

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

Кафедра суднових енергетичних установок

**ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА**

на тему:

**ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ  
ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДИЗЕЛІВ СУДЕН  
МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ**

Студента 2-го року навчання заочного відділення  
навчально-наукового інституту інженерії  
Воронкова Гліба Сергійовича

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

Нормоконтроль

Д. Фісун к. т. н., доц. Фармеев Д.Т.

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)

Рецензент (зовнішній)

(ПІБ, підпис, дата)

А. Мейс А. Мейс  
23.12.25

Рецензент (внутрішній)

(ПІБ, підпис, дата)

Д. Фісун Д.Т. Фармеев 24.12.25

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
суднових енергетичних установок

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

**ЗАВДАННЯ**

на виконання дипломної роботи магістра

Курсант ННІ \_\_\_\_\_ Воронков Гліб Сергійович \_\_\_\_\_

1. Тема дипломної роботи: \_\_\_\_\_ Зниження емісії оксидів азоту з під час \_\_\_\_\_  
експлуатації дизелів суден морського транспорту \_\_\_\_\_

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

2. Об'єкт дослідження \_\_\_\_\_ процес підвищення екологічної безпеки \_\_\_\_\_  
суден морського та внутрішнього водного транспорту \_\_\_\_\_

3. Предмет дослідження \_\_\_\_\_ процес перепуску випускних газів \_\_\_\_\_  
суднових дизелів \_\_\_\_\_

4. Обсяг пояснювальної записки: \_\_\_\_\_ 70...80 стор. \_\_\_\_\_

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Аналіз літературних джерел з проблеми забезпечення екологічності роботи суден \_\_\_\_\_  
морського флоту \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Методологія наукового дослідження процесів забезпечення екологічності роботи \_\_\_\_\_  
суден морського флоту \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Моделювання нестационарних процесів, що відбуваються в циліндрі дизеля під \_\_\_\_\_  
час згоряння рідкого палива \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Дослідження процесів перепуску випускних газів як засобу забезпечення \_\_\_\_\_  
екологічності суден морського флоту \_\_\_\_\_

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

\_\_\_\_\_ Аналіз літературних джерел з проблеми забезпечення екологічності роботи суден \_\_\_\_\_  
морського флоту \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Методологія наукового дослідження процесів забезпечення екологічності роботи \_\_\_\_\_  
суден морського флоту \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Моделювання нестационарних процесів, що відбуваються в циліндрі дизеля під \_\_\_\_\_  
час згоряння рідкого палива \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Дослідження процесів перепуску випускних газів як засобу забезпечення \_\_\_\_\_  
екологічності суден морського флоту \_\_\_\_\_

7. Перелік графічного матеріалу:

\_\_\_\_\_ Методологія наукового дослідження \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Аналіз способів зниження емісії оксидів азоту з випускними газами \_\_\_\_\_  
суднових чотиритактних дизелів \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Результати досліджень \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Висновки \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 77 сторінок, 14 рисунків, 14 таблиць, 64 літературних джерел.

Дипломна робота магістра спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – підвищення екологічності роботи суден морського флоту.

Висунута та підтверджена наукова гіпотеза про те, що підвищення екологічної ефективності морських суден досягається шляхом перепуску випускних газів двигунів внутрішнього згоряння.

Встановлено, що керування випускними газами шляхом їх перепуску можливо використовувати як додатковий спосіб забезпечення екологічності морського судна. З технічно можливого діапазону (який деякими фірмами-виробниками дизелів забезпечується в межах 0 ... 10 % від загального об'єму газів) найбільш оптимальними (з точки зору ближчого до максимального зниження емісії оксидів азоту з одночасним мінімальним збільшенням витрати палива та підтриманням теплової напруженості) є режими, на яких забезпечується 4 ... 6 %-ий перепуск газів, при цьому досягається зниження емісії  $\text{NO}_x$  з випускними газами на 3,33 ... 15,42 %.

СУДНОВИЙ СЕРЕДНЬООБЕРТОВИЙ ДИЗЕЛЬ, ЕКОЛОГІЧНІСТЬ ДИЗЕЛЯ,  
ПЕРЕПУСК ГАЗІВ, ЕМІСІЯ ОКСИДІВ АЗОТУ

## ABSTRACT

The master's thesis: 77 pages, 14 figures, 14 tables, 64 references.

The master's thesis is aimed at solving scientific and applied tasks – improving the environmental friendliness of marine.

