

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

Кафедра безпеки життєдіяльності та захисту довкілля

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему:

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ
НОРМ СУДНОВИМИ ДИЗЕЛЯМИ В РАЙОНАХ
КОНТРОЛЮ ЗА ВИКИДАМИ**

Курсанта 2-го року навчання навчально-наукового інституту інженерії
Караваєва Михайла Андрійовича

Керівник: к-т техн. наук, професор Колегаєв М.О.

Нормоконтроль Орфей к. т. н., доц. Парменова Д.П.

Роботу заслухано на засіданні кафедри БЖ та ЗД та рекомендовано до
захисту в ЕК, протокол № 9 від 15 грудня 2025 р.

Завідувач кафедри БЖ та ЗД

к-т техн. наук, доцент Орфей (підпис) Дана ПАРМЕНОВА

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
(підпис)

Сергій САГІН

Рецензент (зовнішній)

Микола Г. Метанов 17.12.25
(ПІБ, підпис, дата)

Рецензент (внутрішній)

Микола Г. Метанов
(ПІБ, підпис, дата)

22.12.2025

Одеса – 2025

Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії
Кафедра безпеки життєдіяльності та захисту довкілля

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
суднових енергетичних установок

д-р техн. наук, професор Сергій САГІН
10 вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

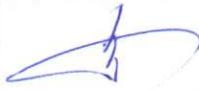
на виконання дипломної роботи магістра

Курсант ННІ _____ Каравасєв Михайло Андрійович _____

1. Тема дипломної роботи: Забезпечення дотримання екологічних норм судновими дизелями в районах контролю за викидами
Затверджена наказом ректора НУОМА № 1414 від 24 листопада 2025 р.
2. Об'єкт дослідження процес утворення оксидів азоту під час перебігу робочого циклу суднового малооборотного дизеля
3. Предмет дослідження процес рециркуляції випускних газів суднового малооборотного дизеля
4. Обсяг пояснювальної записки: 80...90 стор.
5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи:
Аналіз літературних джерел з проблеми забезпечення екологічності роботи суднових малооборотних дизелів
Методологія наукового дослідження
Аналіз методів зниження емісії оксидів азоту в випускних газах суднових дизелів
Забезпечення екологічності роботи суднових малооборотних дизелів шляхом управління випускними газами
6. Зміст основної частини пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):
Аналіз літературних джерел з проблеми забезпечення екологічності роботи суднових малооборотних дизелів
Методологія наукового дослідження
Аналіз методів зниження емісії оксидів азоту в випускних газах суднових дизелів
Забезпечення екологічності роботи суднових малооборотних дизелів шляхом управління випускними газами
7. Перелік графічного матеріалу:
Методологія наукового дослідження
Аналіз способів зниження токсичності випускних газів суднових дизелів
Результати досліджень
Висновки

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

8. Календарний план виконання роботи

№ з/п	Назва етапу дипломної роботи	Відмітка керівника про виконання етапу (дата, підпис)
1	Перелік прийнятих скорочень	
2	Вступ	
3	Аналіз літературних джерел з проблеми забезпечення екологічності роботи суднових малооборотних дизелів	
4	Методологія наукового дослідження	
5	Аналіз методів зниження емісії оксидів азоту в випускних газах суднових дизелів	
6	Забезпечення екологічності роботи суднових малооборотних дизелів шляхом управління випускними газами	
7	Енергетична ефективність суднової енергетичної установки	
8	Висновки	
9	Перелік використаних джерел	

9. Дата видачі завдання _____ 10 вересня 2025 р. _____
Термін подання дипломної роботи на випускову кафедру 14.12.25

Керівник дипломної роботи  к-т техн. наук, професор Михайло КОЛЕГАЄВ _____
(підпис) (вчене звання, посада, П.І.Б.)

Виконавець дипломної роботи  Михайло КАРАВАЄВ _____
(підпис) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 77 сторінок, 14 рисунків, 3 таблиці, 40 літературних джерела.

Магістерська робота присвячена розв'язанню важливого науково-прикладного завдання – підвищенню екологічності роботи суднових малообертових дизелів.

Розглянути основні компоненти шкідливих викидів з відпрацьованими газами.

Запропоновано використання системи рециркуляції випускних газів. Наведені експериментальні дані, за допомогою яких доведено, що рециркуляція випускних газів в діапазоні 4,7...18,8 % сприяє зниженню концентрації оксидів азоту в випускних газах на 19,5...48,8 %, при цьому забезпечуються значення, що задовольняють вимогам міжнародних організацій із захисту повітряного басейну від забруднень і дозволяють експлуатувати морські судна в районах підвищеного екологічного контролю.

СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ, ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДИЗЕЛЯ,
КОНЦЕНТРАЦІЯ ОКСИДІВ АЗОТУ В ВИПУСКНИХ ГАЗАХ,
РЕЦИРКУЛЯЦІЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ, ЕФЕКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ,
ПИТОМА ВИТРАТА ПАЛИВА

ABSTRACT

Master's thesis: 77 pages, 14 drawings, 3 tables, 40 references.

The master's thesis is devoted to solving an important scientific and applied problem – increasing the environmental friendliness of ship low-speed diesel engines.

Consider the main components of the flue gas emissions.

The use of exhaust gas recirculation is proposed. Experimental data are presented to prove that recirculation of exhaust gases in the range 4.7...18.8% contributes to a decrease in the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases by 19.5...48.8%, while providing values, which meet the requirements of international organizations for the protection of the air basin against pollution and allow the operation of ships in areas of increased environmental control.

MARINE DIESEL, ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF DIESEL,
CONCENTRATION OF NITROGEN OXIDES IN EXHAUST GASES,
EXHAUST GAS RECIRCULATION, EFFICIENT POWER, SPECIFIC FUEL
CONSUMPTION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	12
1.1. Основні екологічні показники суднових дизелів.....	12
1.2. Механізм утворення оксидів азоту в циліндрі суднового дизеля	20
1.3. Висновки за розділом 1.....	27
2. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	28
2.1. Наукове пізнання.....	28
2.2. Методи дослідження проблем.....	33
2.3. Етапи науково-дослідної роботи	35
2.4. Технологічна карта дослідження	37
2.5. Висновки за розділом 2.....	39
3. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ В ВИПУСКНИХ ГАЗАХ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	40
3.1. Шляхи поліпшення екологічних показників роботи суднових дизелів.....	40
3.2 Основні способи зниження емісії оксидів азоту.....	43
3.3. Висновки за розділом 3.....	50
4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ	51

4.1. Зниження емісії оксидів азоту під час використання системи рециркуляції випускних газів.....	51
4.1.1. Дослідження впливу рециркуляції випускних газів на екологічні, економічні та енергетичні показники роботи суднових дизелів.....	51
4.1.2. Технологія проведення експерименту	52
4.1.3. Результати дослідження	53
4.1.4. Аналіз отриманих результатів	60
4.1.5. Висновки за результатами досліджень	61
4.2. Висновки за розділом 4.....	62
5. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	63
ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВГ	–	випускні гази
ГД	–	головний двигун
ГТН	–	газотурбонагнетач
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
МКВ	–	машинно-котельне відділення
МОД	–	мало-обертовий дизель
МАРПОЛ	–	Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден
СЕУ	–	суднова енергетична установка
СОД	–	середньо-обертовий двигун
ЦПГ	–	циліндро-поршнева група
CASS	–	Combustion Air Saturation System
ECAs	–	Emission Control Areas
EGR	–	Exhaust Gas Recirculation
EGW	–	Exhaust Gas Wastegate
НАМ	–	Humid Air Motor
ІМО	–	International Maritime Organization
МЕРС	–	The Marine Environment Protection Committee
NECAs	–	Nitrogen Oxide Emission Control Areas
SCR	–	Selective Catalytic Reduction
SECAs	–	Sulphur Emission Control Areas
SFOC	–	Specific Fuel Oil Consumption

ВСТУП

Суднові малооборотві дизелі (МОД) є одними з розповсюджених типів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Основним призначенням цих дизелів є забезпечення руху судна, тобто виконання функцій головного двигуна. Світові концерні, що виробляють МОД, постачають на судна морського та внутрішнього водного транспорту дизелі з різними конструкційними характеристиками та широким діапазоном потужності. Наприклад, європейський виробник MAN Diesel & Turbo випускає МОД з діаметром циліндра 0,26...0,98 м, кількістю циліндрів 5...14, циліндрової потужністю 400...4700 кВт/цил та агрегатною потужністю 2000...90000 кВт.

Отримання корисної роботи в циліндрі дизеля та її подальше перетворення на забезпечення обертання колінчатого вала та гвинта не можливо без використання рідкого палива, до складу якого входять з'єднання сірки, азоту, ванадію, органічні кислоти та інші домішки. Під час згоряння палива в процесі перебігу кінетичних реакції під дією високих температур утворюється нові хімічні компоненти. Частина цих компонентів (насамперед окисли азоту NO_x , сірки SO_x та вуглецю CO) є токсичними речовинами, які разом з випускними газами потрапляють в атмосферу та здійснюють негативний вплив на довкілля.

Забезпечення екологічних показників роботи суднових МОД за викидами оксидів азоту NO_x є актуальним науково-прикладним завданням/

Основним міжнародним конвенційним документом, що регламентує викиди забруднюючих речовин судновими енергетичними установками, є Міжнародна конвенція щодо запобігання забруднення з суден MARPOL 73/78 (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78). Конвенція передбачає комплекс заходів щодо запобігання експлуатаційному та аварійному забруднюванню моря з суден

нафтою; рідкими речовинами, що перевозяться наливом; шкідливими речовинами, що перевозяться в упаковці; стічними водами; сміттям; а також забруднення повітряного середовища із суден. Додатком VI цієї Конвенції «Правила запобігання забруднення повітряного середовища з суден», прийнятим у 1998 році та набравши чинності у травні 2005 року, для морських суден нормуються викиди оксидів азоту, оксидів сірки та викиди речовин, що руйнують озоновий шар.

Вихідними речовинами для утворення оксидів азоту в процесі згоряння рідкого або газоподібного палива в циліндрах судових дизелів є азот і кисень. У сукупності ці сполуки становлять 99% повітря, що надходить у дизель. Кисень витрачається в процесі згоряння, причому кількість наявного надлишкового кисню залежить від відношення повітря / паливо, при якому працює двигун. У процесі згоряння азот переважно не входить у реакцію, проте його невелика відсоткова частка окислюється, утворюючи різні оксиди азоту. Окиси азоту NO_x , які можуть утворюватися, включають оксид азоту NO і діоксид азоту NO_2 , а їх кількість залежить головним чином від температури згоряння та кількості органічного азоту, що міститься в паливі, якщо він в ньому присутній. Утворення NO_x також залежить від часу, протягом якого азот та надлишковий кисень піддаються впливу високих температур, пов'язаних із процесом згоряння у дизелі. Іншими словами, чим вища температура згоряння (наприклад, високий піковий тиск, високий ступінь стиснення, висока швидкість подачі палива і т.і.), тим більше кількість NO_x , що утворюються. Звідси випливає, що оптимізацією процесу згоряння палива і розподілу температури газів в циліндрах дизеля можна суттєво вплинути на концентрацію оксидів азоту, що утворюються.

Загалом МОД має тенденцію до утворення більшої кількості NO_x , ніж високооборотний. Оксиди азоту негативно впливають на довкілля, викликаючи підкислення, утворення тропосферного озону і сприяють негативному впливу на здоров'я людини в глобальному масштабі.

Для контролю за вмістом оксидів азоту NO_x у випускних газах суднових дизелів Резолюція конференції Комітету із захисту морського середовища ІМО МЕРС.184(59) «Керівництво по системах очищення відпрацьованих газів, 2009 року» встановило обов'язковим Технічний Кодекс контролю за їх викидами в атмосферу. Метою Кодексу є встановлення обов'язкових процедур випробувань, огляду суднових дизельних двигунів та оформлення для них свідоцтв, які нададуть можливість виробникам двигунів, судновласникам та Адміністрації забезпечувати, щоб граничні значення викидів відповідали величині NO_x , встановленому у Правилу 13 «Окисли азоту NO_x Додатку VI МАРПОЛ 73/78».

Вищевикладене підкреслює актуальність розв'язання науково-прикладного завдання зі забезпечення дотримання екологічних норм судновими дизелями в районах контролю за викидами.

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

1.1. Основні екологічні показники суднових дизелів

Дизель, виробляючи механічну енергію за рахунок окислення палива повітрям, в процесі роботи здійснює безперервний тепло-масообмін з навколишньою атмосферою. Він забирає повітря і споживає паливо, потім викидає випускні гази, що складаються з частини повітря і продуктів окислення палива. Таким чином, повітря, що надходить в циліндр дизеля, робить певний термодинамічний цикл, зазнаючи при цьому хімічні зміни, в результаті чого перетворюється в випускні гази – складну газову суміш з безліччю компонентів. Чотири компоненти N_2 , O_2 , CO_2 і H_2O складають понад 99...99,9 % обсягу газу, решта 0,1...1,0 % обсягу випускних газів складають домішки, які не представляють інтересу з технічної точки зору, але є шкідливими для навколишнього середовища, живої природи і людини.

При випуску в атмосферу випускні гази зазвичай розсіюються і вступають в контакт з людиною вже в сильно розбавленому стані. Концентрація ряду шкідливих компонентів і температура газів в основному знижуються до безпечного рівня, але бувають зони, де ця речовина концентрується в кількостях, що надають шкідливу дію на живий організм і природу. Ця обставина змушує шукати шляхи зниження шкідливих речовин. До найбільш небезпечних речовин можна віднести CO , NO_x , SO_2 , альдегіди, вуглеводні, бенз- α -пірен [1].

При використанні вуглеводневих палив нафтового походження, які спалюють в циліндрі з надлишком кисню, приблизно 80...95% загальної маси токсичних домішок випускних газів припадає на частку п'яти основних токсичних компонентів: CO , NO_x , SO_2 , альдегідів і вуглеводнів.

Нейтралізація шкідливих компонентів в випускних газах двигунів внутрішнього згоряння ділиться на дві групи методів:

I-ша група – методи внутрішньої нейтралізації (первісні методи), які характеризуються:

- використанням малотоксичних робочих процесів;
- подачею води в циліндр;
- рециркуляцією випускних газів;
- регулюванням подачі палива;

II-га група – методи зовнішньої нейтралізації (вторинні методи), а саме використання:

- сажових фільтрів;
- термічних реакторів;
- рідинних нейтралізаторів;
- каталітичних нейтралізаторів;
- присадок (антідимних, антисажевих);
- ультразвукової коагуляції сажі [2].

До числа методів, спрямованих на нейтралізацію шкідливих компонентів в випускних газах суднових дизелів, належать такі організаційні заходи:

- обмеження кількості маневрів головних двигунів при відходах і підходах суден до морських портів;
- зведення до мінімуму роботи допоміжних двигунів на стоянках;
- переключення суден на мало-сірчисте паливо;
- використання альтернативних видів палива (а саме додавання водню в камеру згоряння при здійсненні робочого циклу; використання спирту, метанолу, стисненого природного газу, зрідженого нафтового газу).

Конструктивні та технологічні заходи щодо поліпшення екологічних показників суднових дизелів полягають в наступних заходах:

зниження утворення оксидів азоту, а саме:

- зниження загальних і локальних температур в камері згоряння;
- зниження локального і місцевого вмісту кисню;
- зміна хімічного складу заряду;
- зниження вмісту азоту в паливі;
- зниження утворення вуглеводнів;
- виключення місцевих пере-збагачених зон;
- виключення надмірної гомогенізації;
- збільшення коефіцієнта надлишку повітря;
- підвищення швидкості згоряння;

зниження утворення СО і диму:

- оптимізація коефіцієнта надлишку повітря;
- оптимізація закону тепловиділення;
- застосування ініціюють і антідимних присадок;
- зниження витрати мастильного матеріалу;
- виключення місцевих пере-збагачених зон;

зниження утворення альдегідів:

- зниження витрат мастила;
- турбулізація заряду;
- руйнування зон гасіння.

