

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії

Кафедра суднових енергетичних установок

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ
МОРСЬКИХ СУДЕН**

Курсанта 2-го року навчання навчально-наукового інституту інженерії
Ушакова Олександра Ігоровича

Керівник: к-т техн. наук, доцент Заблоцький Ю.В.

Нормоконтроль

Роботу заслухано на засіданні кафедри суднових енергетичних установок.
Рекомендовано до захисту в ЕК, протокол № 9 від 17.12.2025 р.

Завідувач кафедри СЕУ,
д-р техн. наук, професор

Сергій САГІН

Рецензент (зовнішній)

(ПІБ, підпис, дата)

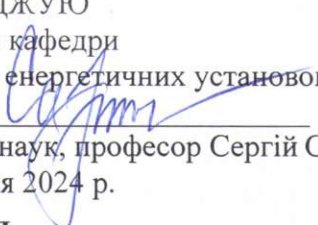
Рецензент (внутрішній)

(ПІБ, підпис, дата)

Одеса – 2025

Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії
Кафедра суднових енергетичних установок

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
суднових енергетичних установок


д-р техн. наук, професор Сергій САГІН
10 вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи магістра

Курсант ННІ _____ Ушаков Олександр Ігорович _____

1. Тема дипломної роботи: Підвищення екологічності роботи _____
морських суден _____

Затверджена наказом ректора НУОМА № 1414 від 24 листопада 2025 р. _____

2. Об'єкт дослідження процес випуску відпрацьованих газів _____
суднових двигунів внутрішнього згоряння _____

3. Предмет дослідження процес зниження емісії оксидів азоту з _____
випускними газами суднових дизелів _____

4. Обсяг пояснювальної записки: 70...80 стор. _____

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи: _____

___ Аналіз літературних джерел з проблеми утворення та пошуку шляхів зниження _____

___ токсичних речовин в випускних газах суднових двигунів внутрішнього згоряння _____

___ Загальна методика наукового дослідження _____

___ Сучасні технології зниження емісії оксидів азоту суднових двигунів _____

___ внутрішнього згоряння _____

___ Науково-дослідницькі розділи _____

6. Зміст основної частини пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

___ Аналіз літературних джерел з проблеми утворення та пошуку шляхів зниження _____

___ токсичних речовин в випускних газах суднових двигунів внутрішнього згоряння _____

___ Загальна методика наукового дослідження _____

___ Сучасні технології зниження емісії оксидів азоту суднових двигунів _____

___ внутрішнього згоряння _____

___ Науково-дослідницькі розділи _____

7. Перелік графічного матеріалу:

___ Технологічна карта наукового дослідження _____

___ Результати науково-дослідницьких розділів _____

Робота повинна бути виконана відповідно до «Методичних вказівок для виконання дипломної роботи магістра», затверджених Вченою радою ННІ 27.06.2023, протокол № 11.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 78 сторінок, 12 рисунків, 8 таблиць, 45 літературних джерел.

Розглянути процеси зниження токсичності випускних газів суднових дизелів. Надані характеристики токсичних речовин, що утворюються при роботі суднових двигунів внутрішнього згоряння. Виконано аналіз процесу утворення токсичних речовин в дизелях та вказані шляхи зниження.

Розглянути сучасні технології зниження токсичності відпрацьованих газів суднових двигунів внутрішнього згоряння, а саме спосіб абсорбційної очистки; використання природного газу, рециркуляції відпрацьованих газів, метанолу-паливної емульсії і етанолу-паливної емульсії; застосування водопаливних емульсій, використання диметилового ефіру.

Запропонована математична модель системи зниження токсичності відпрацьованих газів суднових двигунів внутрішнього згоряння.

Розглянути питання формування методики сертифікації суден по токсичним газовим викидам.

СУДНОВА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ,
ВИПУСКНІ ГАЗИ, ТОКСИЧНІСТЬ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ,
АБСОРБЦІЯ ГАЗІВ, РЕЦИРКУЛЯЦІЯ ГАЗІВ, УТВОРЕННЯ ПАЛИВНИХ
ЕМУЛЬСІЙ

ABSTRACT

Master's thesis: 78 pages, 12 drawings, 8 tables, 45 references.

Consider processes for reducing the toxicity of marine gas exhaust gases.

Characteristics of toxic substances formed during operation of marine combustion engines are given. The process of formation of toxic substances in diesels is analyzed and the ways of reduction are indicated.

Consider modern technologies for reducing the toxicity of exhaust gases of marine internal combustion engines, namely the method of absorption purification; use of natural gas, exhaust gas recirculation, methanol-fuel emulsion and ethanol-fuel emulsion; use of water-fuel emulsions; ignition of toxic components.

The mathematical model of the system of reduction of toxicity of the exhaust gases of marine engines of internal combustion is offered.

Consider forming a methodology for certification of vessels for toxic gas emissions.

MARINE POWER PLANT, MARINE DIESEL, EXHAUST GASES, FLUE GAS TOXICITY, GAS ABSORPTION, GAS RECIRCULATION, FORMATION OF FUEL EMULSIONS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗНИЖЕННЯ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН В ВИПУСКНИХ ГАЗАХ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	13
1.1. Токсичність випускних газів двигунів внутрішнього згорання....	13
1.2. Основні токсичні компоненти випускних газів судових дизелів.	16
1.3. Утворення та шляхи зниження токсичних речовин в дизелях.....	18
1.3.1. Утворення токсичних речовин в процесі згорання палива.....	19
1.3.2. Особливості утворення окислів азоту.....	21
1.3.3. Особливості утворення незгорілих вуглеводнів.....	23
1.3.4. Особливості утворення окису вуглецю.....	25
1.3.5. Особливості утворення альдегідів.....	26
1.3.6. Димність відпрацьованих газів.....	26
1.4. Аналіз способів і засобів зниження токсичності випускних газів дизельного двигуна.....	28
1.5. Висновки за розділом 1.....	29
2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	31
2.1. Процес наукового пізнання.....	31
2.2. Методологічні принципи наукових досліджень.....	32
2.3. Обґрунтування мети і завдань дослідження.....	33
2.4. Висновки за розділом 2.....	36
3. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ.....	38
3.1. Загальні тенденції зниження емісії оксидів азоту судових дизелів	38

3.2. Використання природного газу, рециркуляції відпрацьованих газів, метанолу-паливної емульсії і етанолу-паливної емульсії.....	40
3.3. Поліпшення екологічних характеристик дизелів шляхом використання водо-паливних емульсій.....	45
3.4. Використання етанолу та етаноло-паливних емульсій.....	51
3.5. Використання діметилового ефіру	55
3.6. Висновки за розділом 3.....	64
4. ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНА.....	65
4.1. Забезпечення екологічних показників суднових дизелів під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту .	65
4.2. Альтернативні палива як найбільш доцільний спосіб зниження емісії оксидів азоту та забезпечення екологічної ефективності морського судна	68
4.3. Висновки за розділом 4.....	69
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВГ	–	випускні гази
ВПЕ	–	водопаливна емульсія
ГДВ	–	гранично допустимий викид
ГДК	–	гранично допустима концентрація
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ДП	–	дизельне паливо
ЕПЕ	–	етаноло-паливна емульсія
ЕФ	–	електричний фільтр
КВВП	–	кут випередження впорскування палива
ККЕЕ	–	конструктивного коефіцієнту енергетичної ефективності
МАРПОЛ	–	Міжнародна конвенція по запобіганню забруднення з суден
МПЕ	–	метаноло-паливна емульсія
ПГ	–	природний газ
РВГ	–	рециркуляція відпрацьованих газів
РМ	–	дисперсні частинки
СЕУ	–	суднова енергетична установка
СЗТВГ	–	система зниження токсичності випускних газів
СФ	–	сажовий фільтр
ТР	–	токсичні речовини
ШР	–	шкідливі речовини
MARPOL	–	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships

ВСТУП

Зростаюче забруднення атмосфери промисловими і транспортними викидами – одна з найбільш важливих і складних проблем сучасності. Особлива увага при цьому приділяється морському транспорту, шкідливі викиди якого відіграють значну роль як в глобальній проблемі, так і в регіональному і локальному забрудненні повітряного басейну. Постійне зростання кількості судів і потужності їх двигунів призводить до збільшення обсягу палива, що спалюється ними палива, а отже, до великих викидів токсичних компонентів з відпрацьованими газами.

В даний час вплив морського транспорту на навколишнє середовище – одна з найбільш нагальних і актуальних проблем сучасного суспільства. Наслідки цього впливу позначаються не тільки на нинішньому поколінні, а й майбутньому, якщо не брати серйозні заходи по контролю, зниження й усунення наслідків впливу.

Під атмосферним забрудненням розуміють присутність у повітрі газів, парів, часток твердих і рідких речовин, тепла, коливань, випромінювань, які несприятливо впливають на людину, тварин, рослини, клімат, матеріали, будівлі та споруди.

Результати багатьох досліджень показують, що в безпосередній близькості до суднових фарватерах, місцях скупчення судів, портів зміст в повітряному середовищі оксиду вуглецю, оксидів азоту, оксидів сірки перевищує гранично допустимі максимально-разові концентрації для атмосферного повітря. Це свідчить про суттєве забруднення повітря морськими судами.

Розвиток судноплавства на водних шляхах призвело до будівництва нового, сучасного флоту з потужними енергетичними установками. Масова експлуатація такого флоту супроводжується інтенсивним зростанням його

впливу на навколишнє середовище. Один з найважливіших компонентів суспільного і економічного розвитку, який поглинає значну кількість ресурсів і робить серйозний вплив на природне середовище, є морський транспорт. Послуги морського транспорту грають важливу роль в економіці і в житті людей. При всій важливості транспортного комплексу необхідно враховувати його вельми значній мірі негативно впливає на природні екологічні системи. Щорічне зростання кількості морських судів тягне за собою збільшення обсягу палива, що спалюється ними палива, а, отже, до великих викидів токсичних компонентів з відпрацьованими газами.

Величезну роль у забрудненні атмосферного повітря грають дизелі і котли морських суден, які до сих пір залишаються найбільш ефективними в енергетичному сенсі. Так, при згорянні дизельного палива виділяється оксид вуглецю CO, оксиди азоту NO_x, вуглеводні CH, оксиди сірки SO_x, альдегіди, сажа. При роботі суднових енергетичних установок в атмосферне повітря викидаються випускні гази головних двигунів і котлів морських суден, токсичність яких визначається як сортом палива, також і умовами його згорання. Застосування важких палив, з високим вмістом сірки, сприяє зменшенню експлуатаційних витрат на паливо, але при цьому підвищується забруднення навколишнього середовища сірчистим і сірчанам ангідридом, збільшується знос і число відмов суднових енергетичних установок. Випускні гази дизелів мають досить високу токсичність через підвищений вміст оксидів азоту, оксидів сірки, сажі і альдегідів [1].

Викид в атмосферу відпрацьованих газів суднових енергетичних установок є наслідком і природним умовою функціонування двигунів внутрішнього згорання. За своєю природою відпрацьовані гази дизелів є дуже складну суміш парів, газів, крапель рідин і частинок. Випускні гази двигунів внутрішнього згорання містять близько 270 речовин, частина з яких є нетоксичними. При використанні вуглеводневих палив нафтового походження і атмосферного повітря як окислювач випускні гази дизельних і

котельних установок складаються на 99,2% з нетоксичних компонентів – продуктів неповного згоряння (діоксид вуглецю CO_2 і водяна пара H_2O) і повітря зі зниженим вмістом кисню O_2 . Всі токсичні компоненти, які утворюються в суднових дизелях і котлах, можна розділити на дві групи. До першої групи належать продукти неповного згоряння палива – це монооксид вуглецю, вуглеводні, альдегіди, сажа. Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива і повітря – оксиди азоту NO_x та сірки SO_x . Суднові дизелі і котли, які знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності відпрацьованих газів, в першу чергу, викидів оксидів сірки [2].

Основним міжнародним конвенційним документом, який регламентує викиди забруднюючих речовин судновими енергетичними установками (СЕУ), є Міжнародна конвенція по запобіганню забруднення з суден (МАРПОЛ 73/78) (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78) [3, 4]. Конвенція передбачає комплекс заходів щодо запобігання експлуатаційного та аварійного забруднення моря з суден нафтою; рідкими речовинами, які перевозяться наливом; шкідливими речовинами, які перевозяться в упаковці; стічними водами; сміттям; а також забруднення повітряного середовища з суден. Вона вступила в дію 2, жовтня 1983 року.

Додатком VI даної Конвенції «Правила запобігання забруднення повітряного середовища з суден», прийнятим в 1998 році і набрав чинності в травні 2005 року, для морських суден нормуються викиди оксидів азоту, летучих оксидів сірки та викидів речовин, які руйнують озоновий шар. На 58-й сесії Комітету по захисту морського середовища ІМО був схвалений проект переглянутого Додатка VI «Правила запобігання забруднення повітряного середовища з суден» МАРПОЛ 73/78 і Технічний кодекс з контролю за викидами оксидів азоту з суднових дизельних двигунів [5].

Для контролю за вмістом оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах суднових дизелів Резолюція конференції Комітету з захисту морського середовища ІМО Мерс.184(59): Керівництво 2009 по системам очистки відпрацьованих газів встановила обов'язковим Технічний Кодекс по контролю за їх викидами в атмосферу. Метою Кодексу є встановлення обов'язкових процедур випробувань, огляду суднових дизельних двигунів і оформлення для них свідоцтв, які нададуть можливість виробникам двигунів, судновласникам і Адміністрації забезпечувати, щоб граничні значення викидів відповідали величині NO_x , встановленому в Правилі 13 «Окисли азоту (NO_x)» Додатки VI «Правила запобігання забруднення повітряного середовища з суден» МАРПОЛ 73/78 [6].

Крім окислів азоту та сірку у випускних газах (ВГ) суднових дизелів знаходяться ще багато шкідливих речовин, деякі з котрих відносяться до токсичних. Це окисли вуглецю, незгорілі вуглеводні, сажеві викиди, а також безпосередня димність ВГ.

Зниження токсичності випускних газів суднових дизелів та підвищення екологічності суднових дизелів є актуальним завданням, розв'язання якого сприяє забезпеченню екологічної безпеки роботи суднової енергетичної установки.

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ УТВОРЕННЯ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН В ВИПУСКНИХ ГАЗАХ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Дизелі морських суден, які залишаються найбільш розповсюдженими та найбільш ефективними тепловими двигунами, створюють велику роль в забрудненні атмосферного повітря. Під час при згорянні 1 кг дизельного палива виділяється 80...100 г токсичних компонентів (20...30 г оксиду вуглецю CO, 20...40 г оксидів азоту NO_x, 4...10 г вуглеводнів CH, 10...30 г оксидів сірки SO_x, 0,8...1,0 г альдегідів, 3...5 г сажі). Маючи значно менші, порівняно з бензиновими двигунами, викиди чадного газу (CO) і вуглеводнів, випускні гази дизелів мають досить високу токсичність через підвищений вміст оксидів азоту, оксидів сірки, сажі та альдегідів.

1.1. Токсичність випускних газів двигунів внутрішнього згорання

Двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) є одним з джерел забруднення довкілля.

Проведені дослідження показали, що ВГ містять більше 1000 різних речовин. Крім прямого шкідливого впливу на людський організм деякі викидаються в атмосферу двигуном шкідливих речовин (ШР) призводять до утворення отруйного фотохімічного туману. Причиною його утворення є складна взаємодія викидаємих ДВЗ в атмосферу оксидів азоту, вуглецю, ненасичених вуглеводнів і поліциклічних ароматичних вуглеводнів [7].

В даний час більшість СЕУ мають в якості силових установок дизельні ДВЗ. За своєю природою ВГ цих двигунів є складною багатокomпонентною

сумішшю газів, парів і крапель рідин, дисперсних частинок твердих речовин. Склад ВГ судових ДВЗ наданий у таблиці 1.1.

