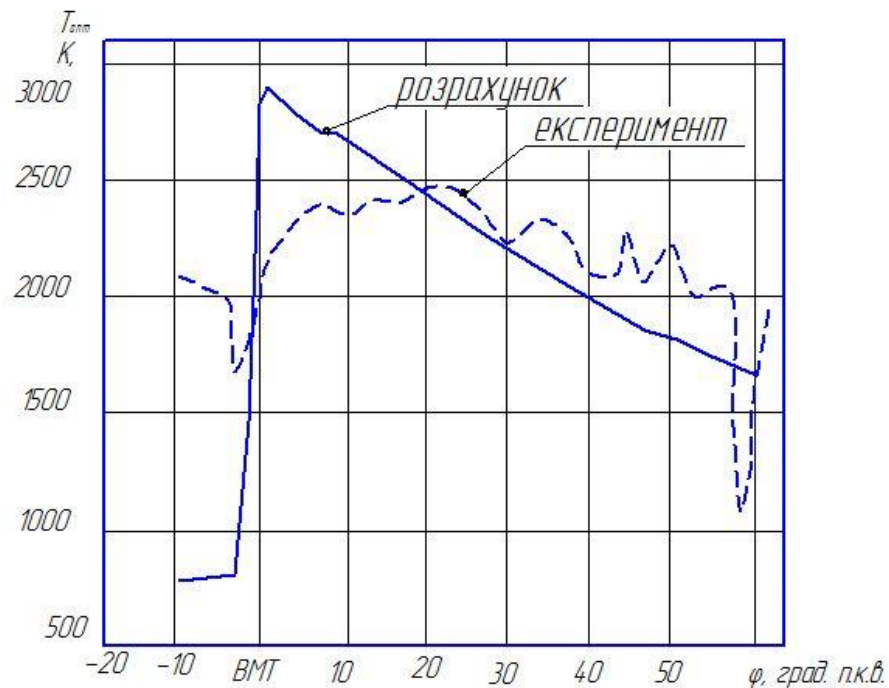


Рисунок 4.8 – Оптична температура палива Д95А при $P_i=0,44$ МПа; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$; дизель Д-65.

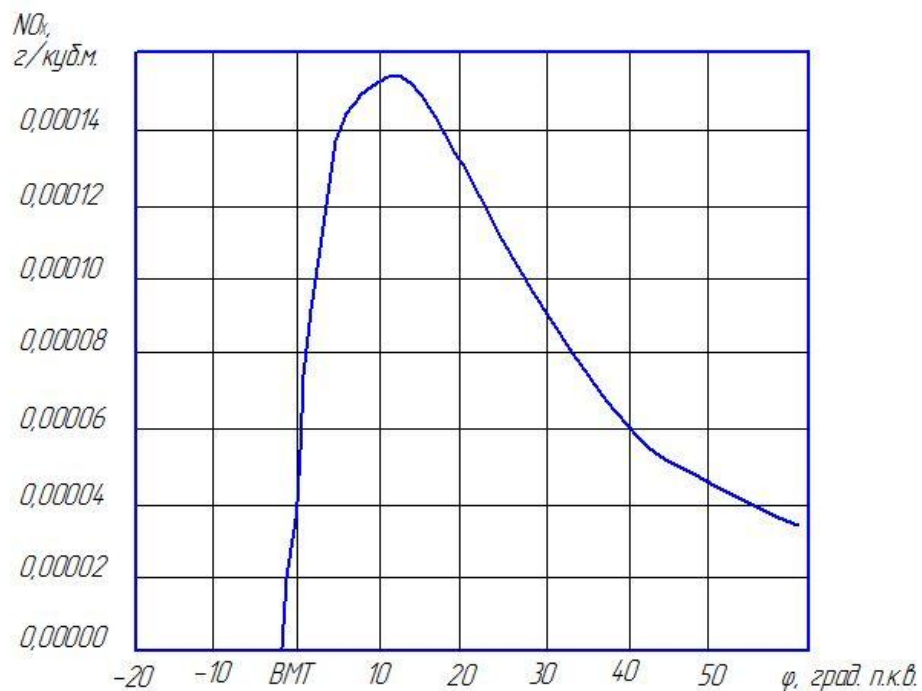


Рисунок 4.9 – Концентрація оксидів азоту (розрахунок) для палива Д95А при $P_i=0,44$ МПа; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$; дизель Д-65.