Екологічна обстановка в морських і річкових акваторіях багато в чому залежить від кількості викидів шкідливих і токсичних речовин суднових головних установок і допоміжних дизель-генераторів [3].

Екологічні характеристики дизельних двигунів визначаються головним чином вмістом в продуктах згоряння оксидів азоту NO_x , які за індексом токсичності значно перевершують інші шкідливі компоненти ВГ. Згідно з Додатком VI Міжнародної Конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (MARPOL) «Обмеження на викиди NO_x », з січня 2016 року всі нові судна

повинні будуть відповідати стандартам рівня Tier-III, які передбачають зниження викидів на 80 % (рис. 1.1) в порівнянні з стандартами рівня I, для експлуатації в зонах, позначених як зони контролю викидів NO_x .

У атмосфері оксиди азоту NO_x і сірки SO_x розчиняються у воді і, знаходячись в краплях дощу, випадають на землю, окислюючи ґрунт. В результаті знищуються рослини і порушується природний баланс.

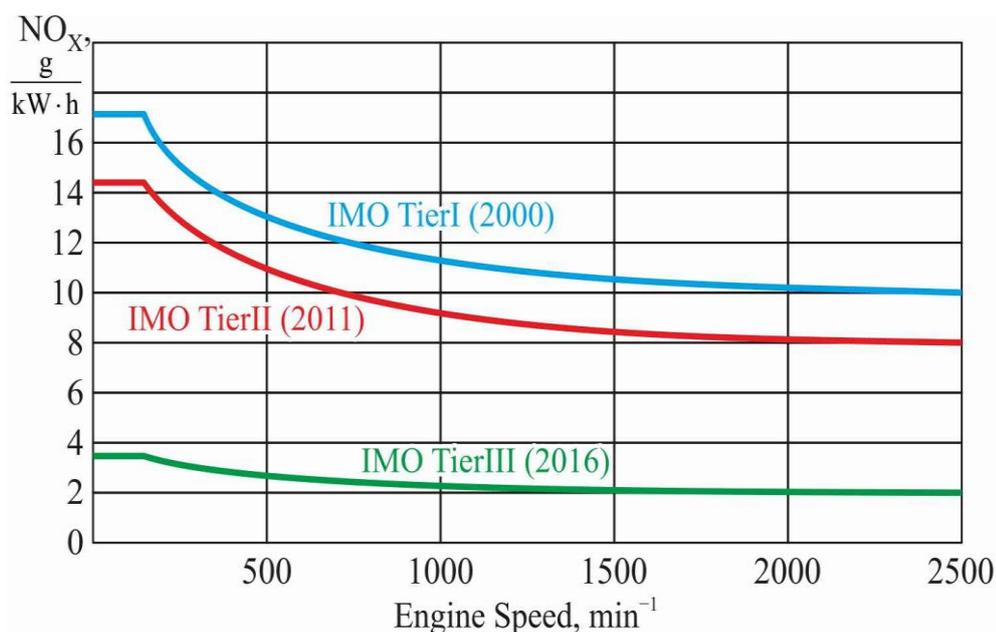


Рис. 1.1. Вимоги IMO до кількості NO_x у випускних газах суднових дизелів

Окисел вуглецю CO і оксиди азоту NO_x в атмосфері викликають потепління і осушення клімату Землі. Крім того, окисел вуглеводню CO є токсичним газом [4].

Проведені Комісією із захисту морського середовища МЕРС (The Marine Environment Protection Committee), що входить в IMO (The International Maritime Organization), випробування різних типів суден показали, що в середньому величини викидів суднових дизелів в кг на 1 тону палива складають: NO_x – 59; CO – 8; CH – 2,7; CO_2 – 3250 і SO_2 – 2,4. Доля забруднення повітряного середовища транспортними суднами складає 5...10 % і поступово збільшується. Річний викид суднового дизеля

потужністю біля 20 тис. кВт рівний: по NO_3 – 1500 тонн; SO_2 – 600 тонн; CO – 100 тонн і по твердих частках – 50 тонн.

Природно, що міжнародні організації і багато країни зробили спроби законодавчо обмежувати кількість шкідливих викидів суднових дизелів. Ці обмеження особливо актуальні для річкових суден і суден прибережного плавання, які велику частину експлуатаційного періоду знаходяться в територіальних водах [5].

Оскільки випуск NO_x у МОД значно вищий, ніж середньо-обертових дизелях (СОД), у зв'язку з більшою тривалістю циклу, що проходить при високих температурах, що досягають 1800°C , нормативи по граничним значенням шкідливих викидів ВГ можна диференціювати не лише по типах двигунів, але і по типах суден.

Така пропозиція прозвучала на з'їзді, що проходив в Лондоні 7-11 вересня 1992 року, комітету ІМО під назвою МЕРС/ВСН (Correspondence Group on Technical Requirements for New Engines to deal with NO_x), де було встановлені граничні значення випуску NO_x для різних типів суден.

Так, для танкерів, балкерів і суден генерального вантажу гранична величина NO_x склала $12 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$; для суден Ro-Ro, пасажирських суден і криголамів – $8 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$; для суден забезпечення, риболовецьких і інших швидкохідних типів – $5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ і для допоміжних двигунів – $8 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$.

На цій підставі залежно від величини викидів NO_x в різних районах плавання з урахуванням нормативних вимог слідує встановлювати відповідну швидкість суден з урахуванням частоти обертання двигунів і гребних гвинтів. Природно, що для зменшення виходу NO_x повинна відповідно знижуватися навантаження двигуна.

Таким чином, актуальним представляється аналіз шляхів зниження шкідливих викидів суднових дизелів. Цей аналіз доцільно провести окремо для СОД і МОД.

У чотиритактного СОД під час роботи з повним навантаженням на високов'язкому паливі типовий склад ВГ включає за об'ємом: азот N – 75 %, кисень O₂ – 12,3 %, інертні гази – 0,9 %, двоокись вуглецю CO₂ – 5,6 %, вода / водяна пара H₂O – 6,0 %. По питомій витраті: двоокис сірки SO₂ при змісті сірки в паливі 0,5 % – 12 г/(кВт·год), двоокис азоту NO₂ – 16 г/(кВт·год), окисел вуглецю CO – 0,6 г/(кВт·год), вуглеводні CH – 0,4 г/(кВт·год) і сажа C – 0,05 г/(кВт·год).

В той же час склад продуктів згорання для двотактного двигуна, наприклад, серій MC-ME фірми MAN Diesel & Turbo, включає в основному NO_x, SO_x, CO і представлений по складових реакції згорання і по складу ВГ в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Шкідливі включення в ВГ суднових двигунів

Найменування включень	Кількість включень, кг/т палива	
	МОД	СОД
Оксиди азоту	84	59
Оксиди сірки	36	21
Окисел вуглецю	9	8
Вуглеводні	2,5	2,7
Вуглекислота	3165	3250

Дослідження Регістра Ллойда показали, що у МОД зміст NO_x набагато більше, ніж у СОД. Так, викиди NO_x при навантаженні двигунів 80 % від максимально тривалою у МОД складають 1300...1800 ppm при змісті O₂ 15 %, у економічній модифікації СОД не більше 1000 ppm при тому ж змісті O₂, у екологічній модифікації СОД вони складають 500...700 ppm. Тому можна вважати, що СОД знаходяться ближче до нормативних вимог, ніж МОД.

Проте по інших шкідливих складових ВГ у СОД і МОД мало відмінностей (див. таблицю. 1.1).

МОД працює з сумарним коефіцієнтом надлишку повітря більше трьох. Більше половини повітря споживається в процесі згорання, а інший йде на продування циліндрів. Тому ВГ містять 13...16 % активного O_2 і в нормах по забруднюючих речовинах вказується відсоток його змісту. Азот N , який в атмосфері займає 80 % і складає при високих α основну частину ВГ, вступає в реакцію з киснем під час робочого процесу, утворюючи токсичні оксиди азоту, які є найшкідливішими складовими ВГ: це NO , NO_2 , H_2O . Кількість кожного з окислів визначається локальними умовами: величиною температури і концентрацією кисню [6].

У СОД це відбувається менш інтенсивно в силу швидкого протікання процесу згорання.

Позбавитися від CO_2 при спалюванні органічних палив неможливо. Але слід зазначити, що, завдяки вищому термічному коефіцієнті корисної дії (ККД) двигунів (при малих питомих витратах палива), великим надлишкам повітря, вихід CO на одиницю потужності у суднових дизелів значно менше, ніж у будь-яких інших теплових двигунів і парових котлів.

Якщо відносні викиди CO_2 у електростанції, що працює на вугіллі, прийняти за 100 %, то викиди CO_2 дизельної електростанції, що працює на високов'язкому паливі, складають 75 %, а що працює на природному газі – 55 %.

Окисел вуглецю CO утворюється при надлишку повітря в умовах високої температури згорання палива під впливом локального певного співвідношення між паливом і повітрям в камері згорання. Низький зміст CO в ВГ визначається високою концентрацією O_2 і інтенсивним згоранням палива.

У ВГ дизелів СО міститься в незначних кількостях і тому не представляє серйозної небезпеки.

Зміст вуглеводнів в ВГ дизельних двигунів в 6...9 разів менше, ніж в ВГ бензинових двигунів, і їх кількість зменшується у міру поліпшення якості палива і підвищення температур його згорання. Загальна кількість вуглеводнів в ВГ визначається, як еквівалент метану CH_4 . До токсичних органічних сполук в ВГ відносяться діоксин, хлорфенол, хлор-бензин, поліароматичні вуглеводні та ін. По відношенню до інших шкідливих компонент кількість цих шкідливих речовин порівняльна мало (не більше $0,04$ міліграма/ нм^3), тому вони не грають особливої ролі при забезпеченні очищення ВГ.

До несприятливих чинників слід віднести димність ВГ. З нею пов'язаний традиційний спосіб оцінки якості процесу згорання палива, використовуваний практично у усіх дизельних установках в експлуатації. Дим традиційно характеризує неякісне згорання палива і оцінюється по його інтенсивності. Колір його залежить від змісту NO_2 , що має жовто-сірий відтінок сконденсованої води у вигляді пари [2].

Існує безліч способів оцінки димності і прозорості ВГ. До найбільш поширених відносяться Bosch Smoke Number Scale 0...10 BSN, Bacharach Smoke Number Scale 0...9 BSN. Тверді включення у ВГ дизелів уявляють собою агломерацію дуже малих часток незгорілого циліндрового масла. Дати які-небудь певні рекомендації по зниженню цього виду забруднень, окрім фільтрації, дуже скрутно.

При роботі на важкому паливі вміст твердих часток може досягати $120...150$ міліграм/ нм^3 або $0,8...1,0$ г/кВт потужності двигуна. Близько 90 % часток мають діаметр менше $1,0$ мкм. У газовому тракті їх розміри можуть досягати $1,0$ мм і більш. Відкладення часток в газовому тракті підвищують

його опір руху ВГ в утилізаційних котлах і, головне, часто приводять до пожеж.

В процесі згорання нафтового палива зазвичай не згорають також дуже невеликі частинки вуглеводнів, які залишаються в ВГ в кількості до 300 ppm. Їх зміст виражається в еквіваленті метанолу і в дуже великій мірі залежить від типу палива.

Наявність сірки в камері згорання двигуна призводить до утворення продуктів її окислення.

Окисел сірки SO_x органічного походження полягає в основному з SO_2 (близько 93 %) і SO_3 (близько 7 %), що знаходяться, собою в співвідношенні приблизно 15:1. Їх походження пов'язане з паливом і залежить від кількості сірки у використуваному паливі. Вони визначають міру корозії деталей двигуна, сприяючи появі на випуску сірчаної кислоти H_2SO_4 .

Скорочення викидів SO_x дизеля досягається або шляхом зниженням змісту сірки в паливі, або шляхом застосування технології уловлювання окислів сірки з ВГ.

У різних країнах розробляються проекти нейтралізації NO_x за допомогою ціанідної кислоти, сечовини, аміаку і інших схожих реагентів. Активний пошук відповідних конструктивних рішень ведуть дизелебудівні фірми відносно до суднових дизельних енергетичних установок.

1.2. Механізм утворення оксидів азоту в циліндрі суднового дизеля

Оксиди азоту займають перше місце серед шкідливих викидів практично на всіх режимах роботи дизелів, незалежно від їх типу, класу, розмірів і конструктивних особливостей. Частка оксидів азоту в сумарних викидах

становить 30...80 % по масі і 60...95 % по еквівалентній токсичності. Викидаються в атмосферу оксиду азоту поряд з аерозолями і хлор органічними сполуками руйнують озоновий шар, який знаходиться на висоті 25 км та поглинає 99% сонячних і ультрафіолетових променів [7].

Термін «оксид азоту» є збірним назвою, що характеризує бінарне з'єднання азоту з киснем. Залежно від валентності азоту (від I до V) розрізняють:

- закис азоту N_2O , що є оксидом, який не утворює сіль;
- одно окис азоту (моно-оксид) NO , що є безбарвним газом, здатним вступати в реакцію з рядом солей, галогенами, а також з киснем з подальшим утворенням NO_2 ;
- триоксид діазоту N_2O_3 , що представляє собою темно-синю рідину, нестійку при звичайних умовах, яка при взаємодії з водою, утворює азотної кислоти HNO_2 ;
- двооксид азоту (діоксид азоту) NO_2 , який є бурим отруйним газом, що перевищує за масою повітря і здатним при з'єднанні з водою утворювати азотисту HNO_2 і азотну кислоти HNO_3 ;
- пентаоксид діазота (азотний ангідрид) N_2O_5 , що вдає із себе безбарвна кристалічна речовина, яке легко розкладається на NO_2 і O_2 , а при контакті з водою легко розчиняється з утворенням азотної кислоти HNO_3 .

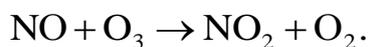
Також відомі димер діоксиду азоту N_2O_4 і слабо стабільні з'єднання: нітрозілазид NON_3 , нітрілазид NO_2N_3 , трінітрамід $N(NO_2)_3$ і нітратний радикал NO_3 .

З точки зору забезпечення екологічних норм при експлуатації суднових енергетичних установок розглядають два з'єднання – NO і NO_2 [8].

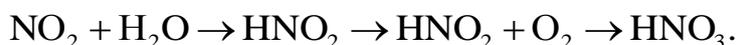
Оксиди азоту є єдиними забруднюючими речовинами, які не можуть бути усунені шляхом зміни сорту палива (як це можливо для зниження викидів SO_x), оскільки найчастіше вони утворюються при з'єднанні азоту

(обов'язково знаходиться в складі рідкого палива) з киснем (обов'язково знаходиться в складі повітря в циліндрі дизеля).

Серед комплексу оксидів NO_x саме NO є тими речовинами, які переважають всередині циліндра дизеля ($\approx 90\text{...}95\%$), в той час як велика кількість NO_2 утворюється тільки при контакті з низькими температурами, тобто при попаданні випускних газів в атмосферу. Утворення NO_2 відбувається при з'єднанні NO з озоном, що знаходиться в повітрі. В результаті чого одноокис азоту NO перетворюється на двоокис NO_2 і кисень O_2 :



Після чого NO_2 з'єднуються з водяними парами H_2O , що призводить до утворення азотної кислоти HNO_2 і далі азотної кислоти HNO_3 :



Саме азотна кислота, яка згодом конденсується в повітрі і повертається на поверхню світового океану або острівну і материкову частину Землі у вигляді кислотних дощів, є тим з'єднанням, яке завдає екологічної шкоди навколишньому середовищу і на боротьбу з яким спрямовані всі конструктивні і технологічні рішення щодо зниження вмісту оксидів азоту в випускних газах (рис. 1.2).