При використанні звичайних вуглеводневих палив нафтового походження і атмосферного повітря як окислювач ВГ дизельних двигунів на 99,00...99,98 % складаються з продуктів повного згоряння палива (CO_2 і H_2O) і повітря зі зниженим вмістом кисню. Токсичність ВГ дизелів визначається в основному іншими 0,02...1,00 % і з обсягу, куди входять речовини, які утворюються в результаті термічного синтезу з повітря при високих температурах (оксид азоту), а також продукти неповного згоряння палива (незгорілі вуглеводні, оксид вуглецю, сірчистий ангідрид, частинки вугілля і сажі, продукти конденсації і полімеризації).

Таблиця 1.1. Склад випускних газів дизельних двигунів

Компонент	Одиниця вимірювання	Величина	Примітка
Азот	% за об'ємом	75...78	нетоксичний
Кисень	--	2,0...20,0	--
Вуглекислий газ	--	0,5...12,0	--
Пари води	--	12,0...15,0	--
Водень	--	0,01...0,50	--
Оксид вуглецю	--	0,01...1,00	токсичний
Вуглеводні	--	0,001...0,200	--
Оксиди азоту	--	0,001...0,200	--
Альдегіди	--	0,001...0,010	--
Сажа	мг/л	0,010...2,000	--
Бенз- α -пирен	г/м ³	до 10	концероген

При роботі на номінальній потужності суднові ДВЗ виділяють токсичні речовини у кількості, наведеної у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Виділення шкідливих викидів з випускними газами судових ДВЗ при їх роботі на номінальній потужності, г/(кВт·год)

Речовина, що виділяється	4-х тактні	2-х тактні
Сірчастий ангідрид	0,9	1,0
Оксид вуглецю	4,8	11,0
Альдегіди	0,20	0,34
Оксиди азоту	16,3	19,0
Вуглеводні	3,4	8,2
Сажа	1,4	1,2
Бенз- α -пирен	1,4	1,14

Слід зазначити, що на склад ВГ дизельного двигуна дуже впливає режим роботи. Так зниження швидкісного режиму веде до збільшення вмісту сажі та оксиду азоту. Це пояснюється погіршенням процесу сумішоутворення, більш тривалою дією високої температури, що викликає закалювання оксиду азоту. Збільшення навантаження викликає підвищення токсичних компонентів, особливо при навантаженнях, близьких до максимальних. Зміст канцерогенних речовин особливо великий при пуску і зупинці двигуна [8].

1.2. Основні токсичні компоненти випускних газів суднових дизелів

Нижче представлені основні токсичні складові випускних газів ДВЗ.

Окис вуглецю (CO). У звичайних умовах окис вуглецю – це газ, без запаху і кольору. Окис вуглецю легше повітря і легко поширюється в атмосфері. Окис вуглецю в кількості понад 0,01 % за обсягом може викликати ознаки отруєння. Вдихання повітря з 0,12 % окису вуглецю через 0,5 години викликає легке серцебиття, через 1,5 години запаморочення, а через 2 години головний біль, нудоту і часткову втрату свідомості. Концентрація в повітрі окису вуглецю 0,20...0,25 % через 0,5 години призводить до непритомного стану.

Оксиди азоту (NO_x). У випускних газах ДВЗ присутні два види окислів азоту: оксид азоту (NO) – безбарвний газ і двоокис азоту (NO₂) - газ червонувато-бурого кольору з характерним запахом. Потрапляючи в організм людини, вони з'єднуються з водою (H₂O), утворюючи в дихальних шляхах сполучення азотної (HNO₃) і азотистої (HNO₂) кислот. Вдихання з повітрям 0,01% оксидів азоту протягом 0,5...1,0 г може викликати серйозні захворювання. По дії на організм людини оксиди азоту практично в 10 разів небезпечніше окису вуглецю. Оксиди азоту подразнюють слизові оболонки очей, носа і рота. Крім того, оксиди азоту беруть участь в процесах, що ведуть до утворення смогу.

Альдегіди (R_xCHO) присутні в ВГ в основному у вигляді формальдегіду і акролеїна.

Формальдегід (CH₂=O) в звичайних умовах являє собою газ з різким неприємним запахом. При охолодженні конденсується в рідину, киплячу при температурі мінус 21°C (-294 K), дратівливо діє на всі слизові оболонки і вражає центральну нервову систему. Як гостре, так і хронічне отруєння

газоподібним формальдегідом викликає запалення органів дихання. При концентрації формальдегіду в атмосфері 0,007 % спостерігається подразнення дихальних шляхів і слизових оболонок очей і носа, а при концентрації 0,18% вже сильне роздратування.

Формальдегід виявляється по різкому запаху при його вмісті в повітрі 0,0002 мг/л.

Акролеїн ($\text{CH}_2=\text{CHCHO}$) - газ (при температурі нижче $52,5^\circ\text{C}$ – рідина) з гострим дратівливим запахом підгорілих жирів і масел.

Отруйний, пари його важчі за повітря. Сильно дратує слизисті оболонки і володіє загальною токсичною дією. Зміст в атмосфері 0,002% акролеїна нестерпно, 0,0005% – важко переносимо, 0,00008% – для людини небезпечно.

Вуглекислий газ (CO_2). Без кольору і запаху, важчий за повітря, тому накопичується в понижених місцях. Підвищення вуглекислого газу в атмосфері викликає у людини прискорене дихання. Вміст вуглекислого газу 20...25% за обсягом небезпечно для життя. Там, де скупчення таких великих місцевих концентрацій вуглекислого газу в атмосфері малоімовірно (відкриті обсяги), вуглекислий газ не слід відносити до категорії токсичних. Однак, при роботі ДВЗ в суднових умовах обмеженого обсягу він шкідливий для здоров'я людини.

Сірчистий газ (SO_2) і сірководень (H_2S) роблять сильну подразнюючу дію на слизові оболонки очей та органів нюху. Гублять рослини, руйнують хлорофіл, викликають загибель клітин, змінюють колоїдний стан протоплазми, збільшують її дисперсність і зменшують гігроскопічність тканин.

Вуглеводні (C_xH_y). Вуглеводні токсичні, під дією сонячного світла додатково вступають в реакції з оксидами азоту (N_xO_y), утворюючи озон (O_3)

і перекису (H_xO_y , H_xN). Останні викликають роздратування очей, горла, носа, гублять рослини.

Канцерогенні речовини. До числа особливо небезпечних канцерогенних речовин в ВГ слід віднести бенз- α -пірен і ряд інших.

Сажа (C_x) - дрібний пил, засмічує дихальні шляхи, дратує їх і може стати причиною хронічних захворювань. Головна небезпека сажі полягає в тому, що на її поверхні адсорбуються токсичні і канцерогенні речовини [9].

1.3. Утворення та шляхи зниження токсичних речовин в дизелях

Специфічною особливістю процесу згоряння в дизелях, визначальною і ускладнюючою в значній мірі вивчення механізму, утворення токсичних речовин, є наявність гетерогенної суміші. У цьому випадку на відміну від бензинових двигунів, в яких суміш гомогенна, виникає ряд додаткових питань, пов'язаних з випаровуванням і згорянням крапель рідкого палива, з їх самозайманням, з утворенням випаровуванням і згорянням розпиленого струменя, з утворенням турбулентності всередині камери згоряння і ін.

До цього необхідно додати, що процеси згоряння і утворення токсичних речовин значною мірою визначаються також способом сумішоутворення, що залежать від конструкції камери згорання.

До токсичних речовин дизеля відносяться, перш за все, оксиди азоту, сажа, а також незгорілі вуглеводні, окис вуглецю, альдегіди; неприємно впливає на людину також запах відпрацьованих газів [10].

1.3.1. Утворення токсичних речовин в процесі згорання палива

Процес згорання в дизелі - є ряд послідовних, впливаючих одна на одну і взаємовиявляючих стадій розвитку горіння палива.

Простежимо цей процес з точки зору утворення токсичних речовин [11].

Затримка займання. Як уже зазначалося, характерною особливістю процесу згорання в дизелях є наявність в камері згорання численних осередків займання, що утворюються в гетерогенній суміші. Тривалість затримки займання безпосередньо впливає на процес згорання, зокрема на жорсткість роботи двигуна, температуру і тиск циклу.

Предполум'яні процеси, які відбуваються в даний період, умовно поділяють на фізичні і хімічні. До перших відносять розрив струменя і утворення дрібних крапель, підігрів рідкого палива і його випаровування, дифузію парів палива в поряд знаходжувальні шари повітря, утворення суміші.

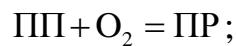
До хімічних факторів відносять процес розкладання важких вуглеводнів на легкі фракції, власне хімічні предполум'яні реакції між продуктами розкладання (розпаду) і киснем [12].

Мабуть, деякі з перерахованих процесів протікають паралельно, однак можна стверджувати, що фізичні процеси передують хімічним.

У період затримки запалення утворюються альдегіди і пероксиди, при цьому концентрація їх з часом збільшується, досягаючи максимальних значень у момент займання (зростання тиску).

Таким чином, предполум'яні процеси, що протікають досить повільно, сприяють утворенню проміжних складових – альдегідів і пероксидів і виникненню дуже швидких реакцій, що викликають самозаймання.

У початковий період реакцію між паливом і киснем, яка надає проміжні речовини, можна представити у вигляді:



де ПП - пари палива; ПР - проміжні речовини.

Тоді швидкість утворення проміжних складових буде:

$$\frac{d[\text{ПР}]}{dt} = k[\text{ПП}]^n [\text{O}_2]^m,$$

де k – константа реакції;

n и m – експоненти.

Постійна k може залежати від загальної енергії активації E :

$$k = c_1 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

і так як займання паливо-повітряної суміші відбувається в порівняно вузьких межах, можна отримати постійні концентрації $[\text{ПП}]$ і $[\text{O}_2]$ для яких

$$\frac{d[\text{ПР}]}{dt} = c_2 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

Критична концентрація проміжних речовин, що дають початок швидких реакцій, може вважатися постійною і залежить тільки від геометрії камери згоряння. Тому період затримки займання може бути визначений з формули

$$\tau = c_3 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

де c_3 – константа, що залежить від конструкції камери згоряння

При визначенні загальної енергії активації було помічено, що із зростанням цетанового числа вона зменшується (для палив з цетановим числом 57,5; 37,5 і 18 енергія активації склала відповідно 12,2; 24,2; 34,2 кДж/моль).

Випаровування палива. Крапля рідкого палива під час руху від розпилювача форсунки до стінок камери згоряння посередництвом конвекції нагрівається, потім випаровується, зменшуючись у розмірі [10].

Краплі меншого діаметру, значно віддалені від розпилювача (периферійні) і оточені відносно більшою масою повітря, інтенсивніше підігріваються і випаровуються.

Внаслідок великої різниці температур між рідиною і навколишнім повітрям процес теплопередачі проходить дуже швидко. Таким чином, місцевий стрибок температур відбувається в зоні, багатій краплями малих діаметрів, які встигають повністю випаруватися за дуже короткий проміжок часу – 0,3...0,4 мс (час, на протязі якого крапля проходить від розпилювача до стінок камери згоряння). Краплі великого діаметру за цей період часу випаровуються лише частково.

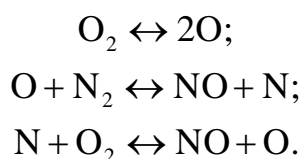
Співвідношення між кількістю крапель великих і малих діаметрів залежить від геометрії розпилювача (відношення довжини до діаметру), тиску повітря в циліндрі, тиску уприскування і від температури.

Великий вплив на процес випаровування і згоряння дизельного палива має також місцевий розподіл коефіцієнта надлишку повітря в струмені уприснутого в циліндр палива [11-13].

1.3.2. Особливості утворення окислів азоту

У процесі згорання в зонах розпаду (ділення) струменя палива утворюються окислі азоту, причому концентрація їх в різних місцях неоднакова [14].

Механізм утворення NO, відповідно до схеми Я. Б. Зельдовіча, протікає в такій послідовності;



Відповідно з раніше розглянутим механізмом утворення NO атоми азоту не є початком ланцюгових реакцій, так як рівноважна концентрація під час згорання значно нижче рівноважної концентрації атомів кисню. Тому в дизелі утворення NO в струмені палива залежить від локальних концентрацій атомів кисню. У зоні гасіння протягом першої стадії згорання NO не утворюється, однак зі зростанням температури, внаслідок згорання інших зон розпиленого струменя можливе утворення NO і в районах гасіння з дуже бідною сумішшю. У зоні бідної суміші умови утворення NO більш сприятливі, тому що в цій зоні починається горіння і час післяполум'яного процесу більше. Збільшення температури внаслідок згорання палива в серцевині струменя сприяє утворенню NO в зонах гасіння і бідній суміші і може привести до утворення NO в центрі струменя. У дизелях зниження температури в процесі розширення «заморожує» концентрації NO при найбільших їх значеннях. На утворення окису азоту впливає ряд факторів, основні з яких наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Вплив різних факторів на утворення NO

Найменування фактора	Вимога до зменшення NO
Коефіцієнт надлишку повітря	↑
Момент уприскування палива	↓
Частота обертання валу	↑
Цетанове число палива	↑
Температура свіжого заряду	↓
Вологість повітря	↑
Навантаження двигуна	↓

Зволоження повітря шляхом вприскування води у впускний колектор дозволяє істотно знизити вміст NO в відпрацьованих газах. Вода може бути введена в циліндр двигуна також разом з паливом. Однак в цьому випадку збільшується затримка займання палива, що призводить до необхідності збільшувати кут випередження вприскування. Тому перевага віддається першому способу [15].

При уприскуванні води у впускний трубопровід утворюється добре підігріта гомогенна суміш. Так як маса парів води мала в порівнянні з масою повітря, то вона не може істотно зменшити температуру в момент уприскування палива, і період затримки займання залишається незмінним.

При уприскуванні емульгованого водою палива процес випаровування відбувається в кінці стиснення і в процесі згоряння, споживаючи для цього значну кількість теплоти. Останнє призводить, як уже зазначалося, до падіння температури і зростанню затримки займання.

Дослідження показали, що при уприскуванні води в кількості 50% від витрати палива, викид NO зменшився в два рази. Добавка води викликає, однак, збільшення викиду CO і CH у двигунах з нерозділеним і розділеними камерами згоряння.

1.3.3. Особливості утворення незгорілих вуглеводнів

Як уже зазначалося, незгорілі вуглеводні утворюються в останній фазі уприснутого в циліндр двигуна палива, в гирлі розпилувача при підтеканні палива в момент відсічення, на стінках камери згоряння (циліндра), в зоні гасіння.

Розглянемо вплив основних факторів на виділення CH.

Коефіцієнт надлишку повітря в дизелях в значній мірі залежить від навантаження двигуна, оскільки остання регулюється зміною кількості уприснуто в циліндр двигуна палива. Це призводить до суттєвих змін розподілу палива в струмені, кількості палива, обложеного на стінках циліндра, тиску і температури газів в циліндрі, тривалості уприскування. Збагачення суміші веде до зменшення палива в периферійній зоні струменя і до зростання його в центральній зоні, а також на стінках камери згоряння.

Збільшення циклової подачі палива - при постійному куті випередження впорскування - призводить до збільшення періоду запізнювання кінця подачі палива, зменшуючи тим самим час, необхідний для реакції окислення пізніше вприснутої частини палива; одночасно зменшується концентрація кисню. Однак більш висока температура сприяє окисленню незгорілих вуглеводнів.

На режимі холостого ходу і дуже малих навантаженнях паливо не потрапляє на стінки і його концентрація в центральній частині струменя мала. При цьому вуглеводні утворюються здебільшого в зоні гасіння полум'я: в наступний момент вони не можуть окислюватися через низьку температуру.

Зі збільшенням навантаження збільшуються концентрація палива в центральній частині струменя і на стінках, а також його температура. Це сприяє більш інтенсивному окислюванню палива; кількість СН при цьому зменшується. Таким чином, зниження призводить до зменшення виділень вуглеводнів.

При збільшенні кута випередження впорскування концентрація СН зростає внаслідок розширення зони гасіння в умовах більш інтенсивного осідання палива на стінках камери згоряння.

Турбулентність повітря в дизелі з нерозділеною камерою згоряння, покращує процес сумішоутворення, призводить до більш повного окислювання палива, зменшуючи тим самим викид СН.

Однак надмірна турбулентність може привести до зворотного ефекту (через збільшення зони гасіння).