A scientific hypothesis has been put forward and confirmed that the increase of ecological efficiency of sea vessels is achieved by passing the exhaust gases of internal combustion engines. It is established that the control of exhaust gases by bypassing them can be used as an additional way to ensure the environmental friendliness of the ship.

From the technically possible range (which is provided by some diesel manufacturers within 0 ... 10 % of the total volume of gases) the most optimal (in terms of closer to the maximum reduction of nitrogen oxides emissions with a simultaneous minimum increase in fuel consumption and maintenance of thermal stress) are modes in which 4 ... 6 % gas bypass is provided, while the reduction of NOX emissions with exhaust gases by 3.33 ... 15.42 % is achieved.

MARINE MEDIUM SPEED DIESEL, DIESEL ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS, GAS BYPASS, EMISSION OF NITROGEN OXIDES

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ.....	12
1.1. Основні екологічні показники суден морського та внутрішнього водного транспорту .....	12
1.2. Вимоги Міжнародних та національних організацій щодо забезпечення рівня шкідливих домішок у випускних газах суден морського та внутрішнього водного транспорту .....	18
1.3. Аналіз основних шляхів поліпшення екологічних показників роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту ...	20
1.4. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту у випускних газах дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту .....	22
1.5. Висновки за розділом 1 .....	23
МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ .....	25
2.1. Вибір теми наукового дослідження .....	25
2.2. Обґрунтування мети і завдань дослідження .....	28
2.3. Системний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження .....	29
2.4. Висновки за розділом 2 .....	32

3. МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В ЦИЛІНДРІ ДИЗЕЛЯ ПІД ЧАС ЗГОРЯННЯ РІДКОГО ПАЛИВА .....	33
3.1. Моделювання процесу утворення оксидів азоту під час згоряння палива .....	33
3.2. Моделювання переносу теплової енергії в циліндрі дизеля .....	36
3.2. Висновки за розділом 3 .....	39
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕПУСКУ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ ЯК ЗАСОБУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ .....	40
4.1. Аналіз схем перепуску випускних газів дизелів морського та внутрішнього водного транспорту .....	40
4.2. Експериментальні дослідження впливу перепуску випускних газів на показники роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту .....	42
4.2.2. Результати досліджень, виконаних на судновому середньообертovому дизелі 6L20 Wartsila .....	42
4.2.2. Результати досліджень, виконаних на судновому середньообертovому дизелі 6L26 Wartsila .....	50
4.3. Висновки за розділом 4 .....	57
5. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ .....	59
ВИСНОВКИ .....	65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	68

## ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВГ	–	випускні гази
ВПЕ	–	водопаливна емульсія
ГД	–	головний двигун
ГТН	–	газотурбонагнетач
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ДД	–	допоміжний двигун
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
МАРПОЛ	–	Міжнародна конвенція з запобігання забрудненню з суден
МОД	–	малообертовий дизель
СЕУ	–	суднова енергетична установка
СОД	–	середньообертовий дизель
EGR	–	Exhaust Gas Recirculation
EWG	–	Exhaust Gas Wastegate
ІМО	–	International Maritime Organization
МЕРС	–	Marine Environment Protection Committee
SCR	–	Selective Catalytic Reduction

## ВСТУП

Розвиток суднових дизелів пов'язано не лише зі збільшенням їхньої циліндрової потужності, але також зі збільшенням кількості випускних газів (ВГ), що потрапляють в довкілля в результаті робочого циклу. В даний час серед контрольованих параметрів дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту важливе значення приділяється такому екологічному показнику, як концентрація оксидів азоту в ВГ. Це значення регламентуються міжнародними вимогами, його підтримка у заданому діапазоні є обов'язковим під час експлуатації суднових енергетичних установок, як в акваторіях Світового океану, також у територіальних водах морських країн. Оксиди азоту  $\text{NO}_x$  є одними з найбільш токсичних компонентів ВГ. За нормальних атмосферних умов азот є інертним газом. Під час високого тиску та особливо високої температури азот активно входить у реакцію з киснем. У ВГ двигунів понад 90 % усієї кількості  $\text{NO}_x$  становить оксид азоту  $\text{NO}$ , який у системі випуску та в атмосфері легко окислюється в діоксид  $\text{NO}_2$ , а далі перетворюється на азотну кислоту  $\text{HNO}_3$ . Згодом азотна кислота конденсується в повітрі, повертається на поверхню Світового океану або острівну та материкову частину Землі у вигляді кислотних дощів та негативно впливає на довкілля та людину. У зв'язку з цим ціла низка міжнародних організацій (зокрема International Maritime Organization – IMO) запроваджують суворі вимоги, виконання яких дозволяє забезпечити екологічні параметри роботи суднових двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) щодо емісії оксидів азоту  $\text{NO}_x$  [1].