Другий компонент (закис азоту N_2O), що є результатом хімічних перетворень азоту, не утворює азотну кислоту, а в чистому вигляді надходить в атмосферу і спільно з вуглекислим газом CO_2 та іншими шкідливими викидами сприяє тільки підвищенню парникового ефекту.

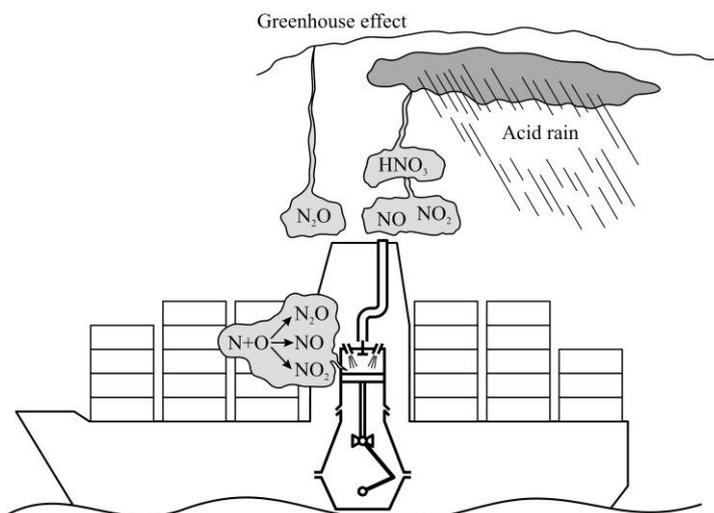


Рис. 1.2. Азотно-кислотний вплив на довкілля під час експлуатації суднових дизелів

У відповідності зі своїм походженням розрізняють три механізми утворення NO_x :

- 1) теплової механізм, або високотемпературний механізм Зельдовича (теплові NO_x);
- 2) швидкий механізм, званий також «хімічним» (швидкі NO_x);
- 3) паливний механізм, пов'язаний з утворенням NO_x з азотовмісних компонентів палива (паливні NO_x) [9].

Номограма співвідношення між NO_x різних видів палива (при стандартних умовах горіння) показана на рис. 1.3.

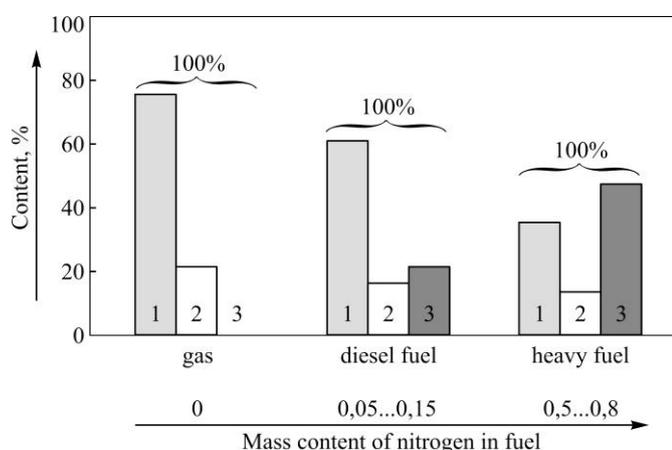
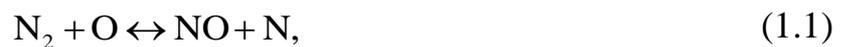


Рис. 1.3. Номограма розподілу типів NO_x для різних видів палива:

1 – теплові; 2 – швидкі; 3 – паливні

Теплові оксиди азоту, що становлять більшу частину від всіх видів NO_x , утворюються при високій температурі ($T > 1500 \text{ K}$) і за умови високої концентрації кисню при окисленні атмосферного азоту в процесі горіння. Теплові оксиди утворюються при спалюванні газоподібного палива (природний газ і зріджений нафтовий газ) і палива, в якому не містяться речовини, що мають в своєму складі азот [10].

Високотемпературний механізм окислення азоту в зоні горіння був запропонований Я. Б. Зельдовичем в середині 1940-х років і вважається основним механізмом утворення оксидів азоту при горінні. Цей механізм включає наступні елементарні стадії:



до яких додається реакція, запропонована К.Фенімором і Г.Джонсом



Сукупність реакцій (1.1-1.3) називається розширеним механізмом Зельдовича. Реакція (1.1) має велику енергію активації і може проходити з помітною швидкістю лише при високих температурах. Тому цей механізм грає важливу роль в разі високих температур в зоні горіння, наприклад, при горінні паливно-повітряних сумішей з стехіометричним або близьким до нього співвідношенням, а також при дифузійному горінні. Вважається, що підвищення максимальної температури в зоні горіння понад 1850 K призводить до неприпустимо високим викидів NO_x [11].

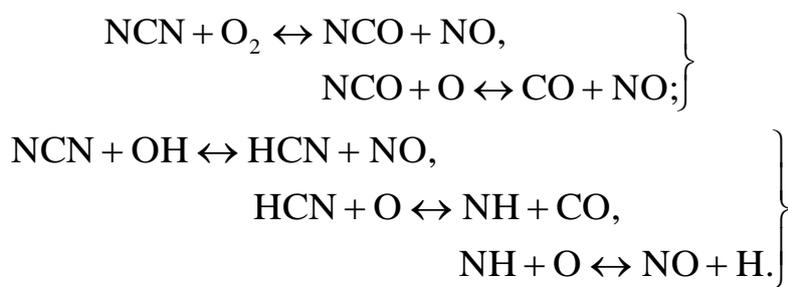
Швидкі оксиди азоту утворюються при з'єднанні присутнього в повітрі молекулярного азоту з фрагментами вуглеводню, що утворюються при розкладанні палива на перших стадіях згоряння. Прямі вимірювання, проведені К.Фенімором в 1971 році, показали, що NO утворюється вже на

початку зони хімічної реакції. Цей механізм був названий «швидким» (prompt NO) або механізмом К. Фенімора [12].

Утворення NO_x по швидким механізмом пов'язано з реакцією радикала CH , який присутній тільки в початковій зоні розкладання вуглеводневих палив, з молекулярним азотом:



NO може утворюватися в ряді наступних реакцій за участю різних радикалів, наприклад:



Цей метод утворення оксидів протікає з дуже високою швидкістю. Утворення швидких оксидів насамперед залежить від концентрації радикалів в кореневій частині факела. При окислювальному полум'я (коли горіння відбувається з надлишком кисню) їх внесок незначний, але при спалюванні збагачених сумішей і при низькотемпературному горінні їх частка може досягати 25% від загального вмісту оксидів азоту.

Оскільки в швидкому механізмі реакція (1.4) протікає з невеликою енергією активації, вона можлива при відносно невисоких температурах порядку 1000 К, а в багатих сумішах (з надлишком палива) утворення NO сприяє підвищена концентрація радикалів CH .

Паливні оксиди азоту утворюються при окисленні азотовмісних речовин, присутніх в паливі в зоні факела. Концентрація паливних оксидів

може досягати значних розмірів, якщо вміст у паливі азотовмісних речовин перевищує 0,1% від ваги. Як правило, це стосується тільки рідкого палива.

Частка швидких оксидів азоту більш-менш постійна, в той час як частка паливних оксидів азоту збільшується при горінні видів палива з більш високим молекулярною вагою. При цьому частка теплових оксидів азоту знижується [13].

Способи зниження концентрація NO_x в випускних газах поділяються на первинні та вторинні. До первинних належать заходи по оптимізації процесу сумішоутворення, подачі і горіння палива, а також вдосконалення конструкції паливної апаратури. Вторинні способи (селективне або неселективне каталітичне відновлення) мають на увазі очищення вже утворилися випускних газів перед їх випуском в атмосферу в додатково встановлених спеціальних пристроях (реакторах) [14].

Утворення забруднюючих атмосферу оксидів азоту NO_x при згорянні палива залежить, перш за все, від часу їх перебування в зоні високих температур, а також від стехіометричного співвідношення (перш за все від надлишку кисню). Процес формування оксидів азоту NO_x у високому ступені залежить від термохімії процесу згоряння палива: температури в процесі згоряння і тривалості перебування продуктів згоряння в зоні високих температур [10]. Оскільки основна маса викидів NO_x в теплових двигунах (дизелях, газових турбінах, котлах) припадає на високотемпературний механізм Зельдовича, більшість розроблених до теперішнього часу первинних способів зниження цих викидів направлено на зниження максимальної температури в зоні горіння і на скорочення часу перебування реагентів в цій зоні [15].

1.3. Висновки за розділом 1

Як результат досліджень, що виконані у розділі 1 визначимо наступне.

1. Здійснення робочого циклу у циліндрі дизелю неможливо без викиду в атмосферу випускних газів, до складу яких входить численні шкідливі речовини.

2. Оксиди азоту займають перше місце серед шкідливих викидів практично на всіх режимах роботи дизелів, незалежно від їх типу, класу, розмірів і конструктивних особливостей.

3. Оксиди азоту є єдиними забруднюючими речовинами, які не можуть бути усунені шляхом зміни сорту палива (як це можливо для зниження викидів SO_x), оскільки найчастіше вони утворюються при з'єднанні азоту (обов'язково знаходиться в складі рідкого палива) з киснем (обов'язково знаходиться в складі повітря в циліндрі дизеля).

4. У відповідності зі своїм походженням розрізняють три механізму утворення NO_x : високотемпературний, швидкий, паливний. Останній є самим вагомим для рідкого палива нафтового походження, саме тому на зниження цей складової спрямовані всі методи, що забезпечують зниження емісії NO_x з випускними газами.

2. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Наукове пізнання

Наукове пізнання – це форма процесу пізнання, головною функцією якого є вироблення й теоретична систематизація об'єктивних знань про дійсність. Передусім у структурі наукового пізнання виокремлюються емпіричний і теоретичний рівні. У найбільш загальному розумінні емпіричне дослідження є знанням про явище, а теоретичне – про його сутність [16].

Емпіричне дослідження – це такий рівень наукового пізнання, зміст якого головним чином отримано з досвіду, із безпосередньої взаємодії людини з об'єктивною дійсністю. На емпіричному рівні здійснюється спостереження об'єктів, фіксуються факти, проводяться експерименти, встановлюються емпіричні співвідношення та закономірні зв'язки між окремими явищами.

Теоретичний рівень наукового пізнання є більш високим ступенем дослідження дійсності, де об'єкт постає з боку тих його зв'язків і відносин, які недоступні безпосередньому чуттєвому вивченню. На цьому рівні створюються системи знань, теорій, у яких розкриваються загальні та необхідні зв'язки, формулюються закони в їх системній єдності та цілісності.

Наукове пізнання виконує функції опису, пояснення, розуміння, передбачення.

Опис – функція наукового пізнання й етап наукового дослідження, що складається у фіксації даних експерименту за допомогою визначеної системи позначень. (Види опису: емпіричний опис, теоретичний опис)

Пояснення – виявляється в розкритті сутності об'єкта, який досліджується; воно здійснюється шляхом показу того, що об'єкт, який пояснюється, діє за визначеним законом.

Розуміння – властива свідомості форма освоєння дійсності, що означає розкриття і відтворення змісту предмета. У науці розуміння припускає використання спеціальних методологічних правил і постає як інтерпретація.

Передбачення – обґрунтоване припущення про майбутній стан явищ природи і суспільства або про явища, невідомі у даний час, але підлягають виявленню, заснованому на відкритих наукою законах розвитку природи і суспільства.

Прогнозування – один з видів передбачення, спеціальне дослідження перспектив деякого явища. Найчастіше використовуються такі методи прогнозування як екстраполяція, моделювання, експертиза, історична аналогія, прогнозні сценарії [17].

На емпіричному рівні використовуються такі методи як:

- спостереження – це планомірне і цілеспрямоване сприйняття предметів і явищ, їх властивостей і зв'язків в природних умовах з метою пізнання об'єкта, що досліджується;

- експеримент – це дослідження будь-яких явищ шляхом активного впливу на них за допомогою створення нових умов, відповідних меті дослідження, або шляхом зміни проходження процесу в певному напрямку; на відміну від простого спостереження, експеримент – це активне вторгнення дослідника в природні явища, в хід процесів, що вивчаються;

- опис – це зазначення ознак предмета (явища) як суттєвих, так і несуттєвих. Опис, як правило, застосовується відносно одиничних об'єктів для більш повного ознайомлення з ними;

- вимірювання – це певна система фіксації кількісних характеристик досліджуваного об'єкта за допомогою різноманітних вимірювальних приладів. За допомогою вимірювання визначається відношення однієї кількісної характеристики об'єкта до іншої, однорідної з нею, прийнятої за одиницю вимірювання.

Моделювання – це вивчення об'єкта шляхом створення та дослідження його копії (моделі), яка за своїми властивостями відтворює властивості об'єкта, що досліджується. Моделювання використовується тоді, коли безпосереднє вивчення об'єктів з деяких причин неможливе.. На сучасному етапі розвитку пізнання особливо велика роль відводиться комп'ютерному моделюванню.

Якщо говорити про форми емпіричного рівня наукового пізнання, то вони збігаються з формами теоретичного рівня,адже чіткої межі між ними не існує.

До числа форм наукового пізнання відносяться проблема, гіпотеза і теорія.

Проблема – це запитання чи їх комплекс, які виникають у процесі розвитку пізнання і вирішення яких має суттєвий практичний або теоретичний інтерес.

Гіпотеза – це різновид здогадки, припущення більш або менш обґрунтоване, але ще не підтверджене, не доведене повністю

Теорія – це система узагальненого знання, основних наукових ідей, законів і принципів, які відображають певну частину навколишнього світу, а також матеріальну і духовну діяльність людей. Теорія на відміну від гіпотези є знанням достовірним.

На етапі спостереження експертизі підлягають виявлені неочевидні факти дійсності. Експертиза ступеня вивченості цих фактів здійснюється за наступними ознаками: актуальності, наукової новизни, економічної доцільності й можливості реалізації. За результатами експертизи формується тема наукового дослідження, визначається об'єкт і предмет дослідження, передбачувана наукова новизна.

Об'єктом наукового дослідження є процес, явище. матеріальна або ідеальна система.

Предмет дослідження – це параметри внутрісистемної структури: властивості елементів, закономірності взаємодії між елементами усередині системи й поза неї. закономірності розвитку, властивості, якості та інші.

Для посилення цілеспрямованості дослідження уточнюються його мета й завдання.

Мета відбиває інтереси й запити верхніх системних ієрархічних рівнів, коли їхні ідеї є відбиттям актуальності наукового дослідження.

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.

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.

Наукова ідея – це інтуїтивне, не базоване на аргументації, пояснення якогось явища або процесу, що враховує всю сукупність зв'язків, а також можливий шлях досягнення мети дослідження. Ідея базується на наявних знаннях, але розкриває не помічені раніше закономірності. Матеріалізується ідея в гіпотезі.

Гіпотеза є імовірнісне вірним судженням про причину, що викликає розглянутий наслідок. У випадку, якщо гіпотеза погоджується з наявними факторами, то вона перетворюється в закон або теорію. Підтвердженням правильності гіпотези є те, що вона не суперечить дійсності і є єдиною можливою для пояснень всієї сукупності розглянутих явищ. Одна гіпотеза

може бути замінена іншою у випадку, якщо нові фактори не можуть бути пояснені первинною гіпотезою, або їй суперечать.