Тут доречно також підкреслити, що турбулентність в значній мірі визначається геометрією камери згоряння і впускних органів двигуна.

На концентрацію СН великий вплив робить геометрія розпилювача форсунки, зокрема обсяг рідкого палива, укладений між запірною голкою форсунки і сопловими отворами. Чим менше цей обсяг, тим нижче концентрація СН у відпрацьованих газах. Дійсно, що знаходиться в цьому просторі паливо під дією температури газів в циліндрі, підігриваючись, розширюється, виходить назовні і випаровується. Однак згоріти повністю це паливо не може, так як, увійшовши в камеру згоряння занадто пізно (в кінці розширення), викидається незгорівшим в вихлопну систему двигуна.

1.3.4. Особливості утворення окису вуглецю

Постійний надлишок кисню в робочій суміші дизеля зумовлює для дизелів дуже низький викид СО у відпрацьованих газах як в двигунах з нерозділеною камерою згоряння, так і з розділеною.

На часткових навантаженнях СО утворюється між зоною гасіння і зоною бідного полум'я, при великих навантаженнях – в центральній частині струменя, в зоні після впорскування і в паливі, яке осіло на стінках камери.

У двигунах з наддувом великі значення СО мають місце при меншому коефіцієнті надлишку повітря α , тобто при більшому навантаженні, а в двигуні без наддуву спостерігається зворотна закономірність.

1.3.5. Особливості утворення альдегідів

Альдегіди можуть утворюватися в дизелях серед проміжних складових реакцій окислення.

У дизелі альдегіди присутні у високих концентраціях навколо центрів горіння в зоні, холодного полум'я (бідного полум'я) перед займанням. Згодом вони згорають від проходження фронту полум'я.

У зоні гасіння концентрація альдегідів невелика. Вони так само, як і незгорілі вуглеводні, можуть бути повністю усунені при збільшенні температури внаслідок згорання решти струменя і наявності кисню.

Концентрація альдегідів має тенденцію до зростання на режимах холостого ходу і повного навантаження, а також при більшій частоті обертання [14].

1.3.6. Димність відпрацьованих газів

У відпрацьованих газах дизеля розрізняють дим чорний (або гарячий), білий (або холодний) і блакитний.

Білий дим з'являється безпосередньо після запуску холодного двигуна і складається з крапельок недогорілого або частково згорілого палива.

Іноді з'являється блакитний дим. Його склад приблизно такий же, як і білого диму, за винятком випадку, коли в камері згорання з'являється надлишок згорілого масла. Білий дим, дратівливо діючий на носоглотку і очі людини, не припиняється відразу ж після прогріву двигуна. Він може існувати внаслідок дуже низької температури або дуже великого періоду затримки займання.

Чорний дим на 75...95% складається з вуглецю сажі та інших твердих продуктів згоряння.

Крім інших факторів, які будуть розглянуті нижче, утворення чорного диму в дизелі сприяє поганий технічний стан двигуна. Це, перш за все, порушення затяжки пружини голки форсунки, засмічення повітряного фільтру, падіння тиску в циліндрі наприкінці стиснення через зношені або поламані кільця і ін.

Як уже зазначалося, специфічною особливістю процесу згоряння в дизелі є наявність гетерогенної суміші. Тому згоряння здебільшого палива відбувається в полум'ї турбулентної дифузії, яка утворює вуглець (сажу).

Частина вуглецю може горіти або в період основної фази згоряння, або на початку фази розширення, коли температура газів ще досить висока.

Дим утворюється в локальних зонах з малим коефіцієнтом надлишку повітря. У всіх точках камери згоряння, де паливо горить з $\alpha < 1,5$ і при існуючому в дизелі тиску, утворюється сажа в вигляді дрібних частинок. Діаметри таких частинок, визначених за допомогою фотографій електронного мікроскопа, складають 0,01...0,04 мкм (інші методи вимірювання дають величини, на порядок відрізняючись від наведених).

На утворення диму суттєво впливає цілий ряд факторів. Це, перш за все, тривалість і кут випередження впорскування палива, турбулентність повітря, вид палива, конфігурація соплових отворів форсунки і ін.

Зменшення тривалості упорскування, а, отже, збільшення кількості упорскнутого палива в початковій фазі знижує димність газів.

При розтягнутому уприскуванні зростає процентний вміст палива, що згорає в дифузійному полум'ї. Останнє призводить до зростання викиду сажі.

Момент уприскування впливає, крім того, на температуру згоряння. Запізнення його веде до зниження температури, що зменшує утворення сажі. Таким чином, зростання температури, що є наслідком горіння великої

кількості палива в дифузійному полум'ї, сприяє димності вихлопу . При цьому час (залежне від кінетики процесу), необхідний для згорання вуглецю, більше часу, необхідного для його утворення.

Дійсно, утворення і згорання вуглецю має місце тільки протягом фази горіння, а згорання вуглецю продовжується і на початку фази розширення. Це свідчить про те, що швидкість утворення вуглецю визначає рівень димності випускних газів. Знижуючи температуру згорання, можна істотно зменшити димність відпрацьованих газів, застосовуючи для цих цілей, наприклад, уприскування води. Таким чином, реакція утворення вугілля в дизелі може розглядатися як швидка реакція при високій температурі [12].

Турбулентність повітря, покращуючи сумішоутворення палива з займистою частиною заряду, гомогенезує суміш, зменшуючи при цьому кількість палива, яка бере участь в процесі утворення сажі [15].

Про вплив летючості палива на утворення чорного диму існують суперечливі судження. З одного боку, чисто фізичної, летючість палива повинна покращувати сумішоутворення паливо-воздушної суміші, з іншого - зміна летючості часто супроводжується зміною хімічної природи палива. Тому виявлення в чистому вигляді, який з цих двох чинників є визначальним, пов'язане з певними труднощами.

1.4. Аналіз способів і засобів зниження токсичності випускних газів дизельного двигуна

Способи і засоби для зниження токсичності шкідливих речовин, що входять до складу ВГ дизельного двигуна, можна розділити за двома напрямками на три основні групи (рис. 1.1).

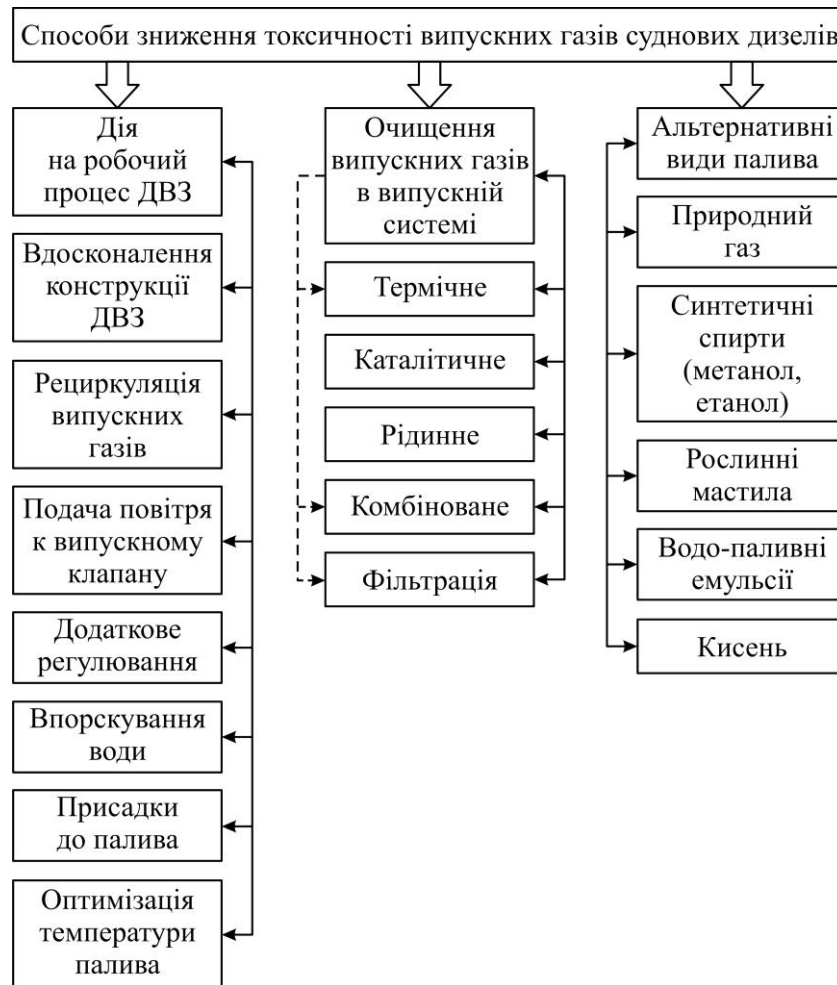


Рис. 1.1. Способи та засоби зниження токсичності шкідливих речовин у випускних газах дизельних двигунів

1.5. Висновки за розділом 1

В результаті виконаного літературного пошуку щодо проблеми утворення та пошуку шляхів зниження токсичних речовин в випускних газах суднових двигунів внутрішнього згоряння зробимо наступні висновки.

1. Судна морського та внутрішнього водного транспорту є важливим компонентом транспорту всіх країн, що здійснюють перевезення вантажів і пасажирів міжнародними морськими і внутрішніми водними шляхами.

Результатом експлуатації суден є не тільки отримання комерційного прибутку, але і несприятливий вплив на навколишнє середовище. Вагому роль у забрудненні навколишнього середовища з морських і річкових суден грають суднові енергетичні установки та двигуни внутрішнього згоряння, які виконують функції головних або допоміжних двигунів.

2. В результаті вчинення кругового робочого циклу судновий дизель викидає в атмосферу випускні гази, які містять у своєму складі шкідливі речовини, що є токсичними компонентами.

3. Екологічні параметри роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту регламентуються вимогами міжнародних конвенцій і резолюцій, зокрема конвенції МАРПОЛ, тому забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів та підвищення екологічної ефективності суден є актуальним завданням.

4. Існуючі технічні рішення, спрямовані на підвищення екологічної ефективності суден шляхом зменшення шкідливих викидів в ВГ дизелів, можна розділити на три основні групи:

- 1) вплив на робочий процес двигуна;
- 2) очищення випускних газів у випускній системі двигуна;
- 3) застосування альтернативних палив.

5. Найбільш негативний вплив на довкілля та людину оказує оксиди азоту.

2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Процес наукового пізнання

Наукове пізнання починається із спостереження навколишньої дійсності – природи, техніки, технологій і т.і. Процес наукового пізнання включає, щонайменше, п'ять етапів: спостереження, вивчення, дослідження, апробацію й підтвердження [16].

На етапі спостереження дослідник накопичує інформацію про явища й процеси навколишньої дійсності, не впливаючи на неї. Спочатку формується загальне враження про пізнаванність явищ або процесів, потім здійснюється угруповання фактів дійсності за певними важливими ознаками з наступним виділенням із цих груп проблемних (не зрозумілих або не очевидних) фактів дійсності [17].

Етап вивчення необхідний для вибору найбільш актуальної, принципової й вчасно розв'язуваної в результаті наступних досліджень, наукової проблеми або завдання. При цьому необхідно спочатку спланувати й систематизувати дослідження в цьому напрямку.

Об'єктом наукового дослідження є процес, явище, матеріальна або ідеальна система. Предмет дослідження – це параметри внутрісистемної структури.

Для посилення цілеспрямованості дослідження уточнюються його мета й завдання.

Головне завдання дослідження спрямоване на встановлення умов досягнення мети після одержання нових наукових результатів, що є наслідком рішення ряду допоміжних наукових завдань. При постановці головного завдання дослідження виходять із необхідності доказу реальності передбачуваної наукової новизни [18].

Передбачувана наукова новизна представляє нову ідею, гіпотезу, закономірність або наукову тезу про шляхи досягнення поставленої мети.

Процес рішення головного завдання традиційно розділяється на ряд самостійних допоміжних завдань, результати рішення яких мають елементи наукової новизни. Наукові результати надалі використовуються при доказі передбачуваної наукової новизни дослідження [19].

Наукове дослідження є процесом виробітку нових наукових знань, одним з видів пізнавальної діяльності. Наукове дослідження характеризується об'єктивністю, відтворюваністю, доказовістю й точністю, що може по різному визначатися в різних галузях науки.

На етапі апробації відбувається обговорення постановки, методології й результатів досліджень на різних рівнях: науково-технічних семінарах, конференціях, симпозіумах, наукових і координаційних радах і т.п.

Етап підтвердження припускає закінчення процедур апробації й публікації доказів і підтверджень у вигляді наукових положень і наукових результатів досліджень на підставі оцінки їхніх переваг і недоліків відповідно до вимог до висновки з наукової праці.

Одним з важливих елементів підтвердження є впровадження. Під ним розуміють імплементацію нових видів конструкцій, матеріалів, прогресивних технологій із застосуванням нових механізмів, пристосувань і т.д.

2.2. Методологічні принципи наукових досліджень

З філософської точки зору методологія – це навчання про формування пізнання й перетворення дійсності, застосування принципів світогляду до процесу пізнання, духовній творчості й практиці.

Метод – це послідовність дії для досягнення якої-небудь мети, рішення конкретного завдання, сукупність прийомів або операцій практичного або теоретичного пізнання дійсності.

Пристаючи до наукового пошуку доцільно розробити технологічну карту дослідження (рис. 2.1).

2.3. Обґрунтування мети і завдань дослідження

Важливість проведення досліджень, пов'язаних з питаннями зниження токсичності відпрацьованих газів судових дизелів, підтверджується програмою економічних реформ, що проводяться в Україні, а також Транспортною стратегією України на період до 2030 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України №2174-р від 20 жовтня 2022 р.).

Однією з цілей цих документів в області розвитку транспортного сектора економіки України на період до 2030 року, є модернізація транспортної інфраструктури і рухомого складу для забезпечення зростаючої мобільності населення та товаропотоків, забезпечення конкурентоспроможних та якісних транспортних послуг, підвищення екологічної і енергетичної ефективності транспортних процесів та безпеки перевезень пасажирів і вантажів.

Крім того, проведення подібних досліджень узгоджується з вимогами резолюцій МЕРС.203 (62) і МЕРС.213 (63) Міжнародної морської організації про введення нових правил енергетичної ефективності суден і про розробку плану енергетичної ефективності судна. В останній, зокрема, в якості одного із способів підвищення енергетичної ефективності розглядається вдосконалення процесу використання палива.