На рисунку 4.10 представлені експериментальні результати вимірювання токсичних викидів. З рисунка 4.10 ми можемо побачити, що емісія оксидів азоту NO_x для багатоконпонентних палив з великим вмістом спиртів збільшується [11-14]. Це пояснюється більшою максимальною температурою циклу T_z . Однак, можна знизити оксиди азоту, проводячи регулювання подачі палива. З рисунка видно, що максимальна величина викидів NO_x для палив з великим вмістом спиртів становить 2,5-3 г/м^3 , а для дизпалива - 1,8 г/м^3 . Для палив з меншим вмістом спиртів викиди NO_x не перевищують рівень, характерний для стандартного палива.

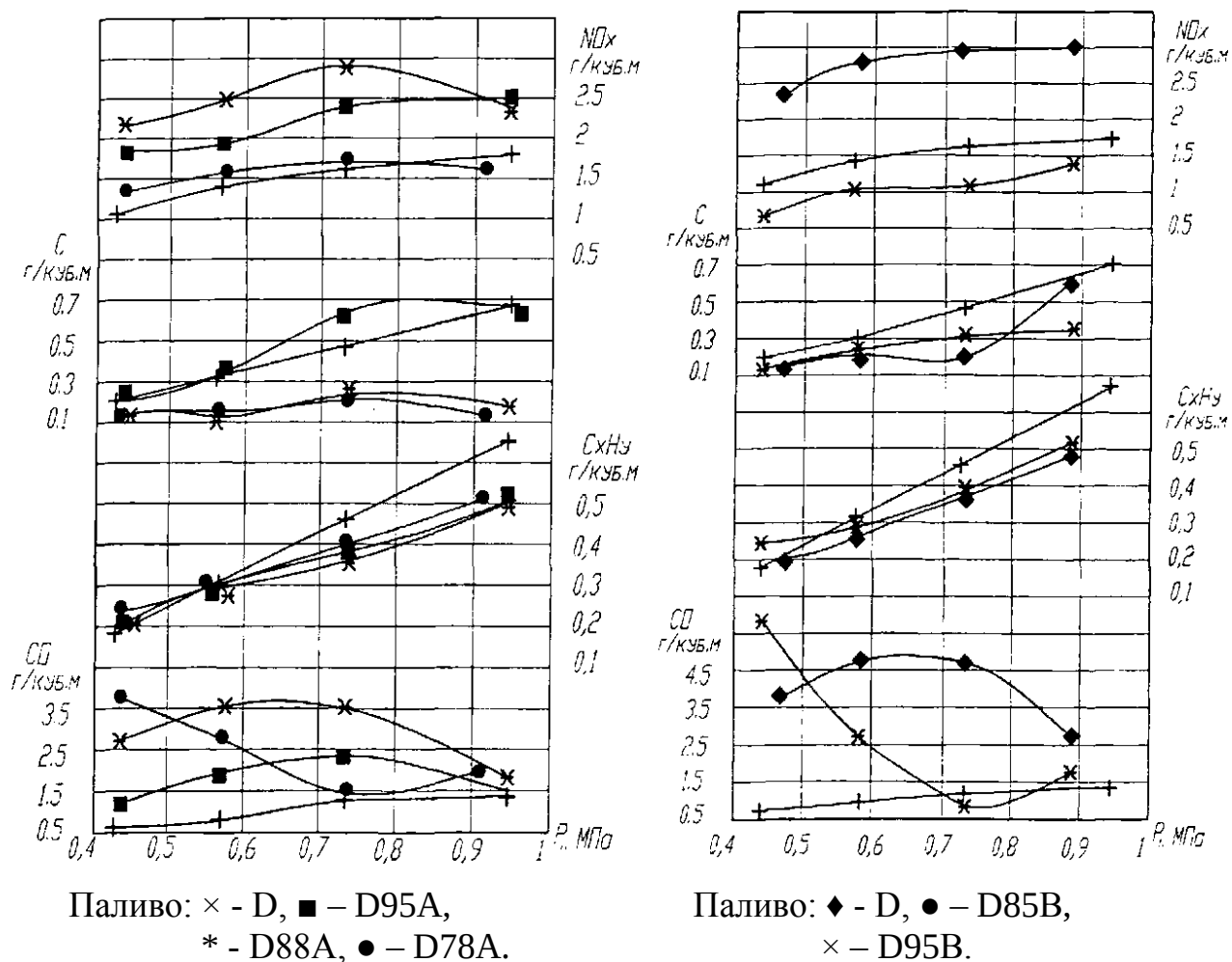


Рисунок 4.10 – Екологічні показники; навантажувальна характеристика; дизель Д-65; $P_i=0,95 \text{ МПа}$; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$.