Закон можна визначити, як внутрішній істотний зв'язок явищ і процесів, що спричиняє їхні атрибути й необхідний розвиток. Закон виражає стійкий зв'язок між явищами або властивостями об'єктів і предметом дослідження.

Закон може бути сформульований шляхом здогаду, однак потім він повинен бути логічно доведений, тільки в цьому випадку він визнається.

Для доказу законів використовуються істинні судження, з яких він логічно витікає. У деяких випадках рівною мірою можуть виявитися доказовими суперечливі судження. У такому випадку виникає науковий парадокс, що свідчить або про наявність помилок у логіці доказу або про неспроможність вихідних суджень.

На етапі апробації відбувається обговорення постановки, методології й результатів дослідження на різних рівнях: науково-технічних семінарах, конференціях, наукових радах, симпозіумах.

Підтвердження вимагають результати теоретичних досліджень шляхом проведення експерименту. Результати достовірних експериментальних досліджень підтвердження не вимагають.

Апробація – це безперервний процес публічного подання ходу наукового пізнання, починаючи від спостереження, дослідження, результатів, підтвердження і твердження.

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.

Одним із найважливіших елементів підтвердження є впровадження. Під ним розуміють імплементацію нових видів конструкцій, матеріалів, виробів, прогресивних технологій [18]

2.2. Методи дослідження проблем

Метод – це послідовність дії для досягнення якої-небудь мети, рішення конкретного завдання, сукупність прийомів або операцій практичного або теоретичного пізнання дійсності [19].

Методи умовно розділяють на: загальні, діючі у всіх галузях науки й на всіх етапах дослідження: загальнонаукові. які застосовні для всіх наук: часткові, які використовуються певною групою наук: спеціальні – які застосовуються тільки для даної науки.

Такий розподіл методів умовний, тому що в міру розвитку пізнання науковий метод може переходити з однієї категорії в іншу.

До загальнонаукових методів відносять: спостереження, порівняння, рахунок, вимір, експеримент, узагальнення, абстрагування, формалізацію, аналіз і синтез, індукцію й дедукцію, аналогії, моделювання, ідеалізації, ранжирування. аксіоматичний. гіпотетичний. логічний. евристичний, історичний й системний методи.

Знання методології дозволяє вибрати найбільш доцільні методи дослідження конкретних проблем. Застосовувані методи наукового пізнання розділяють на чотири рівні: емпіричний, експериментально-теоретичний. теоретичний і мета-теоретичний.

Методи емпіричного рівня: спостереження, порівняння, розрахунок, вимір, «метод проб і помилок» і т. п. Ці методи пов'язані з конкретними досліджуваними явищами й використовуються на етапі формування наукової гіпотези.

Методи експериментально-теоретичного рівня: експеримент, аналіз і синтез, індукція й дедукція, ідентифікація і моделювання, гіпотетичний і логічний методи. Ці методи дозволяють дослідникові виявити безсумнівні факти й об'єктивні прояви в перебігу досліджуваних процесів. З їхньою

допомогою здійснюється нагромадження факторів й їхня перевірка. Необхідно пам'ятати, що факти мають науково-пізнавальну цінність тільки у випадку, якщо вони систематизовані, між ними виявлені не випадкові залежності, визначені причинно-наслідкові зв'язки. Таким чином, виявлення істини вимагає не тільки збору факторів, але і їхньої правильної теоретичної обробки.

Методи теоретичного рівня: абстрагування, ідеалізація, формалізація, аналіз і синтез, індукція й дедукція, аксіоматика, узагальнення й т.д. На теоретичному рівні виробляються логічні дослідження зібраних фактів, вироблення понять, суджень й умовиводів. На теоретичному рівні наукове мислення переходить від емпіричної відносності до теоретичних узагальнень. Новий теоретичний зміст знань як би надбудовується над емпіричними знаннями.

На теоретичному рівні часто використовуються логічні методи подібності, розходження, супровідних змін, вирішуються завдання узгодження теоретично розроблених систем з накопиченим експериментальним матеріалом.

Методи мета-теоретичного рівня служать для дослідження самих теорій і розробки шляхів їхньої побудови.

Основним завданням цього рівня пізнання є пізнання умов формалізації наукових теорій і вироблення формалізованих мов, які названі метамовами.

До методів мета-теоретичного рівня належить системний аналіз, що одержав широке застосування в різних сферах наукової діяльності при вивченні складних, взаємозалежних систем або проблем.

В основі системного аналізу лежить безліч об'єктів (компонентів), що мають певні властивості й взаємодіючих один з одним. На базі цього поняття виробляється облік зв'язків, порівняння можливих варіантів з метою вибору найкращого рішення, що оцінюється за яким-небудь критерієм.

Аналіз – це метод, що є однією з основ будь-якого аналітичного дослідження й полягає в розчленуванні або розкладанні предметів дослідження на складові частини для вивчення їхніх якостей і властивостей.

Синтез – метод з'єднання окремих сторін предмета дослідження в єдине ціле.

Експеримент – практичні дії, що ставлять за свою мету перевірку істинності висунутих гіпотез і виявлення закономірностей. У ході експерименту дослідник втручається в досліджуваний процес, впливаючи на його протікання, підсилюючи деякі фактори. Однією з найважливіших вимог до експерименту є його підтвердження.

Узагальнення полягає у визначенні загального для розглянутих об'єктів або процесів поняття, що характеризує їхній стан або поведіння. Узагальнення є методом, який використовується при формуванні закономірностей, теорій, законів [17].

2.3. Етапи науково-дослідної роботи

Після вибору теми проводиться інформаційний пошук.

Інформаційний пошук – процес пошуку в множині джерел, присвячених розглянутій темі, відповідних наукових фактів й відомостей. Величезні потоки інформації ускладнюють проведення інформаційного пошуку при глибокому вивченні розглянутої теми. Знайти нове, вдале, наукове при вивченні конкретної теми досить складне завдання, особливо з урахуванням того, що відсутні універсальні методи визначення таких якісних категорій інформації, як змістовність, інформативність, цінність й ін. Однак, є ряд загальних закономірностей динаміки зміни категорій цього роду, знання яких

дозволяє більш ефективно використати інформацію при наукових дослідженнях.

Інформація має властивість «старіти». Під цим розуміється появи нової інформації, або зменшення потреби в даній інформації. За даними аналізу, заснованого на віці цитованих джерел, інтенсивність падіння цінності інформації становить приблизно 10 % на місяць для періодичних видань й 10 % у рік для книг. У середньому можна вважати, що корисна дія наукової інформації закінчується через 10 років після її опублікування.

З урахуванням широкого використання можливостей Інтернету бібліотеками й іншими установами, що вирішують завдання збору, зберігання й систематизації інформації, створення, так званих «банків» й «баз» даних, ефективним інструментом інформаційного пошуку стали різні пошукові системи Інтернету. Під базами або банками даних розуміють нагромадження й зберігання більших інформаційних масивів з можливістю їхньої оперативної переробки в інформаційні продукти, відповідно до запитів споживачів інформації.

Науковий результат дослідницької роботи де раніше невідоме кількісне співвідношення, аналітична залежність, новий технологічний процес або матеріал.

Кожне наукове положення повинне бути чітко сформульоване з виділенням його основної сутності й рівня досягнутої при цьому новизни. Не можна викладати наукове положення у вигляді анотації, констатації того, що зроблено, тому що в цьому випадку важко виявити сутність і новизну.

Приставаючи до наукового пошуку доцільно розробити технологічну карту дослідження.

Технологія наукових досліджень – це сукупність знань про зміст процесів дослідження й методики їхнього виконання. Графічне зображення цієї технології називається технологічною картою або схемою дослідження [16].

2.4. Технологічна карта дослідження

На підставі викладеного, складаємо технологічну карту дослідження (рис. 2.1).

З урахуванням теми магістерської роботи – «Забезпечення дотримання екологічних норм судновими дизелями в районах контролю за викидами», сформульовані:

мета дослідження – зниження емісії оксидів азоту з випускними газами судових малообертових дизелів;

наукова гіпотеза – зниження емісії оксидів азоту з випускними газами судових малообертових дизелів забезпечується організацією їх рециркуляції з оптимальним ступенем.

Для досягнення мети і підтвердження наукової гіпотези під час дослідження розв'язувалися такі завдання.

Головним завданням дослідження є розробка методу підвищення екологічності роботи судових малообертових дизелів, що гарантує виконання вимог Додатку VI МАРПОЛ.

Розв'язання головного завдання здійснюється за допомогою наступних **допоміжних завдань**:

1) аналіз механізму утворення оксидів азоту при здійсненні робочого процесу судового дизелю;

2) аналіз методів, що сприятимуть зниженню емісії оксидів азоту в випускних газів судових дизелів;

3) визначення оптимальних режимів використання системи управління випускними газами з метою зниження емісії оксидів азоту.

Об'єкт дослідження – процес утворення оксидів азоту під час перебігу робочого циклу судового малообертового дизеля.

Предмет дослідження – процес рециркуляції випускних газів суднового малообертового дизеля.

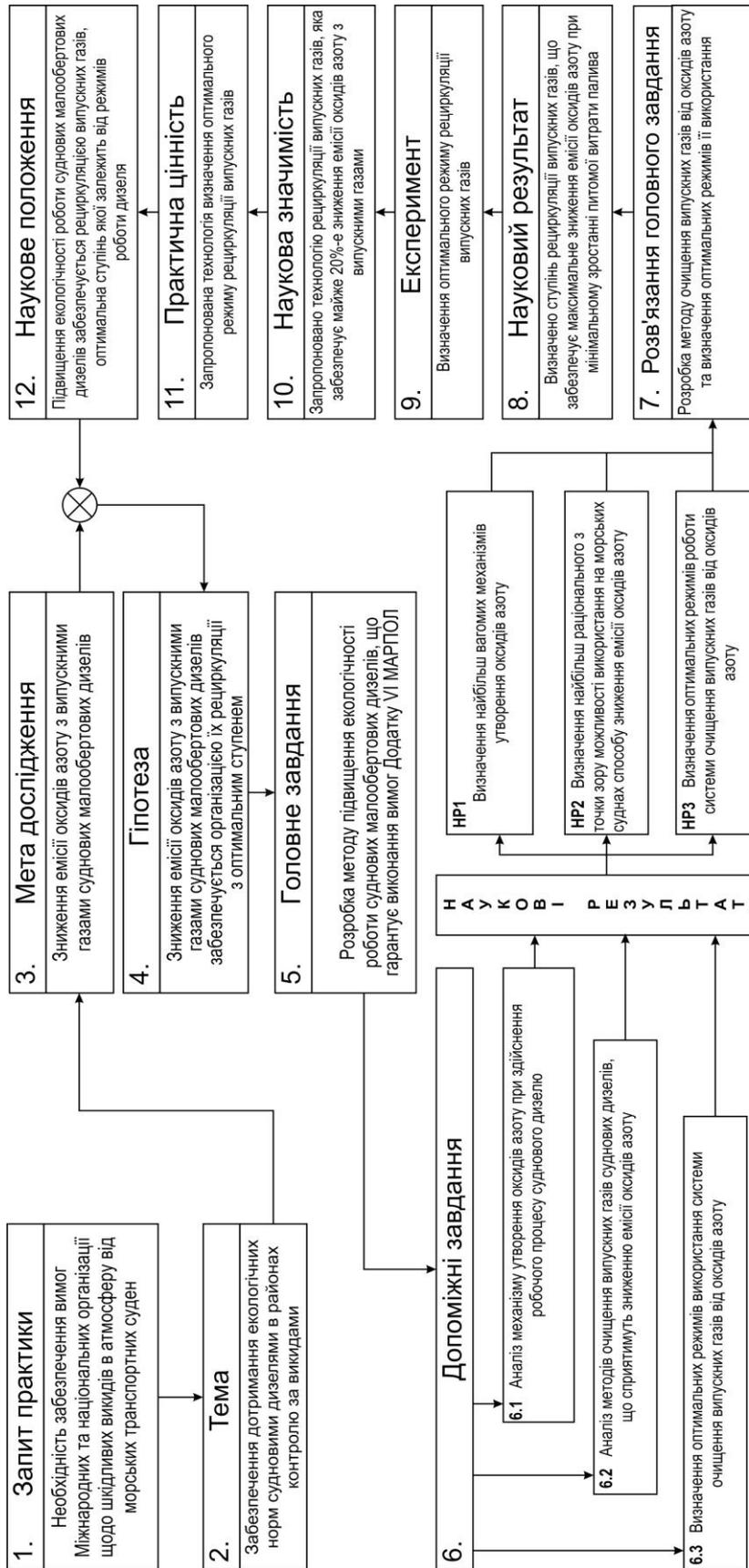


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

2.5. Висновки за розділом 2

В результаті виконання розділу визначена мета, гіпотеза, головне та допоміжні завдання дослідження.

Визначено об'єкт та предмет дослідження, якими є процес утворення оксидів азоту під час перебігу робочого циклу суднового малообертового дизеля та процес рециркуляції випускних газів суднового малообертового дизеля.

З урахуванням принципів системного підходу розроблена технологічна карта наукового дослідження.

3. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ В ВИПУСКНИХ ГАЗАХ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Незважаючи на розробку теплових двигунів, що працюють на природному газі або біодизельному паливі, переважна кількість морських суден використовують для свого руху рідке паливо, тому завдання зниження концентрації викидів в атмосферу оксидів азоту, що утворюються при його згорянні, буде (за мінімальною оцінкою) актуальна протягом найближчого десятиліття.

3.1. Шляхи поліпшення екологічних показників роботи суднових дизелів

Під поняттям «поліпшення екологічних показників роботи дизеля» хоча розглядається весь традиційний набір шкідливих речовин, що утворюються при спалюванні рідких палив – оксиди азоту NO_x , оксиди вуглецю CO , оксиди сірки SO_x , тверді частки, вуглеводні C_nH_m , особлива увага приділяється оксидам азоту NO_x , які мають односпрямовану дію з оксидами сірки SO_x і становлять до 80...90 % токсичності ВГ.

Підвищена увага до оксидів азоту NO_x обумовлено також тим, що вони утворюють в організмі людини з'єднання азотної й азотистої кислот, приводять до роздратування слизоватої оболонки око й дихальні шляхи. При об'ємній концентрації в атмосфері 0,004...0,008 % оксидів азоту NO_x у людини настає набряк легенів. До того ж на відміну від багатьох інших речовин оксиди азоту NO і NO_2 грають складну й важливу роль у фотохімічних

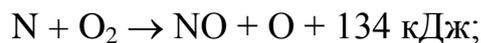
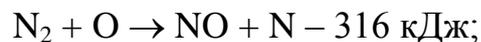
процесах, що відбуваються в тропосфері й стратосфері при сонячному світлі, що є причиною утворення високих концентрацій озону O_3 в атмосфері й появі так званого фотохімічного смогу.