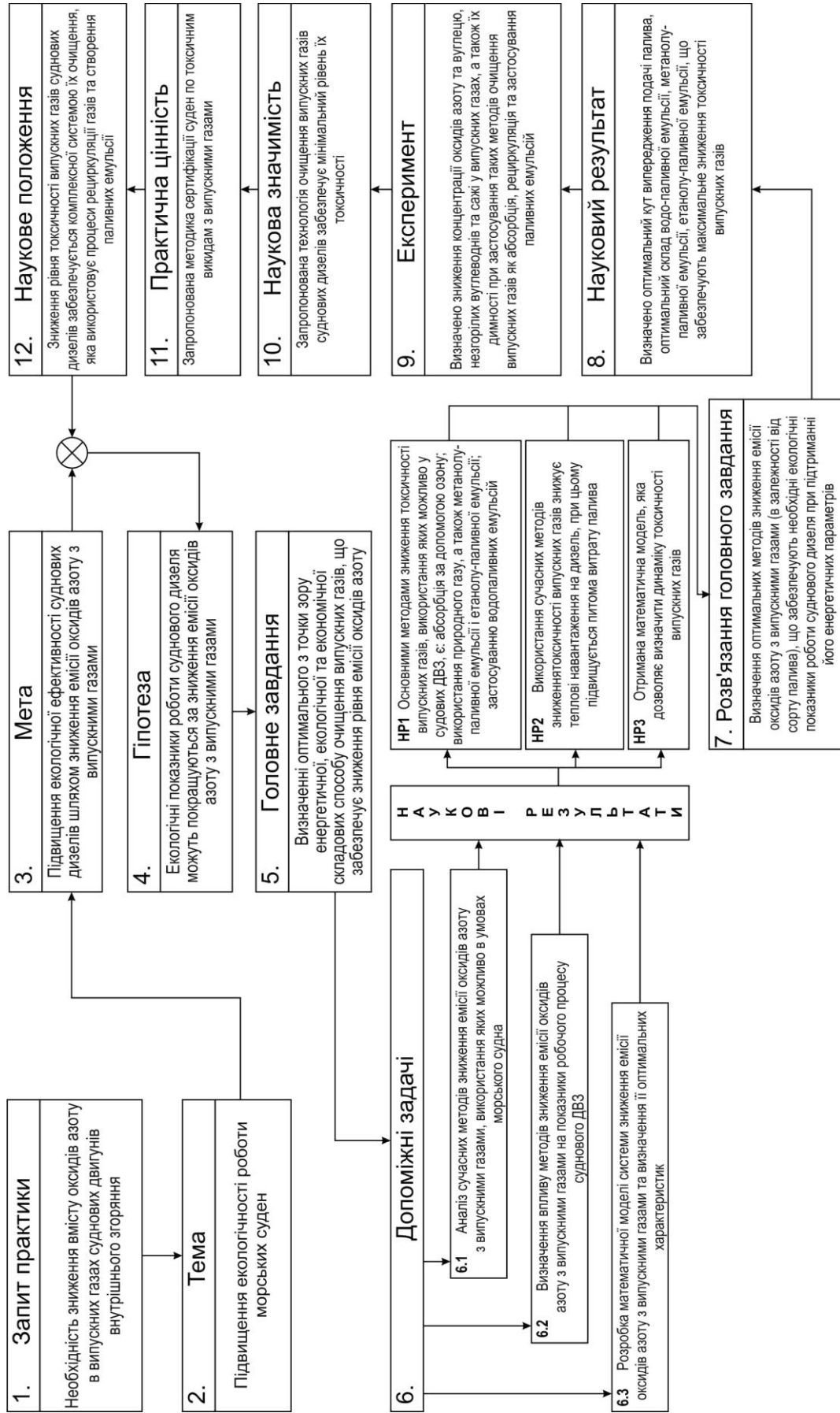


Рис. 2.1 – Технологічна карта наукового дослідження

Як об'єкт дослідження обрано процес випуску відпрацьованих газів судових двигунів внутрішнього згорання.

Предметом дослідження є процес зниження емісії оксидів азоту з випускними газами судових дизелів.

Актуальність теми дослідження базується на запиті практики про необхідність підвищення екологічної ефективності зокрема зниження вмісту оксидів азоту в випускних газах судових двигунів внутрішнього згорання.

З огляду на тему дипломної роботи, була сформульована мета дослідження, якою є підвищення екологічної ефективності судових дизелів шляхом зниження емісії оксидів азоту з випускними газами.

Гіпотеза наукового дослідження полягає в тому, що екологічні показники роботи судового дизеля можуть покращуватися за рахунок використання очищення випускних газів від токсичних складових.

Головне завдання дисертаційного дослідження полягає у визначенні оптимального з точки зору енергетичної, екологічної та економічної складових способу очищення випускних газів, що забезпечує зниження рівня їх токсичності.

Для розв'язання головного завдання необхідне рішення ряду допоміжних завдань, а саме:

- 1) аналіз сучасних методів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами, використання яких можливо в умовах морського судна;
- 2) визначення впливу методів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами на показники робочого процесу судового ДВЗ;
- 3) розробка математичної моделі системи зниження емісії оксидів азоту з випускними газами та визначення її оптимальних характеристик.

При розв'язанні кожної допоміжної завдання отримані відповідні наукові результати, а саме:

- 1) основними методами зниження емісії оксидів азоту з випускними газами, використання яких можливо у судових ДВЗ, є: абсорбція за

допомогою озону; використання природного газу, а також метанолу-паливної емульсії і етанолу-паливної емульсії; застосуванню водопаливних емульсій;

2) використання сучасних методів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами знижує теплові навантаження на дизель, при цьому підвищується питома витрата палива;

3) отримана математична модель, яка дозволяє визначити динаміку зміни емісії оксидів азоту з випускними газами.

Розв'язання головного завдання дисертаційного дослідження виконано шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань. Його результатом є визначення оптимальних методів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами (в залежності від сорту палива), що забезпечують необхідні екологічні показники роботи суднового дизеля при підтриманні його енергетичних параметрів.

2.3. Висновки за розділом 2

1. В результаті вибору теми дослідження за ознаками: важливості, актуальності, наукової новизни, економічності, відповідності профілю спеціальності, результатів досліджень і ряду наукових напрямків, пов'язаних з забезпеченням екологічних та економічних показників роботи суднових дизелів, сформульована тема, спрямована на пошук варіантів зниження токсичності випускних газів суднових дизелів.

Об'єкт дослідження процес випуску відпрацьованих газів суднових двигунів внутрішнього згорання.

Предмет дослідження – є процес зниження емісії оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів.

2. Сформульовано науково методологічний підхід до процесу зниження токсичності випускних газів суднових дизелів.

3. Головним завданням дослідження є визначення оптимального з точки зору енергетичної, екологічної та економічної складових способу очищення випускних газів, що забезпечує зниження емісії оксидів азоту.

4. Сформульована технологічна карта наукового досліджень, яка враховує запит практики на необхідність підвищення екологічної ефективності суднових двигунів внутрішнього згорання та забезпечує розв'язання головного завдання дослідження.

3. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Третій розділ магістерського наукового дослідження присвячено розв'язанню першого та другого допоміжного завдання, а саме:

- аналізу сучасних методів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами, використання яких можливо в умовах морського судна;
- визначенню впливу методів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами на показники робочого процесу суднового ДВЗ

3.1. Загальні тенденції зниження емісії оксидів азоту суднових дизелів

Інтенсивний розвиток судноплавства призвів до будівництва суден, оснащених потужними енергетичними установками. Експлуатація таких суден супроводжується не тільки суттєвими втратами маси і енергії під час спалювання палива, але і значним забрудненням довкілля.

Актуальність теми даного дослідження визначається посиленням норм викидів оксидів азоту з продуктами згорання суднового палива; введенням нової редакції додатка VI «Правила запобігання забруднення повітряного середовища з суден» Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (MARPOL 73/78), що вимагає негайних заходів для приведення токсичних викидів з суден у відповідність з введеними нормами за рахунок впровадження нових технічних рішень в судові системи очищення. Аналіз існуючих в даний час систем нейтралізації токсичних компонентів відпрацьованих газів, а також заходів, спрямованих на підвищення

екологічної безпеки двигунів внутрішнього згоряння показує, що технології зниження викидів NO_x пов'язані з подорожчанням вартості виготовлення двигунів і зростанням виробничих витрат на їх обслуговування. У таблиці 3.1 наведені дані, що показують зростання вартості виробництва малотоксичного дизеля, в порівнянні з базовим двигуном. Як видно з представлених даних, наведених закордонними дослідниками, збільшення вартості дизеля може досягати 250 % [20].

Таблиця 3.1. Технології зниження NO_x і додаткові витрати на їх реалізацію

Альтернативні технології	Рівень NO_x , %	Вартість по відношенню до базової, %
Дизельні двигуни з турбонаддувом	100	100
Дизельні двигуни з турбонаддувом, подачею палива при високому тиску	85	130
Дизельні двигуни з турбонаддувом, електронним управлінням подачею палива і фазами газорозподілу	65	150
Дизельні двигуни з турбонаддувом, електронним управлінням подачею палива і фазами газорозподілу, і рециркуляцією відпрацьованих газів	40	180
Газові двигуни з форкамерно-факельним запалюванням і наддувом «бідної суміші»	30	200
Дизельні і газові двигуни з системою очищення газів (селективне каталітичне відновлення, плазмовий реактор, трикомпонентний нейтралізатор)	10	250

3.2. Використання природного газу, рециркуляції відпрацьованих газів, метанолу-паливної емульсії і етанолу-паливної емульсії

На фоні незбiжного збiльшення цiн на нафтопродукти i погiршення екологiчної обстановки, пов'язаною, перш за все, зi збiльшенням кiлькостi, енергоустановок, що працюють на рiдкому нафтовому паливi, стає посилене впровадження альтернативних джерел енергiї [21]. Для пiдтвердження цього були виконанi дослiдження щодо полiпшення екологiчних показникiв дизеля 4Ч11,0/12,5 при застосуваннi в якостi палива природного газу (ПГ), рециркуляцiї вiдпрацьованих газiв (РВГ), використанню метанолу-паливної емульсiї (МПЕ) i етанолу-паливної емульсiї (ЕПЕ) [22].

Експериментальна гальмiвна установка включала електро-гальмовий стенд SAK-N670 з балансуючою маятниковою машиною, дизель 4Ч11,0/12,5, вимiрювальну апаратуру, балонне обладнання, обладнання для приготування емульсiї (гомогенiзатор), систему РВГ. Вiдбiр i аналiз проб ВГ проводився на автоматичнiй системi газового аналізу АСГА-Т. Для проведення стендових випробувань на ПГ (20% запальна порцiя дизельного палива (ДП) i 80 % – ПГ) була використана мобiльна заправна станцiя i газобалонне обладнання [23].

За результатами дослiджень стабiльностi МПЕ i ЕП визначено, що емульсiї зi концентрацiєю спирту 50 % оптимальнi, з точки зору стiйкостi до процесiв руйнування. Це пов'язано з граничним пiдвищенням концентрацiї спирту в емульсiї, яка в даному випадку переходить зi «зворотної» в «пряму», що унеможливорює займання такого палива в цилiндрi дизеля. Це було пiдтверджено в ходi первинних випробувань на двигунi. Для всiх дослiджуваних проб МПЕ i ЕПЕ визначалася стабiльнiсть до процесу коалесценцiї, який характеризується часом до повного подiлу проби на вуглеводневу i спиртову фази. В результатi проведених дослiджень

стабільності і попередніх випробувань на дизелі як оптимальні були прийняті емульсії наступного складу:

- МПЕ: метанол – 25 %, миюча-диспергуюча присадка сукцинімід С-5А – 0,5 %, вода – 7%, ДП – 67,5 %;

- ЕТЕ: етанол – 25 %, миюча-диспергуюча присадка сукцинімід С-5А – 0,5 %, вода – 7%, ДП – 67,5 %.

Незважаючи на високі результати стабільності при досліджуванні МПЕ і ЕПЕ, використання емульсій з великим вмістом метанолу і етанолу неможливо в зв'язку з підвищеною «жорсткістю» роботи дизеля і пропусками займання при його роботі.

Регульовальні характеристики в залежності від зміни установочного кута випередження впорскування палива (КВВП) дизеля 4Ч11,0/12,5 на частоті обертання 2200 хв^{-1} (номінальний швидкісний режим) для потужних і економічних показників представлені на рис. 3.1.

Аналіз графіків, відповідних роботі газодизельного і газодизельного з РВГ процесів, показує, що при роботі по газодизельному і газодизельному з РВГ процесам інсталяційний КВВП за умовою найкращої економічності становить $\theta_{\text{впр}}=23^\circ$. Часова витрата палива при газодизельному процесі і $\theta_{\text{впр}}=23^\circ$ становить 11,4 кг/год, а для газодизельного процесу з 10%-ою РВГ – 11,7 кг/год, що більше на 2,8 %. Питома ефективна витрата палива при $\theta_{\text{впр}}=23^\circ$ становить 205 г/(кВт/год), а при газодизельному процесі з 10%-ою РВГ – 211 г/(кВт/год), що вище на 2,8 %. При збільшенні і зменшенні КВВП на газодизельному процесі з РВГ відбувається зростання питомої ефективної витрати палива.

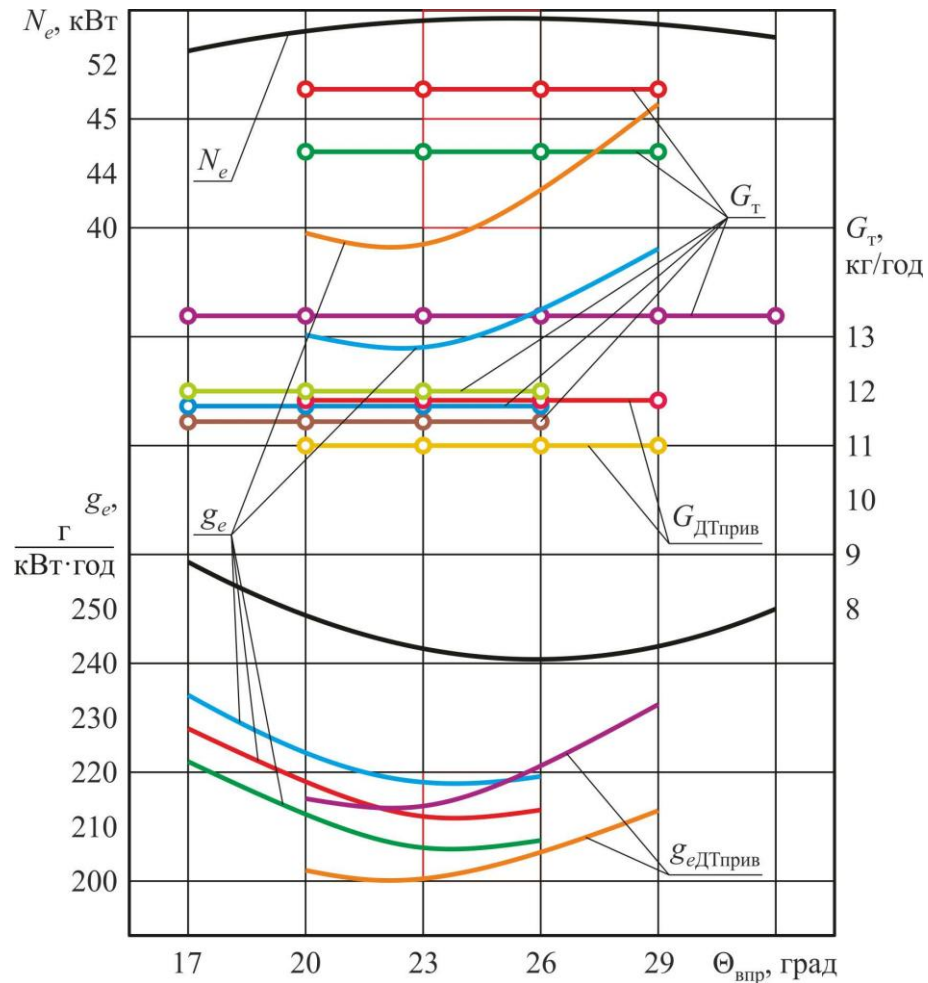


Рис. 3.1. Вплив застосування ПГ і РВГ, МПЕ і ЕПЕ на показники потужності та економічні показники дизеля 4Ч11,0/12,5 в залежності від зміни установочного КВВП при $n=2200 \text{ хв}^{-1}$:

—○— — дизельний процес; —○—○— — газодизельний процес;

×-...-× — газодизельний і РВГ 10%; ▽-...-▽ — газодизельний і РВГ 20 %;

○-...-○ — ЕПЕ; ●-...-● — МПЕ

Аналізуючи графіки роботи дизеля 4Ч11,0/12,5 на МПЕ і ЕПЕ можна констатувати, що при $\theta_{\text{впр}}=23^\circ$ досягаються дизеля 4Ч11,0/12,5 також мінімальні значення питомої ефективної витрати для МПЕ і ЕПЕ і питомої ефективної витрати ДП в складі емульсії. Тут можна відзначити, що менше тепло згорання емульсії в порівнянні з ДП веде до підвищення значень годинної і питомої витрат палива. Таким чином, на установочому КВВП

$\theta_{\text{впр}}=23^\circ$ і номінальному режиму роботи застосування ПГ і РВГ, МПЕ і ЕПЕ призводить до значень потужнісних і економічних показників роботи дизеля 4Ч11,0/12,5, представлених в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Потужнісні і економічні показники роботи дизеля 4Ч11,0/12,5 на установчому КВВП $\theta_{\text{впр}}=23^\circ$ і номінальному режимі ($n=2200 \text{ хв}^{-1}$)

Дизель 4Ч11,0/12,5	Потужнісні і економічні показники				
	N_e , кВт	g_e , г/(кВт·г)	$g_{e\text{ДТприв}}$, г/(кВт·г)	G_T , кг/г	$G_{T\text{ДТприв}}$, кг/г
Дизельний процес	55,3	243	—	13,4	—
Застосування ПГ		207 (зниження на 14,8%)	—	11,4 (зниження на 14,9%)	—
Застосування ПГ и РВГ (10%)		212 (зниження на 12,8%)	—	11,7 (зниження на 12,7%)	—
Застосування МПЕ		316 (збільшення на 23,1%)	213 (зниження на 12,3%)	17,5 (збільшення на 23,4%)	11,8 (зниження на 11,9%)
Застосування ЕПЕ		297 (збільшення на 18,2%)	200 (зниження на 17,7%)	16,3 (збільшення на 17,8%)	11,0 (зниження на 17,9%)

Вміст токсичних компонентів в ВГ дизеля 4Ч11,0/12,5 в залежності від зміни установочного КВВП для частоти обертання $n=2200 \text{ хв}^{-1}$ представлено на рис. 3.2 [24].