Вміст сажі в ВГ знижується і становить 0,13 - 0,20 г/м^3 для номінального режиму. Найбільше зменшення досягається при використанні палива Д78А - 0,2 г/м^3 що в 3,5 рази менше, ніж при роботі на дизпаливі.

Максимальний рівень CO збільшується в 2 рази і відбувається зміна характеру протікання. Якщо для багатокomпонентних палив на основі спирту в міру зростання навантаження викиди CO збільшуються і досягають максимального значення при середніх навантаженнях, а потім зменшуються, то для багатокomпонентних палив на водній основі спостерігається зворотна картина: на режимах, близьких до холостого ходу викиди окису вуглецю мають максимальне значення, що досягає 4-6 г/м³. У міру зростання навантаження вміст CO в ВГ зменшується, а на режимах, близьких до номінальних, відбувається зростання викидів.

Рівень викидів C_xH_y для багатокomпонентних палив на спиртовій основі менше на 28 % ніж при використанні дизпалива. Для багатокomпонентних палив на водній основі викиди C_xH_y збільшуються.

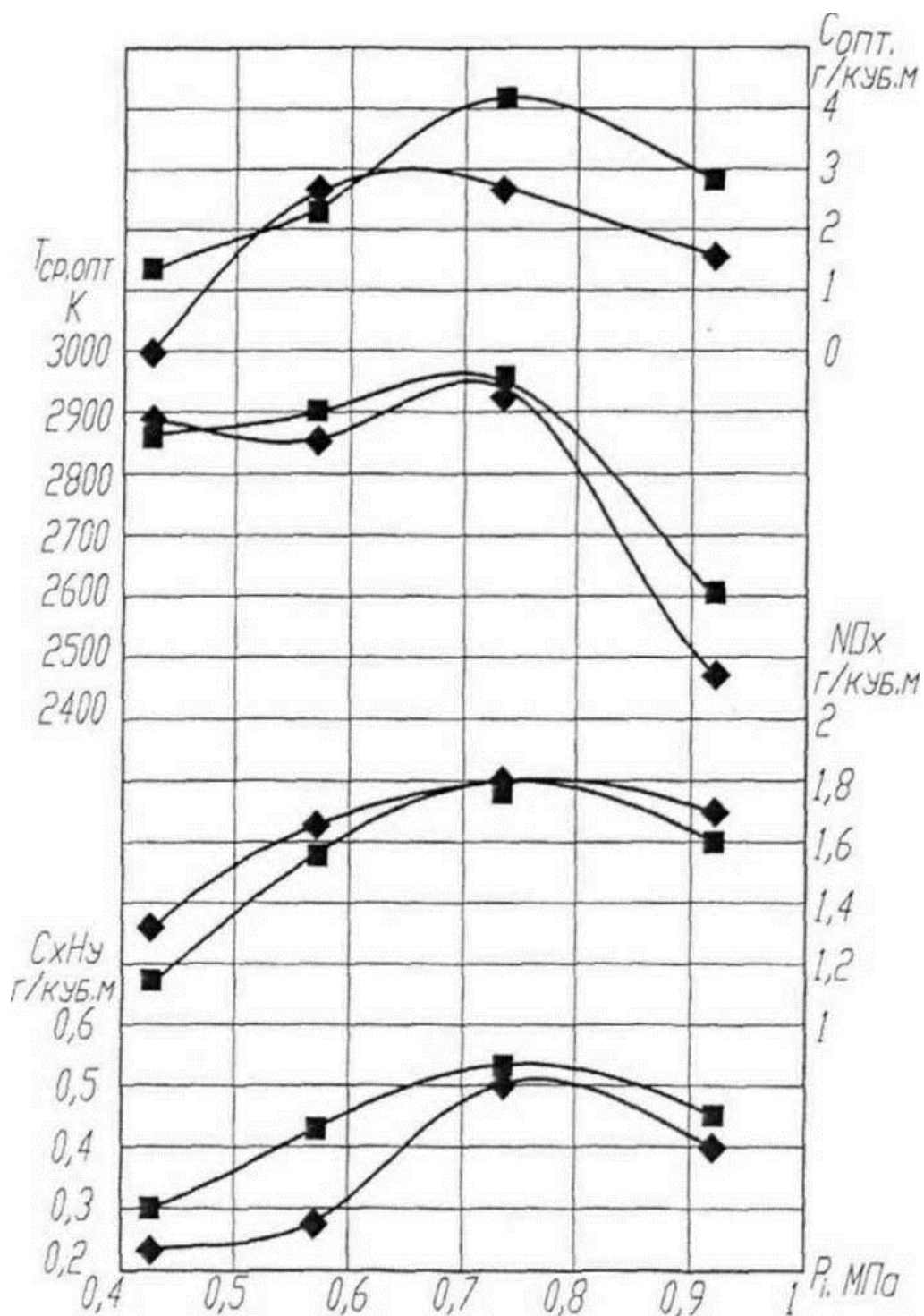
Для порівняльної оцінки результатів розрахункових і експериментальних досліджень екологічних показників на рисунку 4.11 представлені дані при роботі з навантажувальною характеристикою.