Важливим кроком у пошуку найбільш раціональної технології зниження розглянутих викидів є розуміння теоретичних основ протікання процесів утворення NO_x при згорянні палива. У цьому плані, хоча в різні періоди часу й існували різні погляди на природу утворення оксидів азоту, найбільшою популярністю в цей час користується термічна теорія утворення оксидів азоту, розроблена Я.В. Зельдовичем. Її основи формулюються в такий спосіб:

1) окислювання азоту відбувається за фронтом полум'я в зоні продуктів згоряння;

2) вихід оксидів азоту визначається максимальною температурою горіння, концентрацією азоту та кисню в продуктах згоряння й не залежить від хімічної природи палива, що приймає участь у реакції;

3) окислювання азоту відбувається по ланцюговому механізмі:



перша реакція є визначальною, швидкість її залежить від концентрації атомарного кисню;

4) вихід оксидів азоту залежить від швидкості охолодження продуктів згоряння;

5) в «бідних» сумішах (при малій рухливості реакції) вихід NO визначається максимальною локальною температурою згоряння, тобто кінетикою її утворення; в «багатих» сумішах вихід NO перестає залежати від

максимальної температури згоряння й визначається кінетикою розкладання, тобто «загартуванням» оксидів, що утворилися, азоту;

б) концентрація оксидів азоту не перевищує рівноважну при максимальній локальній температурі згоряння;

7) нерівномірний розподіл температури в зоні продуктів згоряння помітно впливає на вихід NO при горінні «бідних» сумішей і слабо - при горінні «багатих» сумішей.

Ґрунтуючись на перерахованих вище закономірностях утворення оксидів азоту NO_x , дизелебудівною промисловістю розроблена безліч конструктивних рішень по вдосконалюванню робочого процесу двигуна, спрямованих на зниження викидів оксидів азоту NO_x .

Під час проектуванні суднових енергетичних установок найбільш перспективними вважаються методи, в основі яких лежить нейтралізація оксидів азоту в рідинних, термічних і каталітичних нейтралізаторах.

З огляду на дуже велику кількість двигунів, що перебувають в експлуатації, актуальної представляється завдання забезпечення малотоксичного протікання робочого процесу в їхніх циліндрах за допомогою методів підготовки палива.

Дослідженням різних аспектів цієї проблеми займалися різні організації, як вітчизняні, так і закордонні, включаючи науково-дослідні інститути й лабораторії дизелебудівних фірм.

Кількість викидів оксидів азоту й незгорілих вуглеводнів прямо залежить від конструкції двигуна, тому судновласники не можуть зробити істотного впливу на рівні цих викидів. З огляду на той фактор, що впровадження двигунів більше зробленої конструкції зажадає певного часу, пропонується передбачити поетапне прийняття нових приписань, що стосуються адаптації двигунів стосовно до нових вимог.

Слід зазначити, що в цей час не існує комплексної оцінки (або критерію) ефективності методів (засобів) поліпшення екологічних показників суднових дизелів. Представляється доцільним у комплексній оцінці враховувати вартість самих пристроїв і величину відверненого збитку, хоча методи оцінки останньої недостатньо відпрацьовані.

Наявні методики дозволяють зробити тільки відносні оцінки ефективності засобів зниження викидів, тому подальшим завданням науково-дослідних організацій і наглядових органів є створення системи комплексної оцінки пропонувананих методів і засобів поліпшення екологічних показників суднових дизелів при їхній експлуатації.

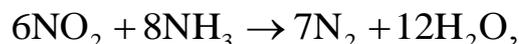
3.2. Основні способи зниження емісії оксидів азоту

Способи зниження концентрація NO_x в випускних газах поділяються на первинні та вторинні. До первинних належать заходи по оптимізації процесу сумішоутворення, подачі і горіння палива, а також вдосконалення конструкції паливної апаратури. Вторинні способи (селективне або неселективне каталітичне відновлення) забезпечують очищення випускних газів, які утворились в циліндрі дизеля, перед їх безпосереднім випуском в атмосферу в додатково встановлених спеціальних пристроях (реакторах).

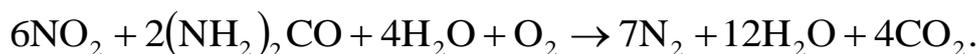
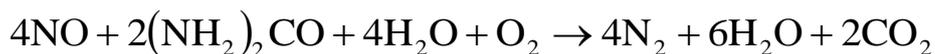
Ефективність методу Selective Catalytic Reduction – SCR, використовуваного для очищення випускних газів від NO_x , може досягати 90...95 %. При використанні даного методу в потік випускних газів інжектуються реагент, зазвичай аміак або сечовина, і суміш надходить на каталізатор [20].

Каталізатор забезпечує перебіг наступних реакцій, у яких оксид азоту поновлюється до молекулярного азоту:

у випадку додавання в ВГ аміаку NH_3



у випадку додавання в ВГ сечовини $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$



В якості каталізаторів застосовуються оксид титану з добавками ванадію, молібдену або вольфраму, цеоліти, оксиди заліза з тонкою плівкою з фосфатів заліза або активоване вуглець у вигляді агломерованих гранул [21].

Принцип дії системи SCR зрозумілий з рис. 3.1.

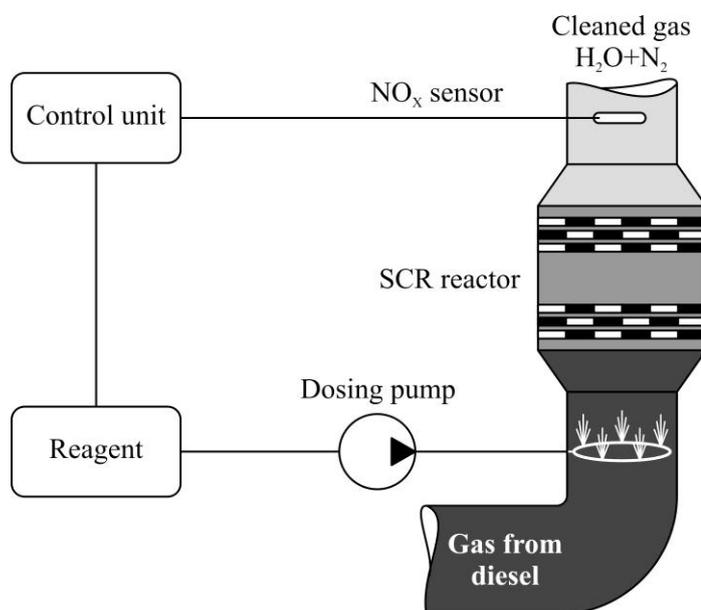


Рис. 3.1. Схема дії системи SCR для очищення ВГ від домішок NO_x

В даний час системи SCR ефективно використовуються в автомобільному транспорті [22]. Застосування системи SCR для очищення випускних газів суднових дизелів носить одиничний характер і обмежується високою вартістю реактора. Крім того, великі масові показники реактора і

необхідність його установки над дизелем, змінюють метацентричної висоту судна, що може бути критично в умовах хвилювання моря.

Процесу згоряння палива в циліндрі дизеля передують сумішоутворення дрібно-розпорошених частинок палива і кисню, що міститься в повітрі. При цьому (як в будь-якому варіанті дифузійного горіння, коли паливо і окислювач надходять в камеру згоряння роздільно один від одного) за допомогою систем подачі повітря і уприскування палива підтримується стехіометричне співвідношення. В даному випадку неминуче з'являються осередки підвищеної температури, що призводить до утворення NO. Для розведення суміші палива і повітря в зоні горіння в якості охолоджуючого компонента використовується вода або водяна пара, які впорскується в камеру згоряння. Впорскування води в циліндр може здійснюватися як через окремий розпилювач, так і через загальну водо-паливну форсунку. Залежно від послідовності впорскування води і палива такий уприскування поділяють на двофазний і багатофазних (рис. 3.2).

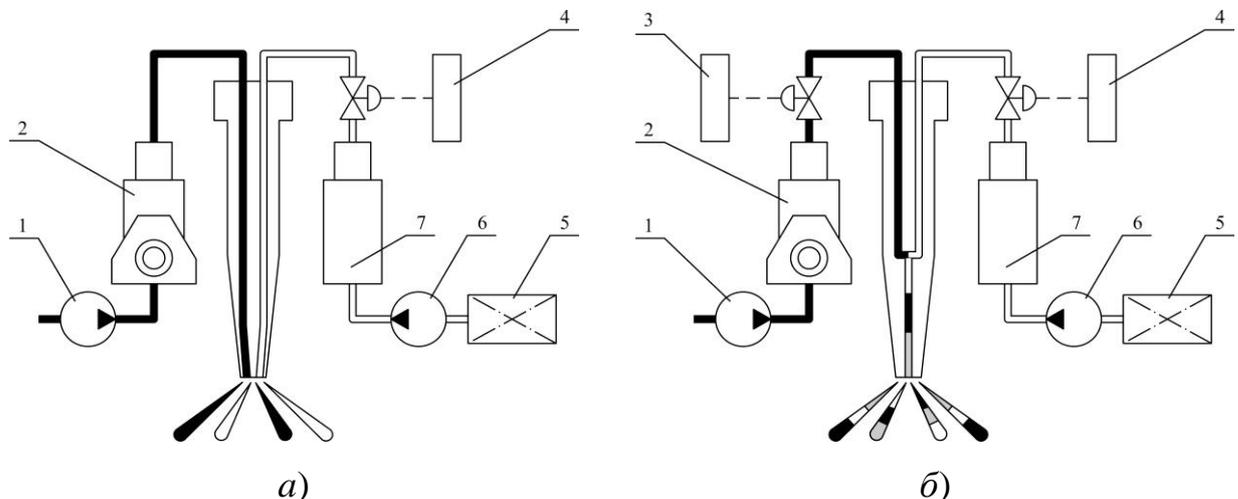


Рис. 3.2. Двофазне (а) і багатофазне (б) впорскування:

- 1 – паливний насос, що підкачує; 2 – паливний насос високого тиску;
 3 – контролер подачі палива; 4 – контролер подачі води; 5 – цистерна прісної
 води; 6 – насос, що підкачує прісної води; 7 – насос високого тиску прісної
 ВОДИ

При двофазному уприскуванні (рис. 3.2, а) форсунка забезпечує уприскування палива і води через окремі групи сопел. Насос, якій підкачує паливо 1 подає паливо до паливного насоса високого тиску 2, від якого паливо нагнітається до розпилювача форсунки. У разі додаткового уприскування в циліндр дизеля прісної води погодуються насос 6 забирає воду з цистерни 5 і подає її до насоса високого тиску 7. Кількість прісної води, яка подається в циліндр, а також синхронізація вприскування води і палива здійснюється за допомогою контролера 4. З огляду на, що експлуатація дизеля відбувається не тільки на режимах двофазного вприскування (коли в циліндр подається паливо і вода), але і на режимах, коли дизель працює тільки на паливі, кількість паливних сопел має залишатися незмінним і забезпечувати необхідну циклову подачу палива при будь-якому навантаженні дизеля. Це змушує комплектувати розпилювач форсунки додатковою кількістю сопел, що забезпечують уприскування в циліндр прісної води, що ускладнює конструкцію паливної апаратури.

При багатофазному вприскуванні (рис. 3.2, б) паливо і прісна вода вприскується в циліндр через загальні сопла. Це спрощує конструкцію розпилювача (тому що не потрібні сопла для різного виду вприскується рідини - палива і води), але збільшує тривалість циклової подачі (в зв'язку з тим, що через постійне перетин розпилювача необхідно подавати більший об'єм рідини). При цьому виникає необхідність збільшувати кут випередження вприскування палива, що, в свою чергу, знижує температуру в циліндрі в момент вприскування і може сприяти нестійкого самозаймання палива. При багатофазному вприскуванні в циліндр поперемінно надходять паливо, вода і їх суміш, а їх черговість регулюється контролерами уприскування палива 3 і води 4 (рис. 3.2, б). До недоліків даного методу також слід віднести і те, що паливо і вода надходять до розпилювача форсунки з різними температурами, що впливає на його теплову напруженість [23].

За різними оцінками даний спосіб забезпечує 20...40% скорочення концентрації NO_x в випускних газах. Однак слід зазначити, що даний спосіб в більшій мірі використовується для зниження концентрації незгорілих вуглеводнів і моно-оксиду вуглецю [24].

Аналогічне термодинамічне вплив на зниження температури паливно-повітряної суміші і подальше зниження температури в зоні горіння надає зволоження надувочного повітря. В даному випадку в потік повітря, який після компресора подається в продувний ресивер і призначений для згорання палива, впорскується прісна вода [25]. При цьому форсунки, які розпилюють прісну воду, можуть розташовуватися як відразу за компресором (рис. 3.3, а), так і безпосередньо в продувному ресивері (рис. 3.3, б). Перший варіант отримав назву Combustion Air Saturation System (CASS), другий – Humid Air Motor (HAM).

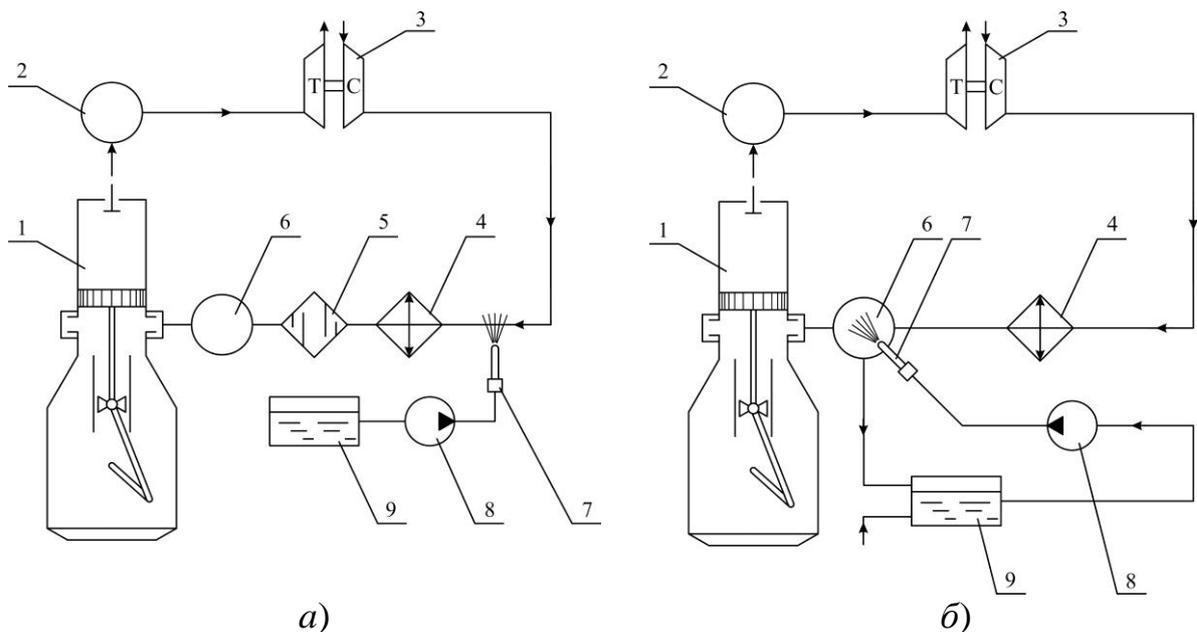


Рис. 3.3. Технологічні схеми зниження концентрації NO_x в випускних газах шляхом зволоження повітря наддуву:

- 1 – циліндр дизеля; 2 – випускний колектор; 3 – турбокомпресор;
 4 – охолоджувач повітря наддуву; 5 – вологовідділювач; 6 – продувний ресивер; 7 – форсунка упрскування води; 8 – насос подачі прісної води;
 9 – цистерна прісної води

У першому випадку (рис. 3.3, а) насос подачі прісної води 8 забирає воду з цистерни 9 і подає її до форсунки 7, яка встановлена в повітряній магістралі за турбокомпресором 3. Повітря охолоджується в холодильнику 4 і пройшовши додатково встановлений вологовідділювач 5 (що забезпечує конденсацію великих крапель води) надходить в продувний ресивер 6.

При використанні випадку НАМ (рис. 3.3, б) форсунка 7 впорскує прісну воду безпосередньо в продувний ресивер 6. Якщо в ресивері 6 утворюється конденсат, він надходить в цистерну 9, звідки забирається насосом 8 і подається до форсунки 7.