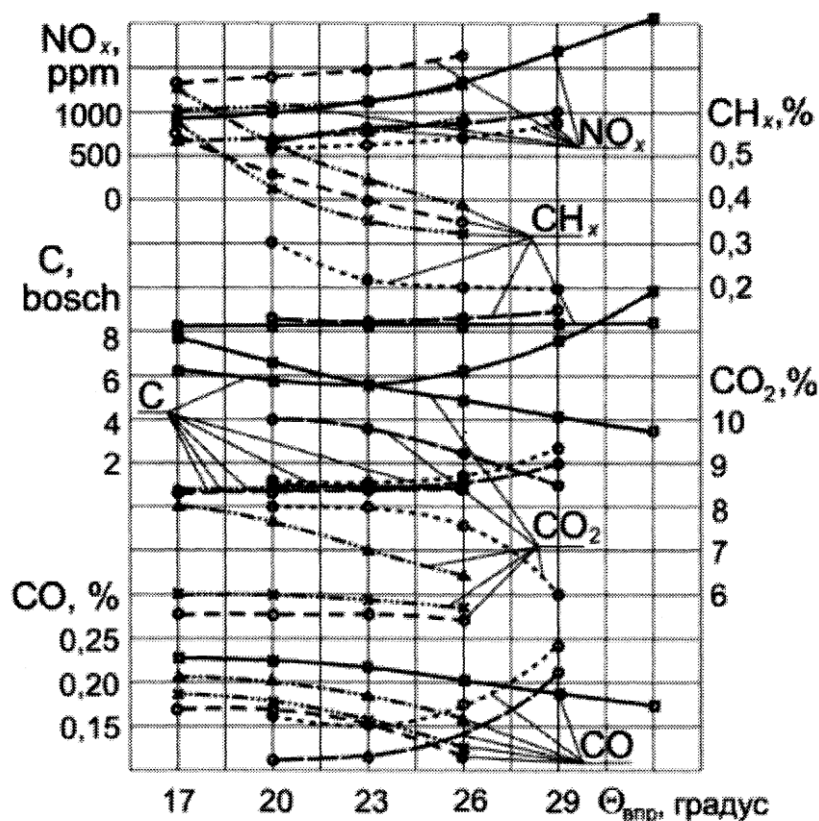


Рис. 3.2. Вплив застосування ПГ і РВГ, МПЕ і ЕПЕ на вміст токсичних компонентів в ВГ дизеля 4Ч11,0/12,5 в залежності від зміни установочного КВВП при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$:

—○— дизельний процес; ○— — — газодизельний процес;

×-...-×- газодизельний і РВГ 10%; ▽-...-▽- газодизельний і РВГ 20%;

○- - - - ЕПЕ; ●- - - - МПЕ

Аналіз графіків, відповідних роботі газодизельного процесу показує, що застосування ПГ призводить до значного зниження вмісту в ВГ сажі, оксиду і діоксиду вуглецю, але викликає зростання сумарних вуглеводнів і оксидів азоту. Застосування РВГ дозволяє повернути вміст оксидів азоту в ВГ на рівень дизельного процесу. Так при роботі газодизеля з 10%-ою РВГ при $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$ вміст NO_x в ВГ становить 1100 ppm, що нижче на 24,1% ніж при роботі дизеля на ПГ.

Аналіз змісту сажі в відпрацьованих газах при роботі по газодизельному процесі з РВГ і без неї доводить, що при збільшенні установочного кута випередження впорскування палива вміст сажі практично не зростає. Концентрації сажі при газодизельному процесі з РВГ і без неї нижче дизельного процесу в 4...5 разів. Вміст CO і CO₂ при роботі по газодизельному процесі з РВГ також зменшується.

Вміст оксидів азоту NO_x в ВГ дизеля при роботі на МПЕ і ЕПЕ на всіх настановних КВВП менше, ніж при роботі на ДП Застосування МПЕ і ЕПЕ також дозволяє значно знизити вміст сажі, оксиду і діоксиду вуглецю в ВГ дизеля (таблиця 3.3).

Таким чином, застосування на дизелі 4Ч11,0/12,5 ПГ з РВГ, МПЕ і ЕПЕ дозволяє в достатній мірі знизити вміст в ВГ сажі С, оксидів азоту NO_x, оксиду вуглецю CO і діоксиду вуглецю CO₂ при збереженні потужнісних показників роботи.

3.3. Поліпшення екологічних характеристик дизелів шляхом використання водо-паливних емульсій

Вплив на склад вихлопних газів дизелів завдяки застосуванню нейтралізаторів шкідливих речовин (ШР), фільтрів дисперсних частинок (РМ) малоефективні в силу особливостей процесу дифузійного горіння палив, характерного для цього типу двигунів.

Таблиця 3.3

Показники токсичності і димності ВГ дизеля 4Ч11,0/12,5 на установчому

КВВП $\theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ і номінальному режимі ($n=2200 \text{ хв}^{-1}$)

Дизель 4Ч11,0/12,5	Вміст токсичних компонентів в ВГ				
	Оксиди азоту, NO_x , %	Сажа, С, од. за шкалою Bosch	Діоксид вуглецю, CO_2 , %	Оксид вуглецю, CO , %	Сумарні вуглеводні, CH_x , %
Дизельний процес	1100 ppm	5,8 од. Bosch	10,9%	0,21%	0,11%
Застосування ПГ	1450 ppm (збільшення на 24,1%)	0,9 од. Bosch (зниження в 6,4 рази)	5,6% (зниження на 48,6%)	0,15% (зниження на 28,6%)	0,40% (збільшення в 3,6 рази)
Застосування ПГ і РВГ (10%)	1100 ppm (відповідає ДП)	1,0 од. Bosch (зниження в 5,8 рази)	5,9% (зниження на 45,9%)	0,16% (зниження на 23,8%)	0,36% (збільшення в 3,3 рази)
Застосування МПЕ	775 ppm (зниження на 29,6%)	0,9 од. Bosch (зниження в 6,4 рази)	9,8% (зниження на 10,1%)	0,11% (зниження на 47,6%)	0,22% (збільшення в 2 рази)
Застосування ЕПЕ	657 ppm (зниження на 40,3%)	1,2 од. Bosch (зниження в 4,8 рази)	8,0% (зниження на 26,6%)	0,15% (зниження на 28,6%)	0,12% (збільшення на 8,3%)

Такий тип горіння зумовлює як підвищене сажеутворення, так і більш високу концентрацію сірки в паливі, яка призводить до збільшеного вмісту в ВГ дизелів з'єднань сірки (сірчаного ангідриду, сірчаної кислоти і твердих сульфідів). Обидві ці, обставини зумовлюють прискорене забруднення поверхонь активних елементів нейтралізаторів і фільтрів. В результаті

ефективність засобів нейтралізації ВГ різко знижується. Тому вважаємо за доцільне розробку заходів для поліпшення екологічних характеристик дизелів за рахунок впливу на робочий процес. При цьому впливаючими факторами можуть бути не тільки конструктивні і регульовані параметри двигуна, але й параметри палива: його фізичні і хімічні характеристики (цетанове число, в'язкість, густину, вуглеводневий склад і т.д.).

Зміна фізико-хімічних властивостей палива можлива за рахунок застосування альтернативних палив: чи в чистому вигляді, чи в суміші з традиційним дизельним. Одними з таких палив є водопаливні емульсії (ВПЕ). Властивості ВПЕ залежать від їх складу – кількісного вмісту води в ВПЕ (C_v) і структури – середнього розміру d_{cp} і характеру розподілу крапель води в емульсії за розміром (тобто ступеню однорідності δ – чим менше ця величина, тим вище однорідність). Регулювання значень указаних параметрів на стадії приготування ВПЕ дозволяє керувати характером згорання емульсії, тобто, діяти на характер протікання робочого процесу і, таким чином, на екологічні показники двигуна.

Мета проведеного досліджування: виявити наявність впливу структури ВПЕ на екологічні показники дизеля [25].

Об'єкт дослідження трьох-циліндровий дизель 3ЧН10,5/12 з турбонаддувом, експлуатаційною потужністю 35,0 кВт при 2000 об/хв. Як палива використовувалося дизельне паливо (ДП) і ВПЕ. В разі переходу на роботу з дизельного палива на ВПЕ потужність двигуна знижувалася. Для забезпечення сталості потужнісних характеристик двигуна проводилося перегулювання паливоподавальної апаратури, що забезпечує збільшення циклової подачі палива емульсія приготулялась методом мембранного емульгування з використанням мембран з різним діаметром пір d_n : 0,20 і 0,45 мкм. визначення структури емульсії оцінювалося по двом параметрам:

середній розмір крапель дисперсної фази і їх розподіл за розмірами. Ці параметри вимірювалися візуально за допомогою оптичного мікроскопу.

Отримані два зразка ВПЕ відрізнялися за своїми характеристиками (рис.3.3).

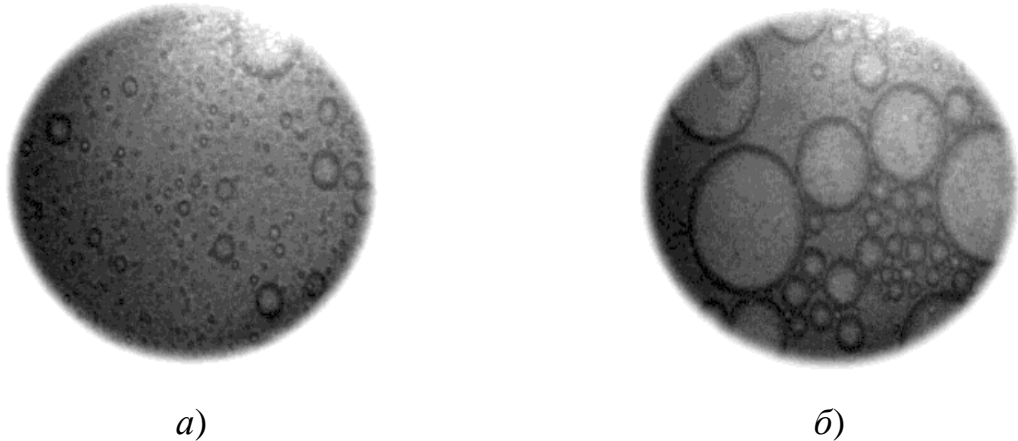


Рис. 3.3. Характер структури водо-паливної емульсії при кількісному змісті води $C_v=17\%$, в залежності від діаметра пір мембрани (d_n , мкм) і ступеня однорідності δ :

$a - d_n=0,2$ мкм, $d_{cp}=0,53$ мкм, $\delta=0,6$; $b - d_n=0,45$ мкм, $d_{cp}=5,5$ мкм, $\delta=0,9$

Результати досліджень показали наступне (рис. 3.4):

- застосування ВПЕ в порівнянні з ДП забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x і сумарних вуглеводнів C_nH_m майже на всьому діапазоні навантажень, причому ступінь зниження в основному пропорційна величині навантаження;

- ВПЕ з меншим розміром крапель води забезпечує більше зниження концентрації C_nH_m в ВГ.

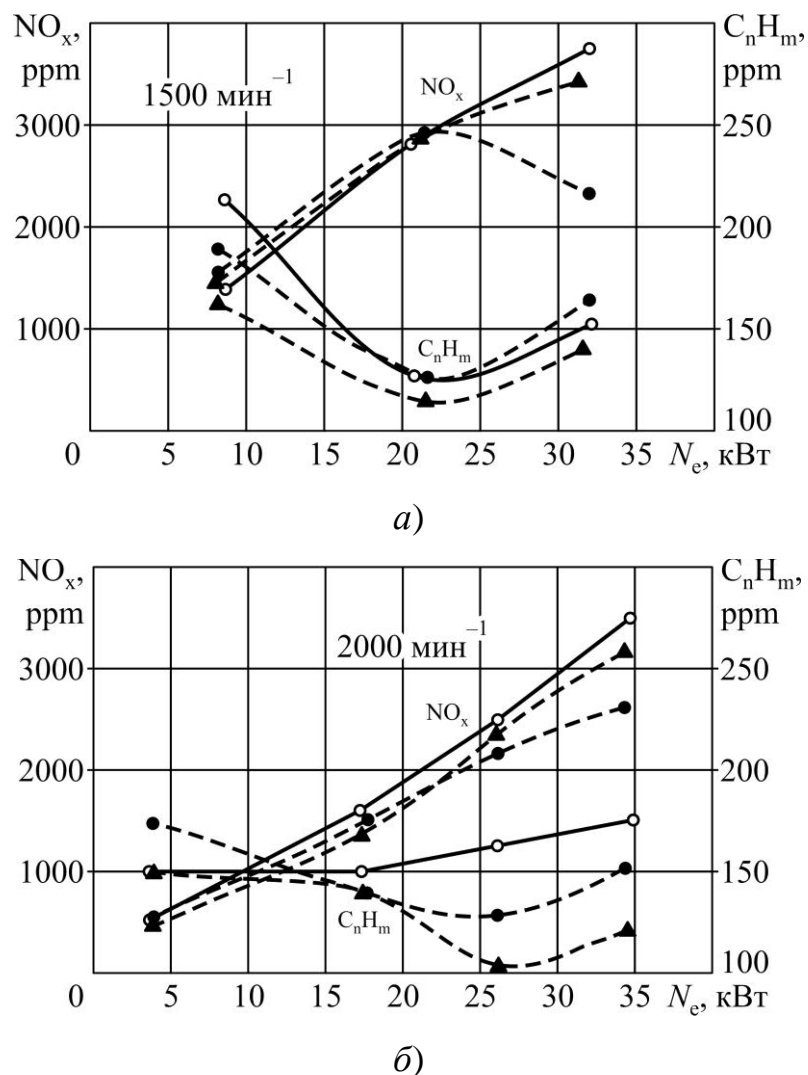


Рис. 3.4. Зміна концентрації оксидів азоту NO_x і вуглеводнів C_nH_m в залежності від потужності двигуна на різних швидкісних режимах:
а) 2000 хв^{-1} ; б) 1500 хв^{-1}

Подібний характер впливу структури ВПЕ на склад і вміст в ВГ дизеля оксидів азоту пояснюється ймовірно тим, що чим більші краплі води, тим більшою мірою знижується повнота згорання і відповідно температура в зоні продуктів згорання (зоні, де трапляється утворення термічних NO_x). Вплив на емісію сумарних вуглеводнів імовірно обумовлено впливом на процес вторинного сумішоутворення мікробибухів великої кількості крапель води (тобто більш дрібних крапель) [26].

Що стосується складу дисперсних частинок (PM), що знаходяться в потоці ВГ дизеля, то чим менше середній діаметр крапель води, тим вище схильність до утворення твердих сульфатів MSO_4 , але менше схильність до утворення сажі С (рис. 3.5).