З графіків видно, що розбіжність між експериментальними і розрахунковими дослідженнями екологічних показників по навантажувальній характеристиці знаходяться в межах 15 %.

Одним з перевірених заходів щодо зниження викидів NO_x з ВГ дизелів є застосування присадок води до палива у вигляді водопаливних емульсій (ВПЕ) або її подачі на впуск. При цьому графічні залежності (рисунок 4.12) показують, що подача пари води у впускний трубопровід забезпечує більше зниження концентрації NO_x ніж додавання води до палива. З 20 %-ною добавкою води NO_x знижується на 38 і 29,5 % відповідно, з 40 %-ною - на 44 і 41 % відповідно (рисунок 4.12, криві в і г).

Водні та спиртові присадки забезпечують зниження викидів CO, яке для різного складу паливної суміші може досягати для спиртів 50 %, парів води – 30%, водопаливної емульсії – 15 %.

При використанні для живлення дизельного ДВЗ емульсій дизельного палива і спирту відзначалося істотне зниження NO_x при 20 % -му вмісті спирту



◆ - експериментальні показники; ■ – теоретичні показники.

Рисунок 4.11 – Порівняння експериментальних і розрахункових екологічних показників; паливо Д88А; дизель Д-65; $n=1750 \text{ хв}^{-1}$.

на 27,6 %, при 40 % -му вмісті - на 39,4 %. При подачі парів спирту на впуск також відзначається зниження при 20 % -му вмісті - на 23,5 %, при 40 % -му на 35,3 % (рис. 2.17 криві а і б).