Використання даних методів дозволяє до 30...40 % знизити концентрацію NO_x в випускних газах суднових дизелів. Однак, слід зазначити, що дані методи можуть сприяти нестійкого згоряння палива [25]. Як відомо, паливо впорскується в циліндр дизеля з деяким кутом випередження (в момент, коли поршень ще не знаходиться у верхній мертвій точці), що знижує температуру в кінці стиснення в реальному циклі від подібного значення для ідеального (теоретичного) циклу. Знаходження в циліндрі дизеля підвищеної порції розпорошеної води (що відбувається при викладених способах зниження температури паливно-повітряної суміші і збільшення вологості повітря наддуву) може привести до зниження температури в циліндрі дизеля до критичного рівня і неможливості подальшого самозаймання палива. Впорскування водяної пари або подача додаткового зволоженого повітря в зону реакції пов'язані з ускладненням конструкції як самого дизеля, так і забезпечують його систем (стисненого повітря і випускних газів).

В даний час в якості розчинника повітряно-паливної суміші застосовуються продукти згоряння, що забираються з потоку випускних газів. Даний метод являє собою систему Exhaust Gas Recirculation (EGR). Первісне розвиток і впровадження метод EGR отримав на автомобільному транспорті та застосовувався для бензинових двигунів невеликої потужності,

а також дизельних авіаційних двигунів [26]. В даний час він почав активно використовуватися в суднових енергетичних установках. Конструктивно система EGR реалізується за допомогою зовнішнього газоходу, що з'єднує випускний колектор і продувний ресивер. Відпрацьовані гази, проходячи по системі рециркуляції, охолоджуються [27]. Це забезпечує лише мінімальне збільшення питомої обсягу суміші свіжого повітря, що нагнітається повітряним компресором, і продуктів згоряння, що надходять по системі рециркуляції. Ефект від підмішування до свіжого повітряного заряду відпрацьованих газів (продуктів згоряння з низькою температурою) при цьому можна розглядати як розбавлення свіжої суміші інертним газом, в основному складається з діоксиду вуглецю CO_2 і парів води H_2O . Ці продукти мають високу теплоємність і ефективно відбирають тепло із зони реакції, знижуючи її температуру. Як наслідок в випускних газах зменшується концентрація оксидів азоту NO_x , термічний механізм утворення яких є превалюючим в умовах двигунів внутрішнього згоряння.

Енергетична ефективність дизеля, обладнаного системою EGR, знижується в меншій мірі, ніж при подачі повітря або водяної пари ззовні, так як енергія продуктів згоряння частково повертається в систему [28]. Конструкція самої установки (в порівнянні з системами подачі поди і зволоження повітря) спрощується, оскільки не потрібно створювати окремі вузли, що забезпечують подачу зовнішніх компонентів.

Використання для зниження концентрації NO_x перепуску випускних газів (система EGW) засновано на зменшенні кількості газів, що надходять до газотурбонагнетача (ГТН). При цьому знижуються частота обертання ГТН, тиск і кількість повітря, що нагнітається в циліндр повітря. Перепуск газів здійснюється за допомогою спеціального клапана, що дозволяє направляти частину газів не до ГТН, а безпосередньо в газовипускную трубу. В даний час системи EGW встановлюються на суднових середньо-обертових головних і допоміжних дизелях.

3.3. Висновки за розділом 3

В результаті виконання розділу 3 зробимо наступні висновки

1. У зв'язку з тим, що переважна кількість теплових двигунів морських суден використовують для здійснення робочого циклу рідке паливо, завдання зниження концентрації викидів в атмосферу оксидів азоту, що утворюються при його згорянні, залишиться актуальна протягом найближчого десятиліття.

2. До основних методів очищення випускних газів від оксидів азоту, використання яких можливо у суднових умовах, належать:

- зволоження повітря наддуву;
- використання водо-паливних емульсій;
- використання прямого вприскування води в циліндр дизеля;
- модернізація конструкції паливної апаратури;
- використання системи Exhaust gas recirculation (EGR).

Використання системи EGR активно розробляється в даний час і має позитивний досвід застосування на морських судах.

4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ

4.1. Зниження емісії оксидів азоту під час використання системи рециркуляції випускних газів

4.1.1 Дослідження впливу рециркуляції випускних газів на екологічні, економічні та енергетичні показники роботи судових дизелів

В останнє десятиліття системи рециркуляція відпрацьованих газів все ширше застосовуються в судовій енергетиці для зниження токсичності відпрацьованих газів (в основному для зниження концентрації оксидів азоту NOX в випускних газах судових дизелів). Даними системами обладнуються як головні судові двигуни, передають потужність безпосередньо на гребний гвинт, так і потужні допоміжні двигуни, що забезпечують енергією судову електростанцію (останні активно застосовується для круїзних суден великої пасажиромісткості, які часто роблять заходи в прибережні води і райони екологічного контролю) [29].

Математичне моделювання процесів газообміну і згоряння при використанні системи EGR пов'язане з необхідністю врахування складних явищ теплового та масового перенесення [30], при цьому отримані результати не враховують технічний стан як самого дизеля і його паливної апаратури, так і системи EGR. Тому вдосконалення системи ERG і вибір найбільш оптимальних режимів її експлуатації доцільно здійснювати на базі експериментальних даних, отриманих безпосередньо при експлуатації систем EGR, вже встановлених на двигунах внутрішнього згоряння морських суден.

4.1.2. Технологія проведення експерименту

Експериментальні дослідження щодо впливу системи рециркуляції випускних газів на екологічні, енергетичні та економічні показники роботи двигуна внутрішнього згорання виконувалися на судновому мало-обертovому дизелі 7UEC60LS фірми Mitsubishi, яка працює за двотактному циклу і обладнаному штатною системою ERG.

Основні характеристики дизеля: діаметр циліндра - 600 мм; хід поршня - 2400 мм; кількість циліндрів – 7; номінальна потужність – 12600 кВт; частота обертання, відповідна номінальній потужності – 82 об/хв. Принципова схема дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi з системою рециркуляції випускних газів показана на рис. 4.1.

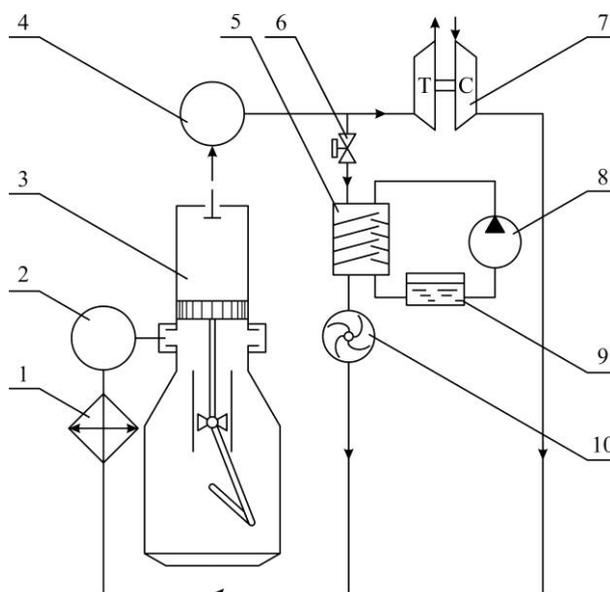


Рис. 4.1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів для суднового мало-обертovого дизеля:

- 1 – охолоджувач повітря; 2 – повітряний ресивер; 3 – циліндр дизеля;
- 4 – випускний колектор; 5 – скрубер; 6 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів; 7 – газотурбонагетач; 8 – водяний насос;
- 9 – водяна цистерна; 10 – газовий нагнітач з електричним приводом

Випускні гази з циліндра дизеля 3 надходять в випускний колектор 4 і далі до газотурбонагнетача 7, після чого через газовипускную трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнетач 7 забирає повітря з машинного відділення і після стиснення направляє його через охолоджувач 1 і ресивер 2 до продувальним вікнам дизеля. Система рециркуляції випускних газів складається з керуючого клапана 6, скрубера очищення газів 5, нагнітача 10, водяний цистерни 9 і водяного насоса 8. У разі використання системи рециркуляції випускних газів їх кількість регулюється клапаном 6. Випускні гази очищаються і попередньо охолоджуються в скрубери 5, після чого додатковим нагнітачем подаються на змішання з повітрям (що надходять з газотурбонагнетача 7) і надходять до охолоджувача 1 і ресивера 2 і далі через продувні вікна в циліндр дизеля 3. Газовий нагнітач 10 уявляє з себе вентилятор з постійною геометрією прохідного перетину. Даний тип нагнітачів найбільш поширений в системах EGR морських суден, при цьому ведуться експериментальні дослідження систем EGR с турбонагнітачами змінної геометрії.

4.1.3. Результати дослідження

Метою дослідження було визначення зміни концентрації NO_x в випускних газах, Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) b_e і ефективної потужності дизеля N_e для різного ступеня рециркуляції випускних газів.

Значення ефективної потужності дизеля N_e визначалося шляхом індиціювання дизеля за допомогою судової системи діагностики робочого процесу Doctor, що дозволяє отримати величину середнього індикаторного тиску p_i . Знаючи величину p_i (в МПа), а також характеристики дизеля і режим його роботи, величину N_e (в кВт) можливо розрахувати за виразом

$$N_e = \frac{V_s n i m}{60} p_i \eta_m,$$

де V_s – об'єм циліндра, м³;

n – частота обертання, об/хв;

i – число циліндрів;

m – коефіцієнт тактності (для розглянутого дизеля $m=1$);

p_i – середнє індикаторне тиск, МПа;

η_m – механічний коефіцієнт корисної дії дизеля, який при проведенні експерименту відповідно до інструкції по експлуатації приймався в діапазоні $\eta_m=0,903\dots0,924$ в залежності від режиму роботи дизеля.

Specific fuel oil consumption (SFOC) розраховувався за виразом де годинна витрата палива B_T визначався по витратоміри, встановленому на паливній магістралі.

Моніторинг концентрації шкідливих компонентів в випускних газах найбільш доцільно визначати за допомогою переносних газоаналізаторів [31].

При проведенні експериментів концентрація NO_x (а також концентрація O_2) у випускних газах визначалася за допомогою газоаналізатора Testo350XL виробництва Німеччини, що дозволяє визначати концентрації наступних речовин: CO , O_2 , N_2 , NO_x , CH_4 , SO_2 , H_2S , а також температуру, вологість, швидкість і диференціальне тиск вимірюваного середовища. Основні характеристики газоаналізатора Testo350XL:

Температура

діапазон виміру $-40\dots1200^\circ\text{C}$;

похибка вимірювання $\pm 0,5\%$;

дозвіл 0.1°C ;

зміст O_2 і N_2

діапазон вимірювання 0...25 об'ємних %;

похибка вимірювання ± 1 об'ємний %;

дозвіл 0.1 об'ємний%;

швидкодію 5...20 с;

зміст NO_x

діапазон вимірювання 0...3000 млн⁻¹;

похибка вимірювання $\pm 5\%$ при діапазоні вимірювань 0...2000 млн⁻¹;

$\pm 10\%$ при діапазоні вимірювань 2000...3000 млн⁻¹;

дозвіл 1 млн⁻¹;

швидкодія 1...30 с.

Ступінь рециркуляції випускних газів розраховувалася за виразом

$$\delta_{\text{EGR}} = \frac{\alpha_{\text{EGR}}}{\alpha},$$

де α – поточне значення коефіцієнта надлишку повітря в залежності від навантаження дизеля;

α_{EGR} – коефіцієнт надлишку повітря при використанні системи рециркуляції випускних газів.

Коефіцієнт надлишку повітря α визначався з урахуванням об'ємних концентрацій O_{2, Gas} і N_{2, Gas} в випускних газах (вимірюваних за допомогою газоаналізатора Testo350XL) за виразом

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{\text{O}_{2, \text{Gas}}}{\text{N}_{2, \text{Gas}}}}.$$

Для перерахунку вимірної за допомогою газоаналізатора Testo350XL концентрації NO_x, ppm (яка визначається в млн⁻¹ або ppm) в необхідну ІМО величину в г/(кВт·год) розраховувалося значення маси випускних газів G_{Gas}, кг/год, що виходять з дизеля

$$G_{\text{Gas}} = \alpha L_0 b_e N_e \varphi_a,$$

де $L_0=0,495$ кмоль/кг – теоретично необхідна кількість повітря для згорання палива;

φ_a – коефіцієнт продування

і далі виконувався розрахунок концентрації NO_x , кг/год

$$\text{NO}_{x,\text{kg/h}} = \frac{\text{NO}_{x,\text{ppm}} G_{\text{Gas}}}{\text{limNO}_x},$$

де limNO_x – максимально можливе значення концентрації NO_x , яка визначається за газоаналізатора Testo350XL (2000 млн⁻¹ або 3000 млн⁻¹ в залежності від обраного діапазону вимірювань).

Після чого, з урахуванням значення ефективної потужності дизеля N_e , необхідна в розмірності ІМО концентрації NO_x визначалася як

$$\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_{x,\text{кг/год}}}{N_e}.$$

Експерименти виконувалися для наступних швидкісних режимів роботи дизеля: 55, 65, 75 і 80 об/хв, що відповідало значенням відносної потужності дизеля: $0,3N_{\text{enom}}$, $0,5N_{\text{enom}}$, $0,77N_{\text{enom}}$ і $0,93N_{\text{enom}}$.

Ступінь рециркуляції відхідних газів під час експериментів змінювалася в наступних значеннях: EGR=4,7 %, EGR=9,8 %, EGR=14,6 %, EGR=18,8 % і визначалася за значенням коефіцієнта надлишку повітря відповідно до викладеної раніше методикою. Величина питомої ефективної витрати палива для кожного режиму роботи дизеля визначалася за допомогою суднових вимірювальних засобів. Як N_{enom} приймалася номінальна потужність, відповідна своїм значенням коефіцієнта надлишку повітря α .

Результати досліджень наведені на рис. 4.2 і 4.3.