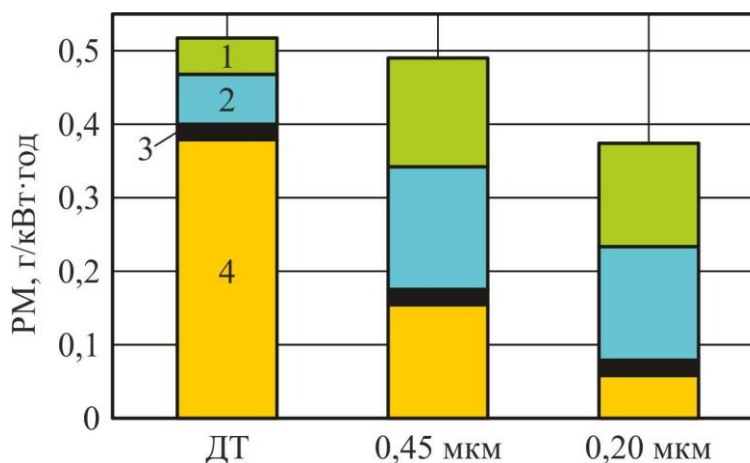


Рис. 3.5. Вплив структури ВПЕ (кількісний вміст води $C_b=17\%$) на склад дисперсних частинок (PM) в ВГ дизеля:

- 1 – MSO_4 (тверді сульфати); 2 і 3 – CH -fuel і CH -oil (високомолекулярні вуглеводні, джерелом яких є паливо і змащувальне масло відповідно); 4 – С (вуглець - сажа); 0,45 і 0,2 мкм – ВПЕ, отримані за допомогою мембран з порами діаметром зазначеного розміру

Таким чином, структура ВПЕ впливає на схильність ВПЕ до сажеутворення (відповідно – на рівень димності ВГ), і чим менше краплі, тим ця схильність вище. Крім того, перехід на роботу з ВПЕ призводить до збільшення вмісту в PM високомолекулярних вуглеводнів, джерелом яких є паливо CH_{fuel} . Вплив на високомолекулярні вуглеводні, джерелом яких є мастило CH_{oil} , не відзначено.

Проведені випробування також дозволили отримати непряме підтвердження того факту, що проходження ВПЕ по системі подачі палива дизеля (в умовах дії високого тиску і прецизійних розмірів паливоподавальної апаратури) не привело до деформації структури ВПЕ. Інакше не був би

відмічений вплив структури ВПЕ на вміст токсичних речовин в ВГ і економічні показники [27].

Використання як альтернативного палива ВПЕ дозволяє висловити таке:

1) при переході дизеля на роботу з дизельного палива на водо-паливну емульсію відзначено вплив структури емульсії на екологічні показники двигуна; зокрема, застосування ВПЕ забезпечує:

- зниження концентрації NO_x і C_nH_m в випускних газах, а також рівня димності ВГ;

- більший позитивний вплив водопаливної емульсії з великим розміром крапель води на емісію NO_x , а з меншим розміром – на рівень димності ВГ і емісію C_nH_m ;

- зниження емісії дисперсних часток за рахунок зменшення сажоутворення (яке превалює над збільшенням концентрації високомолекулярних вуглеводнів, джерелом яких є паливо) і твердих сульфатів;

2) вплив високих тисків і прецизійних розмірів паливоподавальної апаратури не призводить до деформації структури водо-паливної емульсії.

3.4. Використання етанолу та етаноло-паливних емульсій

Одним з найбільш ефективних способів зниження токсичності ВГ є використання альтернативних палив, в тому числі з відновлюваної сировини. Такими паливами є метиловий і етиловий спирти, і емульсії на його основі. Використання газових палив в двигунах застосовується досить давно і показало свою ефективність (зниження викидів шкідливих речовин при використанні газового палива складає на різних двигунах, за оцінкою

фахівців від 20 до 40 %). При цьому практично не вивчене питання про використання в дизелях палив на основі ефірів і спиртів. А це (на підставі вже проведених досліджень, підтверджених документально) дозволяє значно знизити викиди з ВГ таких токсичних компонентів, як оксиди азоту NO_x (до 30 %) і сажі (до 90 %). Настільки істотне скорочення викидів шкідливих речовин з ВГ дозволить вже існуючим і знаходжуваним в експлуатації двигунів відповідати сучасним екологічним вимогам [28].

Швидкісні характеристики і зміна вмісту токсичних компонентів в ВГ дизеля 4Ч11,0/12,5 на оптимальному установчому режимі в залежності від зміни частоти обертання колінчастого валу при роботі на дизельному процесі та при використанні етаноло-паливної емульсії (ЕПЕ) представлені на рис. 3.6.

З графіків видно, що при роботі дизеля па ДП по всьому швидкісному діапазоні роботи вміст вуглеводнів C_nH_m в ВГ збільшується [29].

При збільшенні частоти обертання зменшується вміст оксидів азоту NO_x в ВГ от 1175 ppm при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ до 830 ppm при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$. Зменшення вмісту NO_x складає 29,4 %.

При збільшенні частоти обертання зменшується вміст CO_2 в ВГ. Так, при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ значення CO_2 складає 7,0%, а при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ – 6,4 %. Вміст CO_2 в ВГ зменшується на 8,6 %.

Вміст CO в ВГ знижується з 0,225 % при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ до 0,120 % при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ або в 1,9 рази.

Димність ВГ зі збільшенням частоти обертання збільшується. Так, при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ димність ВГ складає 2,5 одиниці по шкалі Bosch, а при частоті $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ – 3,1 одиниці за шкалою Bosch, тобто, димність підвищується в 1,24 рази.

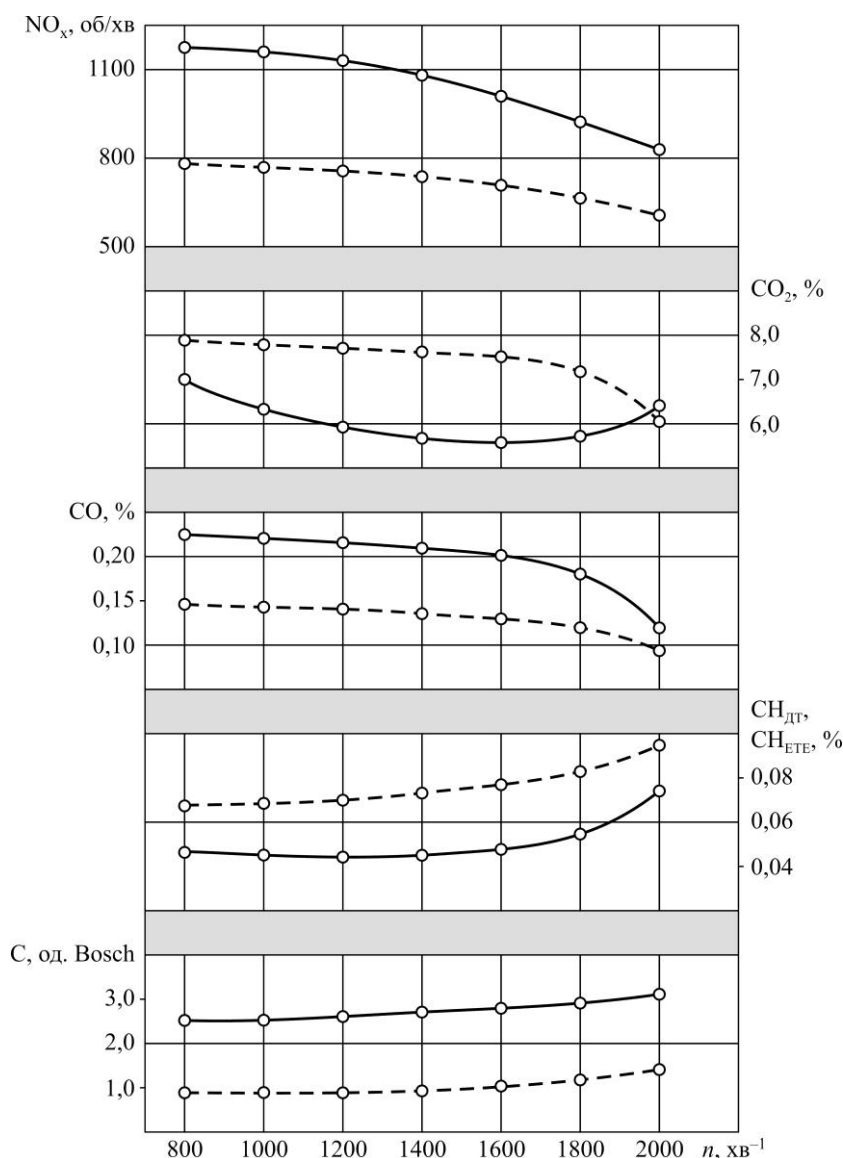


Рис. 3.6. Вплив застосування ЕПЕ на токсичні показники дизеля 4Ч11,0/12,5 в залежності від зміни частоти обертання колінчастого вала:

— — дизельний процес; - - - - - ЕПЕ

Якщо розглядати зміну токсичних показників при роботі дизеля на ЕПЕ, можна зробити такі висновки. При збільшенні частоти обертання зменшується вміст NO_x в ВГ від 785 ppm при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ до 605 ppm при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$. Зменшення вмісту NO_x складає 23 %. При роботі дизеля на ЕПЕ при збільшенні частоти обертання колінчастого вала вміст CH_x в ВГ збільшується на всьому швидкісному діапазоні роботи. При збільшенні частоти обертання знижується вміст CO в ВГ. Так, при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ вміст CO:

в ВГ складає 7,9 %. а при збільшенні частоти обертання до максимальної, тобто, при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ вміст CO в ВГ складає 6,1%. Вміст CO₂ знижується на 22,8 %. Вміст CO в ОГ знижується з 0,145% при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ до 0,095 % при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ чи на 34,5%. Димність ВГ (С) зі збільшенням частоти обертання збільшується. Так, при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ димність ВГ складає 0,9 одиниці по шкалі Bosch, а при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ – 1,4 одиниці по шкалі Bosch, тобто. збільшується в 1,6 рази.

Аналізуючи зміну змісту токсичних компонентів в ВГ дизеля 4С11,0/12,5 при переході з ДП на ЕПЕ при роботі дизеля на оптимальному установчому куті випередження впорскування газу в залежності від зміни частоти обертання колінчастого валу, можна відзначити наступне.

Вміст NO_x в ВГ при роботі дизеля на ЕПЕ менше, ніж при роботі дизеля на ДП, Так, при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ вміст NO_x знижується з 1175 ppm при роботі дизеля на ДП до 785 ppm при роботі дизеля на ЕПЕ. Зниження становить 33,2%, На більшій частоті обертання колінчастого валу також відбувається зниження вмісту NO_x. Так, при $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ вміст NO_x при роботі дизеля на ДП становить 830 ppm а при роботі дизеля на ЕПЕ становить 605 ppm, Зниження становить 27,1 %.

Вміст CH_x в ВГ при роботі дизеля на ЕПЕ на малій частоті обертання ($n=1200 \text{ хв}^{-1}$) Підвищується і становить 0,070 % в порівнянні з вмістом CH_x при роботі дизеля на ДП, яке становить 0,046 %, тобто збільшується в 1,5 рази. При збільшенні частоти обертання до $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ вміст CH_x в ВГ при роботі дизеля на ЕПЕ також зростає і становить 0,35 % по порівнянню з вмістом CH_x при роботі дизеля на ДП, яке дорівнює 0,074 %, тобто збільшується в 4,7 рази,

Вміст CO₂ в ВГ при роботі дизеля на ДП при частоті обертання $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ становить 7,0 % а при роботі дизеля на ЕПЕ – 7,9 % тобто підвищується на 12,9 %. При збільшенні частоти обертання до $n=2400 \text{ хв}^{-1}$

вміст CO_2 в ВГ при роботі дизеля на ДП становить 6,4 % а при роботі дизеля на ЕПЕ – 6,1 %, тобто зниження вмісту CO : складає 4,7 %.

Вміст CO в ВГ при частоті обертання $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ на ДП становить 0,225 %. а при роботі дизеля на ЕПЕ – 0,145 %. Вміст CO в ВГ зменшується в 1,6 рази. При збільшенні частоти обертання до $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ вміст CO в ВГ при роботі дизеля на ДП складає 0,12 %, а при роботі дизеля на ЕПЕ 0,095 %, тобто зменшується в 1,3 рази.

Димність ВГ (С) при роботі дизеля па ЕПЕ, в порівнянні з роботою на ДП змінюється зі збільшенням частоти обертання. Так, при $n=1200 \text{ хв}^{-1}$ при роботі дизеля на ДП значення димності становить 2,5 одиниці за шкалою Bosch, а при роботі дизеля на ЕПЕ – 0.9 одиниці за шкалою Bosch. При збільшенні частоти обертання до $n=2400 \text{ хв}^{-1}$ значення димності при роботі дизеля на ДП становить 3,1 одиниці за шкалою Bosch, а при роботі дизеля на ЕПЕ 1,4 одиниці за шкалою Bosch, тобто димність знижується більш ніж в 2 рази.

Аналізуючи зміну вмісту токсичних компонентів в ВГ дизеля 4Ч11,0/12,5 при переході з ДП на ЕПЕ, відзначимо, що при роботі дизеля на ЕПЕ на всьому швидкісному діапазоні зменшується вміст в ВГ дизеля оксиду вуглецю CO , відбувається збільшення діоксиду вуглецю CO_2 , зростає вміст сумарних вуглеводнів CH_x . При цьому значно знижується вміст оксидів азоту NO_x , і зменшується димність ВГ [30].

3.5. Використання діметилового ефіру

Останнім часом великий інтерес викликає діметиловий ефір (ДМЕ), хімічна формула якого має вигляд $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$. Завдяки своїм фізико-хімічними характеристиками, він може застосовуватися в дизелях без використання ЗДДТ. Діметиловий ефір має цілу низку переваг у порівнянні з іншими альтернативними паливами і навіть дизельним паливом ДТ [31].

Застосування ДМЕ в якості моторного палива для дизельних двигунів, а також можливість його використання в якості хімічної сировини були обґрунтовані в 1995 р, на Конгресі Товариства інженерів автомобілебудування в м Детройті (США) фахівцями компанії Amoco Corp. (США), Haldor Topsoe (Данія), AVL List (Австрія), Navistar (США), а також Технологічним університетом Данії. З цього моменту диметилловий ефір став одним з популярних видів альтернативних моторних палив. Незважаючи на те, що ДМЕ поступається традиційному дизельному паливу в енергоємності (що призводить до збільшення об'ємної витрати палива), здатності, що змазує і в'язкості, він має ряд незаперечних переваг. Високий вміст кисню і відсутність С-С зв'язків в молекулярній структурі ДМЕ обумовлює його ефективне згорання в дизельному двигуні. У порівнянні з нафтовим дизельним паливом ДМЕ має високий цетановим числом (55...60), низькою температурою кипіння (25°C) і запалення (235°C), а також не містить сірки і її з'єднань, що в сукупності сприяє суттєвому зниженню рівня викидів сажі, а також оксидів азоту і сірки в випускних газах, загального зниження рівня шуму і підвищення ресурсу двигуна. Високі пускові характеристики ДМЕ палива дозволяють використовувати його для запуску дизеля з холодного стану. Основні характеристики ДМЕ, а також ряду інших альтернативних палив наведені в таблиці 3.4 [32].

З усіх видів перспективного палива для двигунів внутрішнього згорання диметилловий ефір в даний час є єдиним синтетичним паливом, яке здатне забезпечити повну заміну традиційного дизельного палива ДТ. Інтерес до ДМЕ пояснюється і тим, що в останні роки хімічна промисловість розробила нові технології його отримання з метану. Досягнення нафтохімічних науково-дослідних інститутів і підприємств дозволяють вперше приступити до цілеспрямованих робіт по практичному впровадженню ДМЕ в якості альтернативи ДТ і почати експлуатацію дизельних двигунів на цьому екологічно чистому виді палива [33].