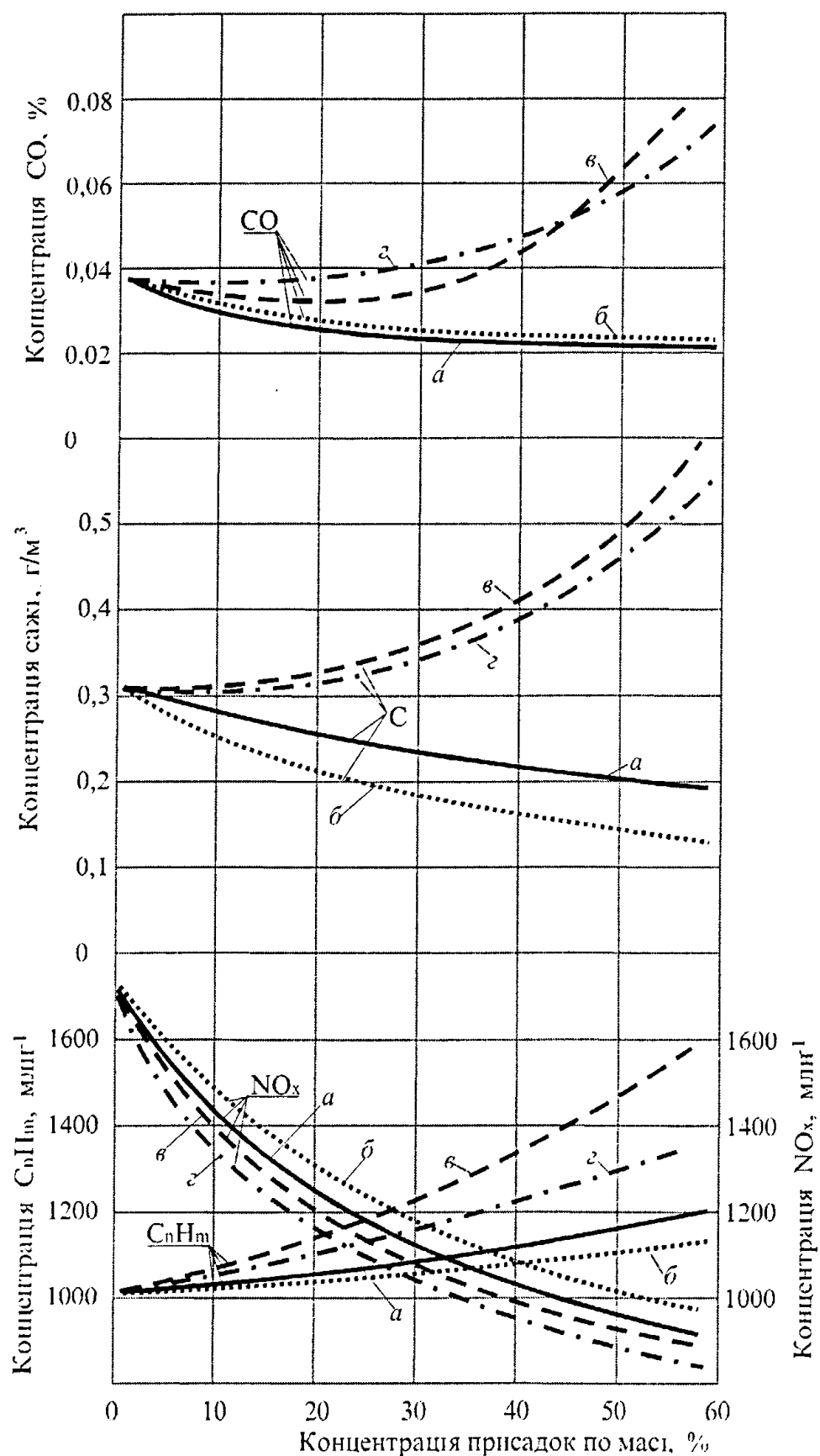


Рисунок 4.12 – Зміна токсичності ВГ дизельного ДВЗ Д-65 при роботі з присадками: а - суміш палива з метанолом; б - парів спирту; в - водопаливної емульсії; г - парів води.

Концентрація C_xH_y в ВГ дизеля зростає як при добавках води, так і спирту. У разі подачі присадок парів спирту у впускний трубопровід спостерігалось незначне збільшення концентрації C_xH_y (рис. 4.12).

Введення води з повітрям, паливом підвищує теплоємність заряду дизеля, знижує його середню і максимальну температуру, внаслідок чого збільшуються затримки запалення і тривалості горіння, що в кінцевому підсумку призводить до збільшення концентрації в ВГ продуктів неповного згоряння палива, а саме CO і сажі.

Використання в якості присадки до палива води призводить до підвищення вмісту CO зі збільшенням її концентрації в ВГ дизеля в залежності від кількості води, що надходить з всмоктуваним повітрям або в ВПЕ (рис. 4.12). Наприклад, при 20 % -му вмісті води близько 20 %.

Зміст сажі в ВГ збільшується при 20 % -му вмісті води на 10 %, при 40 % -му - на 56 %. Спиртові присадки до повітря і палива знижують рівень концентрації CO (рис. 4.12 в залежності від кількості подаваного спирту. При 20 % -му вмісті спирту концентрація CO зменшується на 20 %, при 40 %-му на 23 %. Концентрація сажі також знижується при добавках спирту в паливо, при 20 %-му на 25 %, при 40 %-му - на 35 %.

ВИСНОВКИ.

В процесі експлуатації автомобіля проявляються несправності, що зазвичай збільшують шкідливі викиди з ВГ ДВЗ. Виконані із застосуванням теорії планування багатофакторних досліджень експерименти дозволили на підставі номограми встановити залежність складу відпрацьованих газів від технічного стану паливної апаратури дизеля.