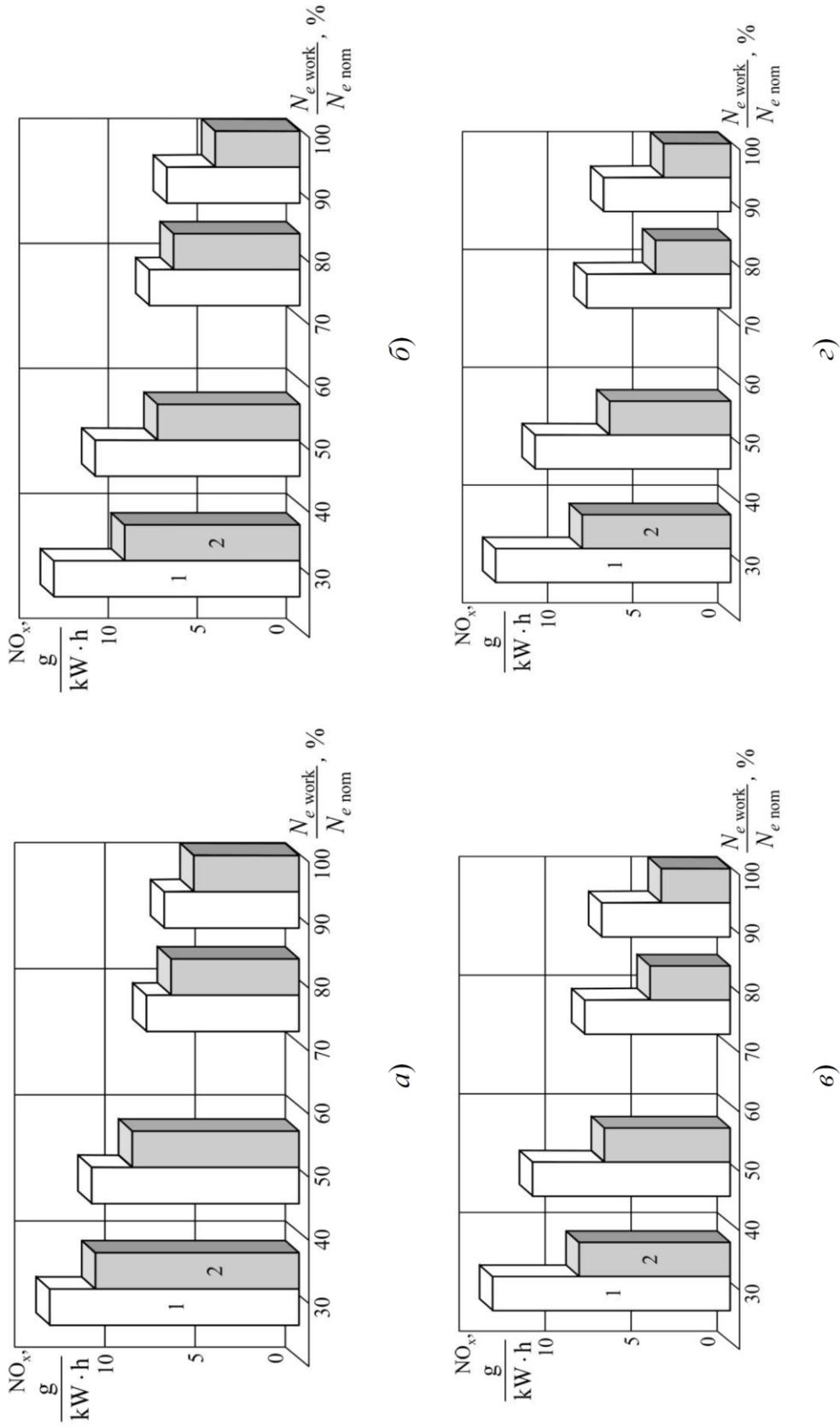


Рис. 4.2. Зміна концентрації NO_x в випускних газах суднового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi в залежності від навантаження для різного ступеня рециркуляції: а) EGR=4,7%; б) EGR=9,8%; в) EGR=14,6%; г) EGR=18,8%; 1 - робота без рециркуляції; 2 - робота з рециркуляцією

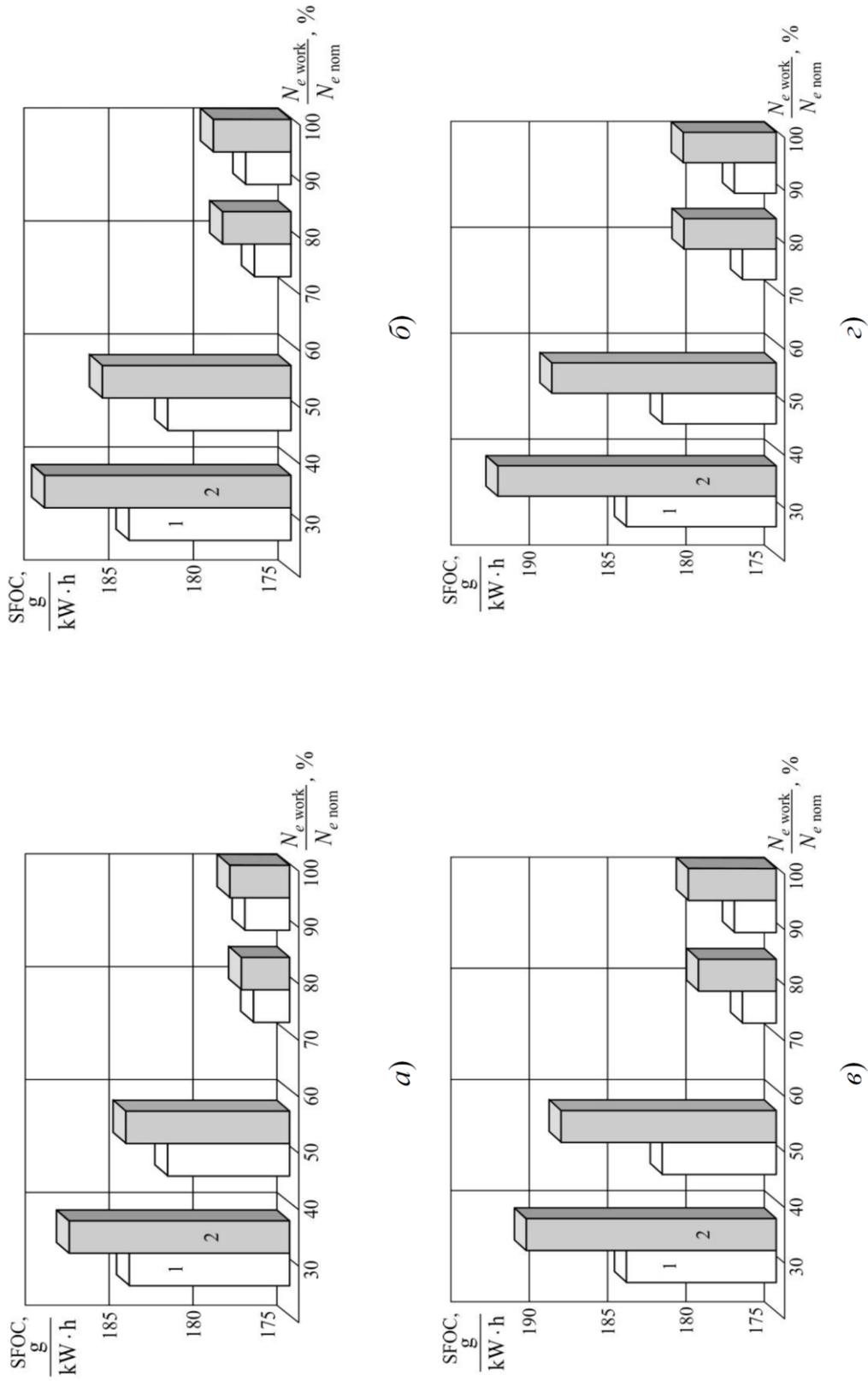


Рис. 4.3. Зміна питомої ефективної витрати палива SFOC суднового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi в залежності від навантаження для різного ступеня рециркуляції: а) EGR = 4.7%; б) EGR = 9.8%; в) EGR = 14.6%; г) EGR = 18.8%; 1 - робота без рециркуляції; 2 - робота з рециркуляцією

Використання системи ERG зменшує кількість «чистого» повітря, що надходить в циліндр дизеля, що призводить до зниження ефективної потужності дизеля [32]. Зміна її значень для різного ступеня рециркуляції показано на рис. 4.4. При цьому величини ефективної потужності N_e визначалися при частоті обертання колінчастого вала дизеля 80 об/хв (що відповідало $0,93N_{\text{ном}}$).

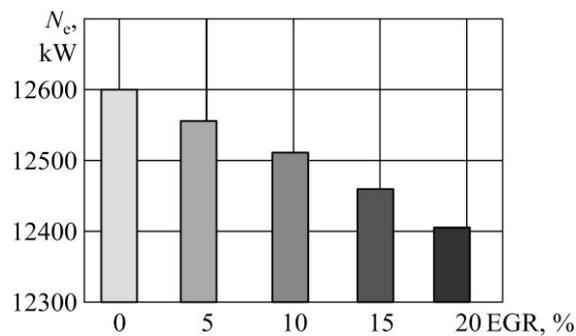


Рис. 4.4. Зниження ефективної потужності дизеля для різного ступеня рециркуляції випускних газів для експлуатаційного навантаження $0.93N_{\text{ном}}$

4.1.4. Аналіз отриманих результатів

Представлені результати узгоджуються з рядом подібних наукових досліджень [37, 38].

Примусове заповнення циліндра дизеля випускними газами, забезпечує системою рециркуляції EGR, призводить до зниження температури в процесі згоряння палива, що сприяє зменшенню кількості оксидів азоту, що утворюються по тепловому механізму. При цьому концентрація NO_x в випускних газах зменшується з ростом ступеня рециркуляції системи EGR. Аналогічні результати досягаються при збільшенні інтенсивності подачі випускних газів в циліндр (при збільшенні швидкості EGR) [35].

Збільшення ступеня рециркуляції газів в системі EGR знижує ефективну потужність дизеля. На нашу думку це пов'язано зі зменшенням кількості випускних газів, що надходять до газотурбонагнетача, і одночасним пропорційним збільшенням кількості випускних газів, що надходять в циліндр дизеля (через систему рециркуляції). Перше знижує потужність газотурбонагнетача N_T , а друге призводить до зниження коефіцієнта наповнення циліндра свіжим повітрям η_H . В обох випадках є прямо-пропорційна залежність одного параметра від іншого: $N_T \sim G_T$ і $N_e \sim \eta_H$, що й обумовлює падіння ефективної потужності при зростанні ступеня ERG.

Зниження ефективної потужності при використанні системи EGR на режимах близьких до номінальної навантаженні $N_{\text{ework}}=(0,77\dots0,93)N_{\text{enom}}$ становить 0,3...1,2 % і при якісній технічній експлуатації дизеля не робить суттєвого впливу на швидкісні характеристики судна. При використанні системи EGR на навантаженнях $N_{\text{ework}}=(0,3\dots0,5)N_{\text{enom}}$ відносне зниження ефективної потужності становить 2,4...3,4 %. Настільки істотне падіння потужності слід пояснити погіршенням процесу газообміну в циліндрі і підвищенням інтенсивності теплообміну між повітряно-газовою сумішшю і стінками циліндра при малих частотах обертання колінчастого вала.

Збільшення кількості випускних газів, що надходять в циліндр дизеля при підвищенні ступеня рециркуляції EGR, і погіршення процесу газообміну в циліндрі також є основною причиною зростання SFOC при використанні системи EGR. На нашу думку причиною цього є зміна стехіометричного співвідношення, а також збільшенням втрати теплоти від неповноти згоряння палива. Найбільше збільшення питомої ефективної витрати палива відповідає режимам роботи дизеля з мінімальною частотою обертання колінчастого вала. Подібні результати також були отримані при вивченні впливу системи EGR на робочий процес дефорсировать дизельного двигуна [36].

4.1.5. Висновки за результатами досліджень

Наведені результати дозволяють зробити наступні висновки.

Зміна ступеня рециркуляції випускних газів в діапазоні 4,7...18,8 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x в випускних газах з 13,5 до 3,8 $\text{гNO}_x/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ в залежності від навантаження дизеля, яка в експериментах змінювалася в інтервалі $(0,3...0,93)N_{\text{ном}}$. Зниження концентрації NO_x в випускних газах в процентному відношенні знаходиться в межах 19,5...48,8 %, причому великі значення відповідають інтервалу навантажень $(0,77...0,93)N_{\text{ном}}$, тобто найбільш поширеним з експлуатаційних режимів роботи дизеля.

Використання для зниження концентрації NO_x в випускних газах їх рециркуляції погіршує процес згоряння палива, що безпосередньо впливає на такий показник як Specific Fuel Oil Consumption. Його значення (згідно з проведеними дослідженнями) підвищується пропорційно зростанню ступеня рециркуляції випускних газів і в процентному співвідношенні складає 0,85...2,01 % для випадку $\text{EGR}=4,7\%$ і 2,16...4,34 % для випадку $\text{EGR}=18,8\%$.

В даний час такий спосіб зниження концентрації NO_x в випускних газах суднових дизелів як використання рециркуляції випускних газів є найбільш оптимальним в першу чергу з точки зору його технологічного виконання. Використання способу EGR на морських судах забезпечує виконання міжнародних вимог щодо захисту навколишнього повітряного середовища від забруднення і може успішно застосовуватися в судновій енергетиці.

4.2. Висновки за розділом 4

Як результат виконання розділу 4 зробимо наступні висновки.

1. Одним з найефективніших способів зниження емісії оксидів азоту є управління випускними газами.
2. В умовах морського судна управління випускними газами можливо забезпечити за допомогою системи їх рециркуляції.
3. Система рециркуляції випускних газів забезпечує суттєве покращення екологічних показників роботи суднових дизелів та поширення їх екологічної стійкості, що відображається у значному (до 15...16 %) зниженні емісії оксидів азоту з випускними газами.

5. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

З 1 січня 2013 року відповідно до положень Резолюції ІМО МЕРС.203(62)(9) вступили в силу нові правила Конвенції МАРПОЛ, спрямовані на підвищення енергоефективності суден. На всі нові судна, побудовані після 1 січня 2013 року поширюється вимога щодо розрахунку «Експлуатаційної коефіцієнта енергоефективності судна», а для суден, що перебувають в експлуатації, з цієї дати вводиться вимога по наявності на борту «Плану управління енергоефективністю судна (ПУЕС) / Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)» [39].

Вимоги до енергоефективності нових суден (в частині відповідності ними конструктивного коефіцієнту енергоефективності – ККЕЕ) викладені у відповідній методиці ІМО. Коефіцієнт враховує не тільки потужність силової суднової установки, а й загальні дані судна.

Розрахунок ККЕЕ проводиться за загальною методикою, наведеною ІМО в керівництві МЕРС 62/24/Add.1. Потім судно перевіряється морською адміністрацією держави або її уповноваженим органом - Регістром судноплавства. Після успішної перевірки судну видається Міжнародний сертифікат з енергоефективності.

У загальному вигляді формулу розрахунку ККЕЕ можна представити таким чином:

$$\text{ККЕЕ} = \frac{\text{кількість викидів CO}_2}{\text{виконана транспортна робота}}.$$

Кількість викидів CO₂ визначається за витраченого за рейс паливу певного сорту. У свою чергу, витрата палива СЕУ базується на потужності

двигунів пропульсивного комплексу на певному експлуатаційному режимі та інших споживачів палива на судні.

Вироблена транспортна робота судном визначається його конструктивними особливостями, об'ємом вантажних відсіків і швидкістю судна, заміряний при максимальному завантаженні по літню вантажну марку і 75% потужності ГД.

Максимальна величина $K_{KE(MAX)}$ задається статечної емпіричною формулою залежно від типу судна і його дедвейту:

$$K_{KE(MAX)} = a_i \cdot Dw_{(i)(j)}^{-c_i},$$

де a_i, c_i – емпіричні коефіцієнти i -го типу судна $i = 1 \dots 7$

$$a_i = \begin{cases} 961,8 \\ 1120 \\ 1218 \\ 174,2 \\ 107,5 \\ 227 \\ 1219 \end{cases} \quad c_i = \begin{cases} 0,477 & \text{для } i = 1 \text{ – балкера,} \\ 0,456 & \text{для } i = 2 \text{ – газовеоза,} \\ 0,488 & \text{для } i = 3 \text{ – танкера,} \\ 0,201 & \text{для } i = 4 \text{ – контейнеровеоза,} \\ 0,216 & \text{для } i = 5 \text{ – універсального,} \\ 0,244 & \text{для } i = 6 \text{ – рефрижераторного,} \\ 0,488 & \text{для } i = 7 \text{ – комбінованого судна;} \end{cases}$$

$Dw_{(i)(j)}$ – j -й дедвейт i -го типу судна.

Розрахункове значення коефіцієнта енергетичної ефективності судна ККЕЕ визначається за наступною формулою:

$$K_{KE(роз)} = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) + \left[\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nPI} P_{PI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right] - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

У загальному випадку, ККЕЕ (розрахунковий) прямо пропорційний витраті палива усіма судновими споживачами з урахуванням утилізації тепла та інших енергозберігаючих конструкційних заходів і обернено пропорційний роботі судна з перевезення вантажів.