Таблиця 3.4

Деякі фізичні властивості ДМЕ та інших вуглеводних палив

Показник	ДМЕ	пропан	бутан	метан	метанол	дизельне паливо
Хімічна формула	CH_3OCH_3	C_3H_8	C_4H_{10}	CH_4	CH_3OH	—
Температура кипіння, °C	-25,1	-42,0	-0,5	-161,5	64,6	180...370
Густина при 20 °C, кг/м ³	670	490	610	420	790	840
Тиск насичених парів при 25 °C, МПа	0,61	0,93	0,21	24,6	—	—
Температура займання, °C	235	470	372	650	470	250
Межа вибуховості, %	3,4...17	2,1...9,4	1,5...8,5	5...15	5,5...26	0,6...7,5
Цетанове число	55...605	5	—	0	5	40...55
Нижча теплота згоряння, кДж/кг	28900	46500	45800	50300	21100	42100
Температура сполуху, °C	-70	-96	-69	-188	15,6	70

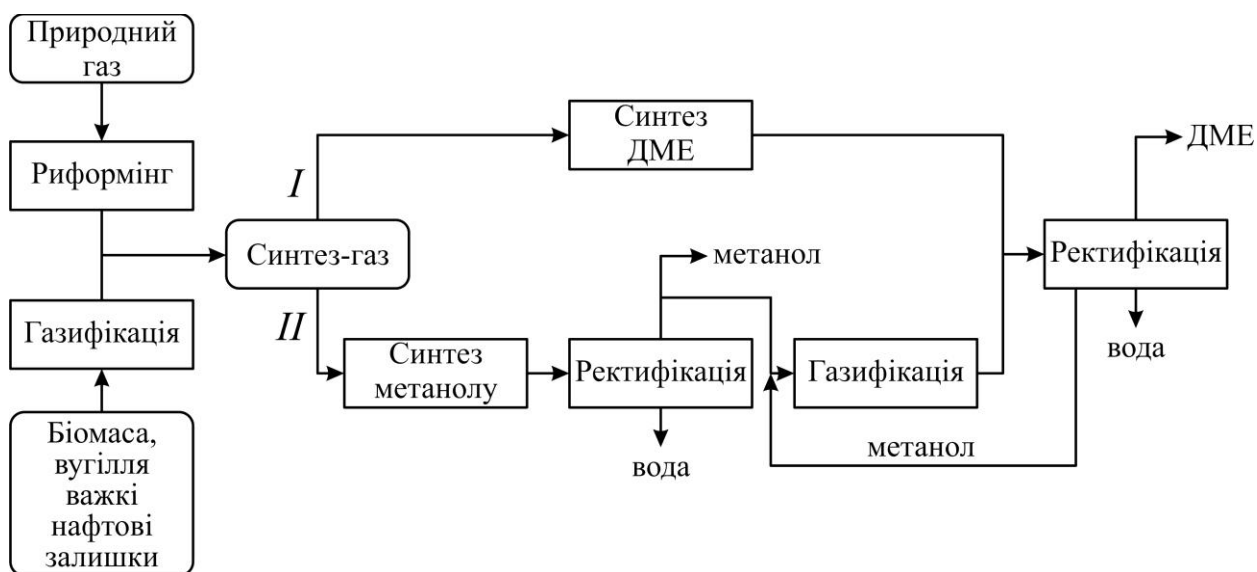


Рис. 3.7. Інтегрована схема отримання диметилового ефіру з різноманітних видів речовини:

I – пряма конверсія з синтез-газу; II – двох стадійний синтез через метанол

Інтегрована схема отримання диметилового ефіру з різноманітних видів речовини показана на рис. 3.7.

Використання диметилового ефіру в якості палива для ДВЗ можливо в таких випадках:

- при змішуванні з ДТ;
- як присадка в ДТ;
- як основне паливо.

Адаптація звичайних дизелів для роботи на ДМЕ полягає в модернізації існуючої апаратури, яка подає паливо. Оскільки густина ДМЕ на 20 %, а питома масова теплотворність на 32% нижче, ніж такі ДТ, для збереження енергоємності об'ємна подача ДМЕ в циліндри двигуна повинна бути значно більшою. Для усунення схильності до задирам прецизійних пар, що труться в конструкції апаратури, що подає паливо приймаються спеціальні заходи, наприклад підведення до плунжерним парам масла під тиском з метою їх ущільнення а також підмішування до ДМЕ спеціальної протизадірної

присадки. За зарубіжними даними, цей компонент сприяє збільшенню кінематичної в'язкості ДМЕ до рівня кінематичної в'язкості ДТ.

Використання ДМЕ в паливних системах дозволяє вирішити такі основні завдання:

- підвищення стабільності подачі зрідженого ДМЕ;
- запобігання витокам ДМЕ в системі;
- зниження емісії оксидів азоту і сажі при роботі дизеля на холостому ході на чистому ДМЕ;
- поліпшення протікання робочого процесу, зниження рівня шуму і питомої ефективної витрати ДТ [34].

Нижче пропонується варіант подачі ДМЕ в циліндр суднового дизеля паралельно з ДТ.

Паливна система суднового дизеля складається з ряду автономних областей, що виконують певні функції: прийом і перекачування, паливо обробка, подача палива до ПНВТ і уприскування палива [35].

Безпосередньо до дизелю відноситься система подачі палива (видаткової паливний трубопровід) і паливна система високого тиску, що забезпечує уприскування палива. Ці дві система мають загальне компонування і взаємозалежне функціонування під час роботи дизеля.

Принцип дії паливної системи, що працює на дизельному паливі, полягає в наступному. З видаткової цистерни, після відкриття запірною крана, паливо самопливом по трубопроводу надходить до фільтра тонкого очищення. З фільтра очищене паливо через підвідний колектор надходить до ПНВТ. З насоса паливо під тиском подається по трубопроводу високого тиску до форсунок і впорскується в циліндр. Після відсічення надлишкове паливо з ПНВТ відводиться окремим трубопроводом в видаткову цистерну. Витоку палива з форсунок також перепускає але трубопроводу в видаткову цистерну. Всі зовнішні втрати палива, викликані нещільно в з'єднаннях ПНВТ і форсунок, збираються в стічну цистерну [33].

Вищевикладена паливна система дообладнана системою подачі зрідженого ДМЕ безпосередньо в циліндр дизеля (рис. 3.8).

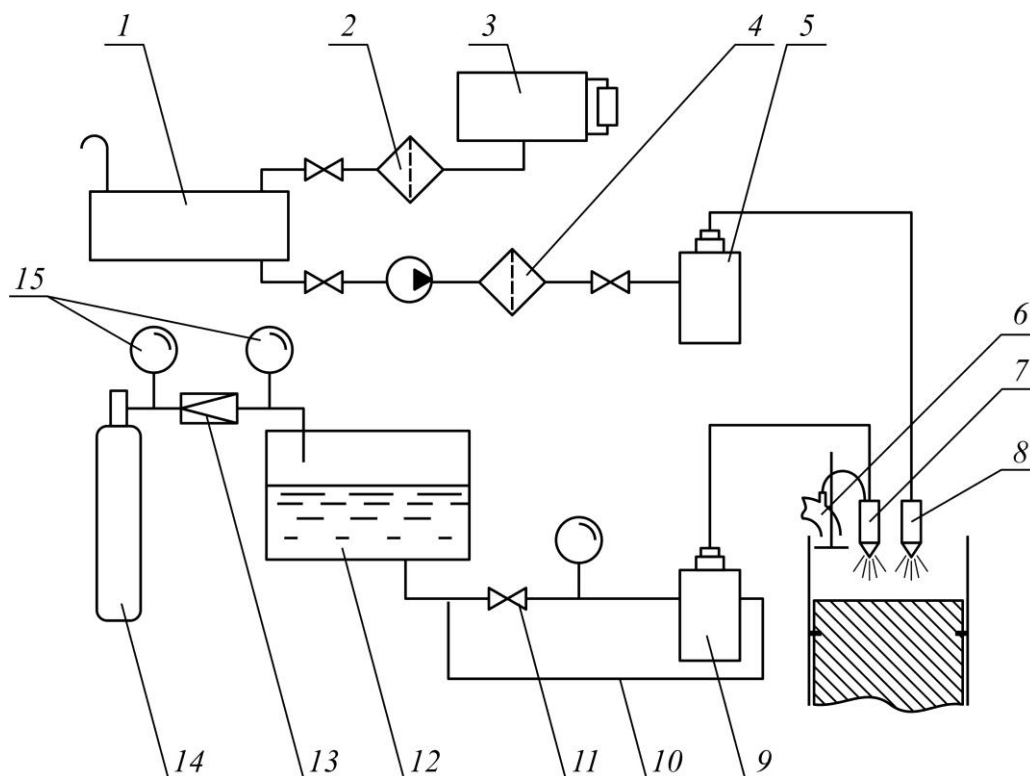


Рис. 3.8. Система подачі ДТ і ДМЕ:

- 1 – витратний танк ДТ; 2 – фільтр грубого очищення; 3 – танк запасу палива ДТ; 4 – фільтр тонкого очищення; 5 – ПНВД ДТ; 6 – впускний колектор; 7 – форсунка ДМЕ; 8 – форсунка ДТ; 9 – ТНВД ДМЕ; 10 – магістраль відсічного палива; 11 – запірний клапан; 12 – витратний танк ДМЕ; 13 – редукційний клапан; 14 – балон ДМЕ

Дана система складається:

- з витратного бака для ДМЕ з робіт тиском 1,6 МПа;
- балона зі стисненим ДМЕ;
- модернізованого ПНВД;
- додаткової форсунки для подачі ДМЕ;
- арматури;
- контрольно-вимірювальних приладів.

Принцип дії системи наступний. З витратного балона рідка фаза ДМЕ через трубку відбору газу мультіклапана під тиском 0,7...0,8 МПа надходить до ПНВТ. З насоса ДМЕ по трубопроводу високого тиску подається до форсунки. Постійний тиск в видатковому балоні підтримується за рахунок подачі стисненого азоту під тиском близько 1 МПа, що подається з додаткового балона з одноступінчастим редуктором, що виключає його випаровування ДМЕ.

Для практичної реалізації даного способу необхідно переобладнання кришки циліндра дизеля (рис. 3.9) [36].

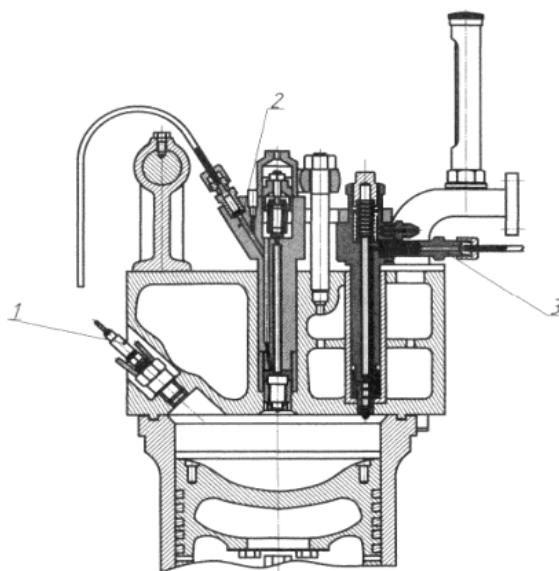


Рис. 3.9. Переобладнання кришки суднового дизеля при використанні ДМЕ:

1 – датчик; 2 – форсунка для подачі ДТ; 3 – форсунка для подачі ДМЕ

Це дозволило здійснити роздільну подачу ДТ і ДМЕ. Було переобладнано також система подачі палива.

Результати випробувань дизелів, що працюють па ДМЕ, показали реальну можливість значно знизити рівень шкідливих викидів відпрацьованих газів. Так, зниження оксидів азоту NO_x в 3...4 рази відзначено при практично бездимного роботі двигуна на всіх режимах. Крім того, при роботі на ДМЕ виявлено збереження, а на деяких режимах – до поліпшення

до 5 % економічності дизеля, підвищення його ефективного ККД в порівнянні з роботою на ДТ.

Основним недоліком ДМЕ є мала кінематична в'язкість (на порядок менше, ніж кінематична в'язкість ДТ), в результаті чого ускладнюється герметизація рухомих вузлів ущільнення паливної апаратури, а також підвищується схильність до задирам прецизійних пар, що труться. У порівнянні із зрідженим природним газом теплотворна здатність на тонну ДМЕ на 45% нижче теплотворення на тонну скрапленого природного газу. Для виробництва ДМЕ потрібно не тільки більш високий рівень попередніх капіталовкладень, але і більший обсяг сировинного газу для виробництва продукту з еквівалентною теплотворною здатністю. Для зниження викидів СО і СН необхідно передбачити додаткові заходи конструкційного характеру.

Суднові двигуни внутрішнього згорання споживають значну частку нафтопродуктів і одночасно є постійно діючими тепловими машинами, які викидають в навколишнє середовище випускні гази. Така ситуація вимагає від людини прийняття заходів захисту навколишнього середовища від екологічної катастрофи. Один з найбільш дієвих заходів екологічного захисту природи – використання екологічно чистіших видів моторного палива [37].

Із числа видів перспективного палива для двигунів внутрішнього згорання особливої уваги заслуговує хімічно інертний диметилевий ефір. Диметилевий ефір (метилевий ефір $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) – безбарвний газ, який при тиску в 5,32 бар переходить в рідкий стан і не має сірки, розчинний в етанолі, воді. В наш час це єдине синтетичне паливо, яке забезпечує повну заміну традиційного дизельного палива.

Використання в якості моторного палива диметилефіра $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ дозволяє зменшити викиди в атмосферу окису вуглецю (CO/CO_2), вуглеводнів (C_iH_j) і окису азоту на 30...70 % в порівнянні зі звичайним рідким вуглеводневим паливом. Диметилевий ефір $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ не токсичний і не являється канцергеном, а при

його згоранні не утворюється сажа. Викиди CO_2 при використанні $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ знижуються на 95 %.

Характеристика токсичності компонентів в порівнянні представлена на рис.3.10 [38].

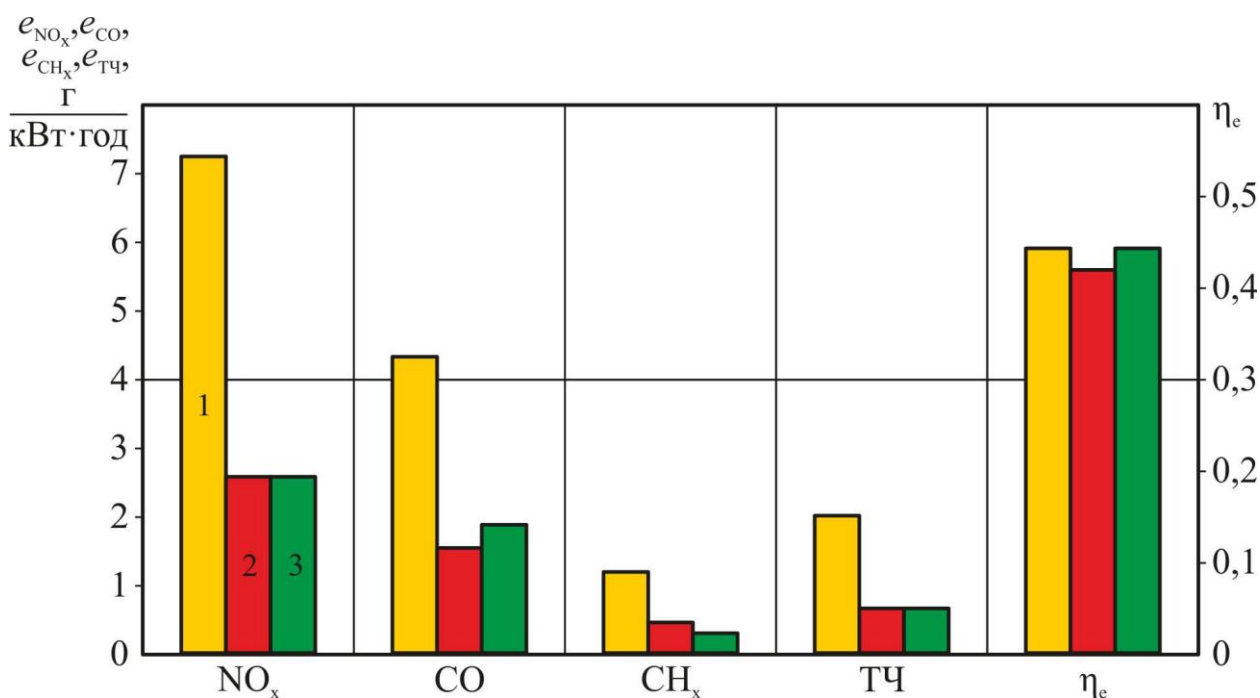


Рис.3.10. Питомі масові викиди токсичних компонентів ВГ і ефективний ККД дизеля при роботі на різних видах палива:

1 – ДТ; 2 – метанол; 3 – ДМЕ

Дослідження диметилефіра $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ як екологічного та альтернативного виду палива проводяться в світі вже кілька років. За результатами випробувань можна стверджувати, що шкідливі викиди в атмосферу при роботі дизеля на $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ знижуються в 2...3 рази.