Перспективним напрямом захисту навколишнього середовища від його забруднення ВГ є використання в ДВЗ багатокомпонентних палив. Термодинамічний розрахунок дозволяє визначити основні термохімічні властивості палив довільного хімічного складу, а також складів продуктів згоряння, що дає можливість оцінити ефективність використання досліджуваних палив для зниження токсичності ВГ.

Термодинамічний розрахунок багатокомпонентних палив дозволяє визначити основні термохімічні властивості палив довільного хімічного складу при їх згорянні в ДВЗ, що дає можливість скласти умовну хімічну формулу, що відповідає заданим умовам та вимогам процесу горіння.

З метою зниження токсичних речовин в ВГ до процесу горіння висуваються вимоги найбільшої повноти згоряння палива при обмеженні окислення азоту. У свою чергу підвищення швидкості поширення фронту полум'я та збільшення кількості осередків займання зменшують обсяг проміжних продуктів реакцій, чим знижується токсичність ВГ.

Складено математичну модель з розрахунком на ЕОМ, що оцінює можливість використання в ДВЗ альтернативних та багатокомпонентних палив з метою зниження токсичності ВГ.

Розроблена математична модель каталітичного нейтралізатора, яка дозволяє проводити вивчення та описує фізико-хімічних процеси, що відбуваються поза ДВЗ та призводять до зниження рівнів його шкідливих викидів, виділення зв'язків параметрів навколишнього середовища з умовами експлуатації.

Експериментальні дослідження кваліфікаційної роботи та результати подальшої експлуатації систем формування багатокomпонентного палива спільно з каталітичною нейтралізацією ВГ підтверджують обґрунтованість та достовірність розроблених математичних моделей та методик.

Проведено оцінку показників роботи ДВЗ та вмісту шкідливих речовин в ВГ за результатами застосування багатокomпонентного палива на основі спирту залежно від фракційного складу.

Елементний склад багатокomпонентного палива відрізняється зниженням частки вуглецю і значною кількістю кисню, частка водню зберігається майже незмінною. Підвищена прихована теплота випаровування, разом із зниженим цетановим числом збільшує період затримки займання для цього необхідно змінити регулювання паливної апаратури. При цьому проявляється незначне, на 1-2 % відхилення індикаторного ККД.

Багатокomпонентний склад палива забезпечує зниження вмісту сажі в ВГ залежно від кількості спирту, що подається в середньому в 2,5 рази, рівень викидів СН зменшується на 28 % ніж при використанні дизпалива, відзначається незначне на 5-8 %, збільшення викидів NO_x .

Використання як присадки до багатокomпонентного палива води призводить до підвищення вмісту сажі та СО, з підвищенням їх концентрацій в ВГ дизеля в залежності від збільшення кількості води, що надходить з всмоктуванням повітря.

Вибір тих чи інших вище перелічених заходів буде розподілятися завданнями переведення двигуна на багатокomпонентні палива (тимчасово чи постійно), конструктивними можливостями ДВЗ.

Список використаної літератури.

1. Моніторинг довкілля: Підручник за ред. В. М. Боголюбова, Т. А.Сафранова: Херсон. 2011. – 530 с.
2. Кужель В.П. Екологія та ресурсозбереження на автомобільному транспорті: навчальний посібник / В.П. Кужель, С.М. Севостьянов. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 105 с.
3. Бакуліч О.О., Самойленко Є.С. Динаміка рівня забруднення урбанізованих територій. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. 2021. Випуск 1 (48). С. 12-19. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/012-019.pdf>.
4. Мітков В.Б. Розробка науково-методологічних основ комплексної оцінки впливу машинно-тракторних агрегатів на стан забруднення навколишнього середовища // Екологічні науки 6, Київ, 2016, № 12-13. С. 122-127.
5. Солтус А. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля: Навчальний посібник для ВНЗ / А. П. Солтус. – К. : Арістей, 2010. – 155 с.
6. Технічна експлуатація та надійність автомобілів : навч. посібник / Є.Ю. Форнальчик, М. С. Олісевич, О. Л. Мастикаш, Р. А. Пельо. – Львів : Афіша, 2004. – 492 с
7. Гутаревич Ю.Ф, Зеркалов Д.В., Говорун А.Г, Корпач А.О., Мержиєвська Л.П. Екологія та автомобільний транспорт. Навчальний посібник. – К: Арістей 2006 – 292 с.
8. Гутаревич Ю.Ф. Екологія та автомобільний транспорт: Навчальний посібник 2-ге вид., перероблене та доповнене / Ю.Ф. Гутаревич. – К.: Арістей, 2008. – 296 с.
9. Мітков В.Б Вплив та екологічна оцінка рівня шкідливих речовин відпрацьованих газів дизельних двигунів в залежності від режимів роботи МТА / В.Б. Мітков, В.П. Кувачов, Є.І. Ігнат'єв // Вестник УО МААО. – Мелитополь: ТДАТУ, Випуск 4. 2016.с. с.78-88.