Формула для визначення ККЕЕ містить наступні складові:

a) витрати пов'язані з головними двигунами (потужність ГД, витрата палива і викиди CO₂)

$$\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right),$$

де $\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}$ – сумарна потужність ГД, кВт;

$C_{FME(i)}$ – питомий (масовий) вміст CO₂ при повному згорянні вуглецю в паливі, витраченому ГД, $\frac{\text{тонн углероду}}{\text{тонн палива}}$;

$SFC_{ME(i)}$ – питома ефективна витрата палива на ГД, кг/(кВт·г);

b) витрати, що пов'язані з дизель-генераторами (потужність ДГ, витрата палива і викиди CO₂)

$$P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE},$$

P_{AE} – потужність ДГ на ходовому режимі судна, кВт;

C_{FAE} – питомий (масовий) вміст CO₂ при повному згорянні вуглецю в паливі, витрачених ДГ, $\frac{\text{тонн углероду}}{\text{тонн палива}}$;

SFC_{AE} – питома ефективна витрата палива на ДГ, кг/(кВт·г);

c) енергозберігаючі технології для допоміжних установок

$$\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE},$$

d) енергозберігаючі технології для головних установок

$$\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME},$$

е) робота судна з перевезення вантажів

$$f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w,$$

f_i – коефіцієнт вантажомісткості для суден (крім льодового класу) приймається рівним 1;

$Capacity$ – дедвейт судна, тонн;

f_w – безрозмірний коефіцієнт, котрий вказує на зниження швидкості судна при хвилюванні і хитавиці (визначається на ходових випробуваннях або розрахунковим шляхом, або приймається рівним 1 до уточнення);

V_{ref} – експлуатаційна швидкість судна, вузли.

Значення питомого (масового) вмісту CO_2 при повному згорянні вуглецю в паливі наведені у таблиці 5.1 [40].

Таблиця 5.1. Характеристики палив, що використовуються на судах

№	Тип палива	Примітка	Вміст вуглецю, г/л	$C_F, \frac{\text{тонн } CO_2}{\text{тонн палива}}$
1	Diesel/Gas Oil	ISO 8217	0,8744	3,2206
2	Light Fuel Oil (LFQ)	ISO 8217	0,8594	3,151
3	Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217	0,8493	3,114
4	Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane Butane	0,8182... 0,8264	3,00...3,003
5	Liquefied Natural Gas (LNG)	–	0,7500	2,750

Як видно з формули для ККЕЕ, у розрахунках не враховується витрата палива на виробництво пари ВК, тобто пар генерується тільки в утилізаційному котлі.

Дані, необхідні для розрахунку ККЕЕ наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Вихідні дані для розрахунку ККЕЕ

Тип судна	Контейнеровоз
Загальна довжина, м	173,27
Довжина між перпендикулярами, м	168,28
Ширина, м	25,47
Осадка, м	10,12
Дедвейт, тонн	28585
Головний двигун	7UEC60LS фірми Mitsubishi
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год)	12600 175
Потужність, кВт і витрата палива, г/(кВт·год) ГД при 0,75 (MCR)	9450 0,172
Кількість ГД	1
Використовуване паливо ISO 8217-2010	RMK380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Кількість ДГ	3
Допоміжні двигуни	6L27/38 фірми MAN-B&W
Вихідна потужність ДГ, кВт	2040
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і витрата палива (г/кВт·год)	3×1850 184
Використовуване паливо	RMK 380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Швидкість судна при літній осаді і 75% потужності ГД на глибокій воді, вузли	17,4

Значення максимального $K_{KE(MAX)}$

$$K_{KE(MAX)} = 174,2 \cdot 28585^{-0,201} = 22,15 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}.$$

Розрахункове значення ККЕЕ визначимо за формулою

$$K_{KE(роз)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{nE} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot Capacity \cdot f_W \cdot V_{ref}},$$

$$K_{KE(роз)} = \frac{1 \cdot 9450 \cdot 3,114 \cdot 172 + 1431 \cdot 3,114 \cdot 181}{1,0 \cdot 28585 \cdot 1,0 \cdot 17,4} = 11,8 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}.$$

З наведеного розрахунку видно що значення $K_{KE(роз)}$ при заданих параметрах нижче $K_{KE(MAX)}$, тому необхідна енергетична ефективність забезпечується.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота присвячена розв'язанню важливого науково-прикладного завдання – зниженню токсичності випускних газів суднових дизелів.

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

Суднові двигуни внутрішнього згорання входять до складу будь-якої суднової енергетичної установки та виконують функції головних чи допоміжних двигунів. При здійсненні робочого циклу в циліндрі дизеля, в результаті якого потенційна енергія палива перетворюється у кінетичну енергію обертання колінчастого вала, валопроводу та гвинта і далі забезпечує рух судна, в атмосферу викидається великий обсяг випускних газів, деяка частина яких є шкідливими речовинами. Одним із небезпечних компонентів випускних газів є оксиди азоту, які утворюються при згоранні рідкого палива нафтового походження.

Зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах є актуальним завданням, особливо при знаходженні річкових та морських суден у акваторіях портів, а також у прибережних водах.

В результаті виконання дипломної роботи зробимо наступні висновки.

1. Прагнення до захисту навколишнього середовища від забруднень, у тому числі і з суднових енергетичних установок, накладає суворі обмеження до забезпечення екологічної безпеки при експлуатації суднових дизелів. До стандартних обмежень по захисту навколишнього середовища від забруднень нафтою, нафтовими водами, сміттям, побутовими відходами, додаються вимоги по запобіганню забрудненню повітряного простору.

2. Тенденції форсування суднових дизелів, збільшення інтенсивності експлуатації флоту, а також розширення парку дизельних двигунів неминуче супроводжуються зростанням шкідливих викидів в атмосферу. Основу цих викидів складають оксиди азоту NO_x , окисел вуглецю CO , оксиди сірки SO_x , вуглеводні HC і зола. До несприятливих чинників також належить димність випускних газів.

3. Для зменшення змісту NO_x у випускних газах дизелів використовуються два принципові методи. Первинний метод переслідує мету зменшення NO_x , що утворюється в процесі згорання палива, а вторинний метод переслідує мету видалення NO_x з відпрацьованими газами.

4. Первинні методи включають наступні варіанти:

- зменшення максимального тиску згорання;
- зменшення максимальної температури циклу шляхом регулювання температури повітря;
- використання водо-паливної емульсії;
- зміна співвідношення між паливом і повітрям шляхом використання рециркуляції випускних газів;
- застосування різних видів альтернативних палив, і зокрема горючих газів: природного, попутного і ін..

5. Одним з ефективних засобів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами та поширення екологічної стійкості суднових дизелів є використання системи рециркуляції випускних газів – EGR (Exhaust Gas Recirculation). Ця технологія заснована на перепусканні випускних газів

перед турбокомпресором з випускного ресивера в систему продувального повітря.

6. Зміна ступеня рециркуляції випускних газів в діапазоні 4,7...18,8 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x в випускних газах з 13,5 до 3,8 $\text{гNO}_x/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ в залежності від навантаження дизеля (для діапазону $(0,3...0,93)N_{\text{енорм}}$). Зниження концентрації NO_x в випускних газах в процентному відношенні знаходиться в межах 19,5...48,8 %, причому великі значення відповідають інтервалу навантажень $(0,77...0,93)N_{\text{енорм}}$, тобто найбільш поширеним з експлуатаційних режимів роботи дизеля.

7. Використання для зниження концентрації NO_x в випускних газах їх рециркуляції погіршує процес згоряння палива, що безпосередньо впливає на такий показник як питома ефективна витрата палива. Її значення підвищується пропорційно зростанню ступеня рециркуляції випускних газів і в процентному співвідношенні складає 0,85...2,01 % для випадку $\text{EGR}=4,7\%$ і 2,16...4,34 % для випадку $\text{EGR}=18,8\%$.

8. В даний час такий спосіб зниження концентрації NO_x в випускних газах суднових дизелів як використання рециркуляції випускних газів є найбільш оптимальним в першу чергу з точки зору його технологічного виконання. Використання способу EGR на морських судах забезпечує виконання міжнародних вимог щодо захисту навколишнього повітряного середовища від забруднення і може успішно застосовуватися в судновій енергетиці.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Заблоцкий Ю.В. Повышение топливной экономичности и экологических параметров работы судовых дизелей при использовании присадок к топливу / Ю.В. Заблоцкий, А.А. Куропятник // Austria-science. – 2017. – № 2. – С. 83-88.

2. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. - техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

3. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A., Zablotskyi Yu. V. Gaichenia O. V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7

4. Ruan G. Exhaust gas recirculation control based on artificial neural network / G. Ruan, Z. Zhang, Q. Wang // International journal of advancements in computing technology. – 2012. – Vol. 4. – Iss. 19. – P. 131-138. DOI: 10.4156/ijact.vol4.issue 19.17.

5. Lee K. Generating efficiency and NO_x emissions of a gas engine generator fueled with a biogas-hydrogen blend and using an exhaust gas recirculation system / K. Lee, T. Kim, H. Cha, S. Song, K.M. Chun // International Journal of Hydrogen Energy. – June 2010. – Vol. 35. – Iss. 11. – P. 5723-5730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.076.

6. Sagin S.V. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines / S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk // Nase more : znanstveni časopis za more i pomorstvo, 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78-86. DOI / 10.17818/NM/2018/2.3

7. Aithal S.M. Modeling of NO_x formation in diesel engines using finite-rate chemical kinetics // *Applied Energy*. – July 2010. – Vol. 87. – Iss. 7. – P. 2256-2265. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.01.011.

8. Белоусов Е.В. Влияние на рабочий процесс среднеоборотного судового дизеля путем впрыскивания воды в рабочий цилиндр / Е. В. Белоусов, М. С. Агеев, В. И. Свиридов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2010. – № 1. – С.40-43.

9. Zheng M. Energy efficiency improvement strategies for a diesel engine in low-temperature combustion / M. Zheng, U. Asad, G. T. Reader, Y. Tan, M. Wang // *International journal of energy research*. – 2009.– Vol. 33. – Iss. 1. – P. 8-28. DOI: 10.1002/er.1464.

10. Xu F. External EGR combined with EGR for high load extension on a gasoline HCCI engine / F. Xu, Z Wang., D. B. Yang, J. X. Wang // *Neiranji Gongcheng*. – 2010. – Vol. 31. – Iss. 4. – P. 6-10.

11. Мадей В.В. Визначення раціональних режимів роботи судових дизелів під час використання палив ненафтового походження // *Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*, 24.03.2022 – 25.03.2022.– Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 61-65.

12. Gureev V.M. Influence of exhaust gas recirculation on technical, economic, and environmental performance of high-uprated diesel aircraft engine / V. M. Gureev, A. K. Khairullin, F. A. Varlamov, I. F. Gumerov, R. K Khafizov. // *Russian aeronautics*. – 2016. – Vol. 59. – Iss. 4. – P. 554-558. DOI: 10.3103/S1068799816040188.

13. Куropyatnyk O. A., 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.

14. Zhao Y. Effect of EGR exhaust gas component on oxidation activity of particle from diesel engine / Y. Zhao, M. Li, G. Xu, Q. Chen, Z. Wang // *Nongye*

Congcheng Xuebao. – 2016. – Vol. 32. – Iss. 23. – P. 58-63. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.23.008.

15. 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>.

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

17. Кринецкий И. И. Основы научных исследований: учебное пособие для вузов / И. И. Кринецкий. – К. ; Одесса : Вища школа, 1981. – 208 с.

18. Голиков В.В. Системный подход к проблеме безопасного управления судном / Голиков В. В // Судовождение. – Одесса. – 2010. – Вып. 17. – С. 51-58.

19. Козьминых А.В. Основы системного анализа судовых энергетических установок: учебное пособие / А. В. Козьминых. – Одесса : ОГМА, 2000. – 192 с.

20. Куропятник А. А. Обеспечение экологических характеристик работы судовых дизелей / Куропятник А. А. // Матер. наук.-техн. конференції «Річковий та морський флот : експлуатація і ремонт», 23.03.2017 – 24.03.2017. Частина 1. – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 120-123.

21. Куропятник А. А. Снижение эмиссии оксидов азота судовых дизелей / Куропятник А. А. // Суднова енергетика: стан та проблеми : Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, 2017. – С. 63-69.

22. Sagin S. V. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels / S. V. Sagin, A. A. Kuropyatnik // American Scientific Journal, 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.

23. Куропятник А. А. Снижение концентрации оксидов азота в выпускных газах судовых дизелей / А. А. Куропятник // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 63-66.

24. Sagin S. V. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines / S. V. Sagin, A. A. Kuropyatnik // *OUR SEA : International Journal of Maritime Science & Technology*. – June 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3 (Index Scopus)

25. Куропятник А. А. Обеспечение экологических параметров работы судовых дизелей / Куропятник А. А. // *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції MINTT-2018, 29-31 травня 2018 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2018. – С. 325-328.*

26. Куропятник А. А. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей / А. А. Куропятник, С. В. Сагин // *Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. сборник*. – 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.

27. Kuropyatnyk O. A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines / O. A. Kuropyatnyk // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42*

28. Куропятнік О. А. Зниження емісії оксидів азоту суднових дизелів методом перепуску выпускних газів / О. А. Куропятнік // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 98-108.*

29. Kuropyatnyk O. A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NO_x Emissions from Marine Diesel Engines / O. A. Kuropyatnyk, S. V. Sagin // *OUR SEA : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2019. – Vol. 66. – № 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1> (Index Scopus)

30. Kuropyatnyk O. A. The use of bypass exhaust gases to ensure the environmental performance of marine diesel engines / O. A. Kuropyatnyk // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 217-216.

31. Куропятник А. А. Обеспечение уровня эмиссии оксидов азота судовых четырехтактных дизелей / А. А. Куропятник // Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2019. – С. 181-186.

32. Куропятник А. А. Обеспечение требований конвенции МАРПОЛ73/78 по ограничению выбросов NO_x путем перепуска выпускных газов / А. А. Куропятник // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 вересня 2019 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2019. – С. 109-111.

33. Kuropyatnyk O. A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines / O. A. Kuropyatnyk // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259

34. Sagin S. V. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // Modern Applied Science; Published by Canadian Center of Science and Education, Vol. 9, № 5. – 2015. – P. 269-278. DOI:10.5539/mas.v9n5p269.

35. Sagin S. V. Marine Slow-Speed Diesel Engine Diagnosis with View to Cylinder Oil Specificarion / S. V. Sagin, O. V. Semenov // American Journal of Applied Sciences, Published by Science Publication, 2016. – Vol.13. – Iss. 5. – P. 618-627. DOI: 10.3844/ajassp.2016.618.627.

36. Sagin S. V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors / S. V. Sagin, O. V Semenov. // American Journal of Applied Sciences, Published by Science Publication, 2016. – Vol.13. – Iss. 2. – P. 200-208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208.

37. Zablotsky Yu. V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu. V. Zablotsky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology, Published by Indian Society of Education and Environment, May 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

38. Каравасв М.А. Забезпечення дотримання екологічних норм судновими дизелями в районах контролю за викидами / М.А. Каравасв, М.О. Колегаєв // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУОМА. –С. 43-47.

39. Голиков В. А. Расчет энергетической эффективности судна : методическое пособие по дипломному проектированию / В. А. Голиков, О. А. Онищенко, И. В. Логишев. – Одесса : НУ «ОМА», 2016. – 48 с.

40. Половинка Э. М. Эффективность судовой энергетической установки : методическое пособие / Э. М. Половинка, И. Н. Табулинский. – Одесса : ОНМА, 2014. – 24 с.