3.6. Висновки за розділом 3

В результаті досліджень, викладених у розділі 3 зробимо наступні висновки.

1. З метою забезпечення екологічних показників суднових дизелів останнім часом велика увага приділяється зниженню в продуктах згоряння шкідливих, а особливо токсичних речовин та по-перше – зниженню емісії оксидів азоту, при цьому це зниження можливо забезпечити шляхом використання альтернативних палив.

2. Як альтернативні палива в суднової енергетики знайшли застосування природний газ, метанолу-паливні емульсії, етанолу-паливної емульсії, водо-паливні емульсії, діметиловий ефір.

3. При використанні природного газу та метанолу-паливної емульсії досягається зниження оксидів вуглецю CO на 28,6 %; діоксиду вуглецю CO₂ на 48,6 %; сажі С в 6,4 разу; оксидів азоту NO_x на 40,3 %.

4. Використання етанолу та етанолу-паливних емульсій сприяє зменшенню вмісту NO_x на 29,4 %; зменшенню вмісту CO₂ на 8,6 %; зменшенню вмісту CO в 1,9 рази.

5. Воду-паливні емульсії з концентрацією води в паливі в межах 15...20 % призводять до зниження концентрації оксидів азоту NO_x і сумарних вуглеводнів C_nH_m майже на всьому діапазоні навантажень, причому ступінь зниження в основному пропорційна величині навантаження. ВПЕ з меншим розміром крапель води забезпечує більше зниження концентрації C_nH_m в ВГ.

6. Використання діметилового ефіру потребує незначного переобладнання паливної системи високого тиску (у зв'язку з меншою ніж у дизельного палива густиною), але його використання сприяє зниженню витрат дизельного палива, а найголовніше – забезпечує покращення екологічних показників роботи дизеля, зокрема забезпечує майже 3-х разове зниження емісії NO_x та 2,5-ої разове зниження емісії CO.

4. ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНА

Четвертий розділ магістерської роботи присвячено розв'язанню головного завдання дослідження – визначенні оптимального з точки зору енергетичної, екологічної та економічної складових способу очищення випускних газів, що забезпечує зниження рівня їх токсичності.

4.1. Забезпечення екологічних показників суднових дизелів під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту

Вагому роль у забрудненні навколишнього середовища з морських суден грають СЕУ. Головним джерелом забруднення атмосфери є ДВЗ. На їх долю припадає близько 70 % загального обсягу викидів забруднюючих речовин.

Широке поширення в транспорті дизельних двигунів пояснюється тим, що вони працюють на порівняно дешевому паливі, відрізняються кращою паливною економічністю і меншою токсичністю вихлопних газів. Однак і вони не завжди відповідають сучасним вимогам по токсичності. Як вказувалося у попередніх розділах, існуючі технічні рішення, спрямовані на зменшення шкідливих викидів в ВГ дизелів, можна розділити на три основні групи: 1) вплив на робочий процес двигуна; 2) очищення ВГ у випускній системі двигуна; 3) використання альтернативних палив [39].

Для розв'язання головного завдання виконано синтез наукових результатів, отриманих при вирішенні допоміжних завдань, а саме:

- встановлені основні види альтернативного палива, використання яких забезпечує підвищення екологічної ефективності судна
- використання альтернативного палива знижує рівень токсичності випускних газів, при цьому питома витрата палива підвищується
- отримана математична модель, яка дозволяє визначити динаміку токсичності випускних газів [40].

Одним з визначальних факторів зниження шкідливих речовин в ВГ є оптимізація умов впорскування палива і підведення повітря в циліндри двигуна, що обумовлено типом і формою камери згорання. Від організації робочого процесу в двигуні залежить ефективність сумішоутворення і згорання палива в циліндрах. Це безпосередньо впливає на процес утворення і виділення токсичних компонентів з ВГ [41].

При зношуванні деталей циліндропоршневої групи двигуна в процесі експлуатації збільшуються викиди продуктів неповного згорання випускних газів, а димність може зрости більш ніж у два рази. Закоксованість соплових отворів форсунки і зменшення тиску підйому її голки негативно впливають на димність. Установкою форсунок з гідрополірованими соплами розпилювачів можна зменшити викид СО майже в 6 разів, сажі - в 1,2 рази. Склад ВГ багато в чому залежить від якості дизельного палива. При зменшенні вмісту сірки в паливі з 2,3 до 0,5 % вміст NO_x в ВГ скорочується на 0,2...1,8 %; СН - на 24,4 %; сажі - на 13,2...22,6 %.

Більшість факторів, що негативно впливають на екологічні показники дизеля в умовах експлуатації, можна усунути своєчасним проведенням технічних обслуговувань і поточних ремонтів.

Існуючі способи зниження токсичності та димності ВГ дизеля підрозділяються на наступні напрямки: рециркуляція ВГ, впорскування води в циліндри; нейтралізація ВГ на випуску; застосування альтернативних палив, антідимних присадок і сажових фільтрів; обґрунтування оптимальних режимів експлуатації; підтримання дизеля в технічно справному стані [42].

Ступінь впливу перерахованих способів зниження шкідливих речовин в ВГ дизелів представлена в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Вплив способів зниження токсичності ВГ дизелів на її динаміку

Спосіб зниження токсичності ВГ	Динаміка токсичності та димності ВГ			
	СО	СН	NO _x	Димність
Рециркуляція ВГ	зростає на 20%	змінюється незначно	знижується на 50...80%	зростає на 15...20%
Подача води у впускний трубопровід	змінюється незначно	зростає в 2,5...3 рази	знижується в 2...5 разів	знижується в 2...3 рази
Добавка інертних газів до повітря	змінюється незначно	знижується на 5...15%	знижується на 20...30%	зростає незначно
Каталітичні нейтралізатори	знижується на 70%	знижується на 70%	знижується на 15...20%	знижується на 50...55%
Альтернативні види палива	змінюється незначно	змінюється значно	Знижується на 60...70%	—
Антідимні присадки	—	зростає на 10...15%	—	знижується на 70...80%
Сажеві фільтри	—	знижується на 20... 0%	—	знижується на 80...90%

Рециркуляція ВГ застосовується як ефективний засіб зменшення виділень окислів азоту. Принцип роботи системи заснований на всмоктуванні частини ВГ у впускний трубопровід, після чого вони повторно беруть участь в горінні.

Подача додаткового повітря до випускного клапану дозволяє нейтралізувати ВГ методом спалювання їх в випускному трубопроводі.

До вдосконалення режимів роботи ДВЗ можна віднести: поліпшення сумішоутворення і згорання суміші, зменшення температури згорання, збільшення коефіцієнта надлишку повітря, забезпечення необхідної інтенсивності повітряного потоку, зменшення кута випередження впорскування [43].

4.2. Альтернативні палива як найбільш доцільний спосіб зниження емісії оксидів азоту та забезпечення екологічної ефективності морського судна

Результати досліджень, що наведені у попередніх розділах, а також наукової результати, що отримані при вирішенні допоміжних завдань, дозволяють висловлювати, що альтернативні палива є найбільш доцільним способом забезпечення екологічної ефективності морського судна.

Найбільш оптимальним варіантом із альтернативних палив є використання природного газу, водо-паливних емульсії та діметилового ефіру, які забезпечують найбільший рівень зниження токсичних компонентів у випускних газах [44].

Як науковий результат дослідження визначено, що для кожного типу дизеля існує оптимальний кут випередження подачі палива, оптимальний склад водо-паливної, суміші діметилового ефіру та нафтового палива, а також метанолу-паливної емульсії і етанолу-паливної емульсії, що забезпечують максимальне зниження токсичності відпрацьованих газів. Ці показники визначаються експериментально, а значення, що при цьому отримані, можливо використовувати на протязі всього експлуатаційного періоду роботи ДВЗ.

4.3. Висновки за розділом 4

Як висновок за результатом досліджень, що викладені у розділі 4, визначимо наступне.

1. Альтернативні палива, зокрема природний газ, водо-паливні емульсії та діметилового ефіру забезпечують зниження токсичних компонентів у випускних газах в тому числі емісії оксидів азоту.

2. Зниження емісії оксидів азоту з випускними газами та підвищення екологічної ефективності судна забезпечується комплексною системою підготовки палива, яка використовує суміш нафтового та альтернативного палива в оптимальній пропорції.

ВИСНОВКИ

Магістерське наукове дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладної задачі – визначенню оптимального з точки зору енергетичної, екологічної та економічної складових способу очищення випускних газів, що забезпечує зниження рівня їх токсичності та підвищення екологічності роботи судових дизелів.

Вагому роль у забрудненні навколишнього середовища з морських і річкових суден грають судові енергетичні установки та двигуни внутрішнього згоряння, які використовуються як головні та допоміжні дизелі. В результаті здійснення кругового робочого циклу, як будь-який тепловий двигун, (у тому числі судовий ДВЗ) викидає в атмосферу випускні гази, які містять у своєму складі токсичні речовини. Зниження рівня токсичних речовин, та насамперед оксидів азоту, є важливої та актуальної задачею, розв'язання якої забезпечить підтримання екологічних показників роботи судових дизелів.

Головним науковим результатом магістерського наукового дослідження полягає у визначенні наступних параметрів: оптимального кута випередження подачі палива, оптимального складу водо-паливної емульсії, метанолу-паливної емульсії, етанолу-паливної емульсії, при яких забезпечують максимальне зниження токсичності випускних газів.

В результаті виконання магістерського наукового дослідження сформульовано наукове положення: зниження рівня токсичності випускних газів судових дизелів забезпечується комплексної системою їх очищення, яка використовує процеси рециркуляції газів та створення паливних емульсій.

Основні наукові та практичні результати магістерського наукового дослідження.

1. Експлуатація суднових двигунів внутрішнього згоряння супроводжується гострою проблемою екологічного забруднення навколишнього середовища шкідливими і токсичними складовими продуктів згоряння палива.

2. Токсичність випускних газів дизелів визначається 0,02...1,00 % із загального обсягу, але у цю кількість входять речовини, які утворюються в результаті термічного синтезу з повітря при високих температурах (оксид азоту), а також продукти неповного згоряння палива (незгорілі вуглеводні, оксид вуглецю, спирти, кетони, кислоти, перекису, сірчистий ангідрид, частинки вугілля і сажі, продукти конденсації і полімеризації). Крім продуктів згоряння палива, в випускних газах дизельних двигунів присутні продукти згоряння мастила – речовини, які утворюються з присадок до палива, а також тверді частинки.

3. Найбільший вплив на утворення токсичних речовин при згорянні палива оказують наступні процеси: затримка займання та випаровування палива.

4. Для зниження концентрації токсичних речовин у випускних газах двигунів внутрішнього згоряння доцільно використовувати наступні альтернативні палива :

- використання природного газу, метанолу-паливної емульсії, при цьому можливо зниження оксидів вуглецю CO на 28,6%; діоксиду вуглецю CO₂ на 48,6 %; сажі C в 6,4 разу; оксидів азоту NO_x на 40,3%; але при цьому на 8,3 % збільшуються викиди сумарних вуглеводнів CH;

- застосування водопаливних емульсій, що забезпечує зниження концентрації NO_x (до 15,6 %) та C_nH_m (до 45,7 %) в випускних газах, а також рівня димності випускних газів (до 2,3 разу) ;

- використання етанолу та етаноло-паливних емульсій, це сприяє зменшенню вмісту NO_x на 29,4 %; зменшенню вмісту CO₂ на 8,6 %; зменшенню вмісту CO в 1,9 рази;

- використання діметилового ефіру потребує незначного переобладнання паливної системи високого тиску (у зв'язку з меншою ніж у дизельного палива густиною), але його використання сприяє зниженню витрат дизельного палива, а найголовніше – забезпечує покращення екологічних показників роботи дизеля, зокрема забезпечує майже 3-х разове зниження емісії NO_x та 2,5-е разове зниження емісії CO .

5. Найбільш ефективним і економічно доцільним заходом щодо забезпечення екологічної ефективності судна є використання альтернативного палива, а також його суміші з нафтовим паливом, при яких забезпечуються необхідні екологічні параметри роботи судна при підтриманні його енергетичних показників.

6. Підтримання необхідного рівня екологічної безпеки судна та суднової енергетичної установки можливо досягти виконуючи всі вимоги та всі необхідні процедури з обов'язкової екологічної сертифікації цих об'єктів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.
2. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10-14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.
3. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2021. Вип. 43. – С. 5 – 17. doi: 10.31653/smf343.2021.5-17.
4. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
5. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації судових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
6. Мадей В. В. Використання альтернативного палива в судових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 45 - 53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.
7. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11(1), 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

8. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.

9. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

10. Сагін С.В., Куропятник О.А., Руснак Д.Ю., Парменова Д.Г. Зниження емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів шляхом ультразвукової обробки палива // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 121 – 138. DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-121-138.

11. Sagin A.S., Zablotzkyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

12. Парменова Д.Г., Кулешов І.М., Калугін В.М. Суднові установки очищення нафтовмісних вод: нормативні вимоги, методи очищення, конструкція та експлуатація: навчальний посібник // Одеса: НУ ОМА. – 2025. – 148 с. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18836212>.

13. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 46-56.

14. Заблоцкий Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 76-87.

15. Сагін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О. Підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні

установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 50. – С. 102-115. DOI: 10.31653/50.2025.102-115.

16. Голюков В. А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голюков, М.А. Козьмініх, О. А. Онищенко. – Одеса : ОНМА, 2014. – 164 с.

17. Сагин С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – С.102-104.

18. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 106-119. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.

19. Марченко О.О., Сагин С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10-14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.

20. Сагин С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.

21. Мадей В.В., Сагин С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

22. Сагин А.С., Сагин С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

23. Popovskii Y.M., Sagin S.V., Khanmamedov S.A., Grebenyuk M.N., Teregerya V.V. Designing, calculation, testing and reliability of machines: Influence of anisotropic fluids on the operation of frictional components. – 1996. – Russ. Eng. Res. № 16. – P. 1–7.

24. Куропятник А. А. Комплексная оценка режимов эксплуатации системы рециркуляции выпускных газов судовых дизелей / А. А. Куропятник // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 106-120. doi.org/10.47049/2226-1893-2019-3-106-120.

25. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

26. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових середньооберткових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. [doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96](https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-87-96).

27. Куропятник О. А., Sagin S.V. Ensuring efficiency and environmental of marine diesel engines which using exhaust gas bypass system // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 25- 40. [doi: 10.31653/smf343.2021.25-40](https://doi.org/10.31653/smf343.2021.25-40)

28. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 5 – 17. [doi: 10.31653/smf343.2021.5-17](https://doi.org/10.31653/smf343.2021.5-17).

29. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Куропятник О., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.

30. Zabloysky Yu. V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines

/ Yu. V. Zabloytsky, S. V. Sagin // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol 9(20). – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

31. Голікова В.В., Крайнова В.І., Парменова Д.Г., Сінюта К.О. Особливості ергономіки робочого місця майбутніх фахівців водного транспорту // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). С. 218-223. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.18.

32. Парменова Д.Г. Систематизация факторов опасности для построения профиля риска судовых работ // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. – 2014. – № 1. – С. 30-35.

33. Парменова Д.Г. Визначення відповідності суден вимогам щодо енергоефективності та скорочення викидів парникових газів: методичні вказівки до практичних занять з навчальної дисципліни «Моніторинг та виконання вимог Міжнародних морських конвенцій». – Одеса: НУ ОМА, 2025. – 44 с.

34. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2010. – Вып. 25. – С.109-118.

35. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

36. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

37. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

38. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

39. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13(4). – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

40. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

41. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

42. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньообертових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.

43. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Методичні вказівки для виконання дипломної роботи магістра. – Одеса: НУОМА, 2023. – 56 с.

44. Парменова Д.Г. Визначення відповідності суден вимогам щодо енергоефективності та скорочення викидів парникових газів. Одеса: НУОМА, 2025. – 44 с.

45. Ушаков О.І. Підвищення екологічності роботи морських суден / О.І. Ушаков, Ю.В. Заблоцький // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУОМА. –С. 93-97.