10. Осетров О.О. Поліпшення техніко-економічних показників дизеля ЧН 12/14, що працює на біопаливах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» / О. О. Осетров. – Харків, 2015. – 20 с.
11. Шльончак А.І. Покращення економічних та екологічних показників транспортних засобів з дизелем шляхом використання сумішевих палив: 105 автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.20 / І. А. Шльончак: Нац. трансп. ун-т. – К., 2013. – 20 с.
12. Поляков А. П. Покращення показників дизеля зміною пропорцій дизельного та біодизельного палив в паливній суміші / А. П. Поляков, О. О. Галушак, П. А. Поляков, Д. Л. Королюк // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – Вип. 3. – С. 167-169.
13. Левківський О. О. Поліпшення паливної економчності і екологічних показників вантажних автомобілів при використанні біодизельного палива: автореф. дис.. кандидат техн. наук: 05.22.20 / О. О. Левківський. – К.: НТУ, 2013. – 20 с.
14. Галушак О.О. Рекомендації щодо використання регулювання відсоткового складу суміші палив для дизеля / О.О. Галушак, В.Б. Рябошапка В.П. Комаха //Всеукраїнський науково-виробничий журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК», ВНАУ. 2018 - №2 – С.67-72.
15. Матейчик В.П. Методи оцінювання та способи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів. Монографія: Національний транспортний університет. К. : 2006. – 216 с.
16. Трактори та автомобілі. Ч. І. Автотракторні двигуни: Навч. посіб./М. Г. Сандомирський, М. Ф. Бойко, А. Т. Лебєдев та ін./; За ред. проф. А. Т. Лебєдєва. – К.: Вища школа., 2000. 357 с.: іл.
17. Транспорт і охорона навколишнього середовища в регіонах України / Чернюк Л. Г., Пепа Т. В., Чеховська М. М.; за заг. ред. Л. Г. Чернюк. НАН України. Рада по вивченню продуктивних сил. К. : Науковий світ, 2004. 190 с.

18. Транспортна екологія / О. І. Запорожець та ін. ; за заг. ред. С. В. Бойченка. Київ : НАУ, 2017. – 507 с.
19. Випробування автотракторних дизельних двигунів внутрішнього згорання / Анісімов В. Ф., Гунько І. В., Гуцаленко О. В., Музичук В. І., Комаха В. П., П'ясецький А. А., Рябошапка В. В., Кравець С. М.; за ред. В. В. Біліченка, В. М. Пришляка.- Вінниця, РВВ ВНАУ, 2015.-41
20. ДСТУ 7688:2015 «Паливо дизельне Євро. Технічні умови»
21. Галушак Д.О. Вплив сумішевого складу палива на екологічні показники дизельного двигуна / Д.О. Галушак // Збірник тез доповідей науковопрактичної конференції «Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів»: 8-11 вересня 2015р. – Одеса: Військова академія, 2015. – С. 46-49
22. ДСТУ 4276:2004 Норми і методи вимірювання димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями. [Чинний з 2004-01-04] . – К.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2004. – 13 с.
23. Войцицький А.П. Методи та засоби вимірювання параметрів навколишнього середовища. Житомир, 2014. – 365 с.
24. Джигерей В.С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища: навч. Посіб. - 4 - те вид., випр. 1 доп. - К.: Т-во «Знання», К(Х), 2006. – 456 с.
25. Динамічні властивості і стабільність функціонування автотранспортних засобів / Д. В. Абрамов, Н. М. Подригало, М. А. Подригало [та ін.]. – Х. : ХНАДУ, 2014. – 204 с.
26. Кучерявий В.П. Екологія. Львів: Вид-во «Світ», 2001, 501 с.
27. European Commission. Developing and implementing a sustainable urban mobility 151p.– European Platform on Sustainable Urban Mobility Plans, 2013. –plans: Guidelines.