Важливість розв'язання завдань щодо забезпечення екологічних показників суден морського та внутрішнього водного транспорту під час експлуатації ДВЗ визначається вимогами Додатка VI MARPOL, яким (у тому числі) обмежуються рівень емісії оксидів азоту у ВГ. Одним із способів

підтримання емісії  $\text{NO}_x$  в межах, що відповідають цим вимогам, є використання систем керування ВГ, яке (у більшості випадків) виконується шляхом їх рециркуляції, або перепуску. Будь яке поліпшення екологічності роботи суден річкового та морського транспорту пов'язане з одночасним погіршенням енергетичних (на сам перед ефективної потужності) та економічних (питомої або годинної витрати палива) показників ДВЗ. Визначання оптимальних режимів роботи систем керування ВГ (з точки зору забезпечення максимального зниження концентрації оксидів азоту та стабілізації досягнутого значення на рівні, відповідному вимогам, що висуваються міжнародними кваліфікаційними товариствами) при одночасному мінімальному зниженні енергетичних та мінімальному підвищенні економічних показників ДВЗ суден морського та внутрішнього водного транспорту є **актуальним завданням**.

Напрямки вдосконалення з сучасних дизелів в даний час визначаються значною мірою екологічними стандартами, суттєво відрізняються в залежності від об'єктів, на які встановлюються дизелі. Тому при розробці робочого процесу енергетичної установки потрібно враховувати не тільки необхідність отримання високих техніко-економічних показників дизелів, а й вимоги, які висуваються до паливної апаратури та інших елементів дизеля по забезпеченню зниження токсичності ВГ та забезпечення екологічності роботи суден морського флоту.

Впродовж останнього десятиліття провідними компаніями, що будують двигуни, велася інтенсивна дослідницька і проектне-конструкторська робота з переведення судових дизелів на дешеві важкі палива і зниженню емісії оксидів азоту з ВГ у зв'язку із зростаючими вимогами до захисту довкілля.

Саме цим питанням присвячена дипломна робота.

## 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ

Морський та внутрішній водний транспорт є складовою частиною економіки всіх розвинених країн, що мають вихід до акваторії Світового океану. Згідно з «Морським звітом Організації Об'єднаних Націй за 2023 рік» ("United Nations 2021 Maritime Report"), обсяг морських перевезень у 2023 році досяг 114 млрд. тонн, при цьому після світової кризи 2008...2010 рр. підтверджено стабільне зростання світової морської торгівлі (рис. 1.1) [1]. Аналогічні тенденції були зафіксовані у 2024 р. [2] й очікуються у 2025 р. [3].

Активний розвиток судноплавства сприяє зростанню суднобудування і двигунобудування. При цьому головним генератором енергії, що забезпечує рух і функціонування суден морського та внутрішнього водного транспорту (незалежно від їх призначення, дедвейту і району плавання), а також життєдіяльність екіпажу та відпочинок пасажирів є ДВЗ.

### 1.1. Основні екологічні показники суден морського та внутрішнього водного транспорту

Експлуатація суден морського та внутрішнього водного транспорту пов'язана як із забезпеченням їх енергетичних показників, так і з підтриманням необхідного рівня їх екологічності (екологічних параметрів). Теплові двигуни суден морського та внутрішнього водного транспорту не тільки генерують корисну енергію (яка передається на гребний гвинт, забезпечуючи рух судна, або використовується для електричного приводу

допоміжних механізмів і пристроїв), але і є джерелами різного забруднення морського і повітряного середовища [4]. До основних продуктів, які згубно впливають на екологію в результаті використання будь-яких теплових двигунів, відносяться нафтові залишки (забруднене паливо і мастило, дисперсний стан яких не дозволяє паливній апаратурі здійснити їх впорскування в камеру згорання дизеля або топку котла) і ВГ, які безпосередньо викидаються в атмосферу [5]. Нафтові залишки (відходи сепарації і фільтрації палива і мастила, а також неподільні емульсії води і палива) збираються в спеціальних накопичувальних ємностях і згодом здаються на берегові станції рециклінгу або утилізації [6]. ВГ, на жаль, викидаються безпосередньо в атмосферу, лише в поодиноких випадках піддаючись додатковому очищенню [7].

За своєю природою ВГ дизелів є дуже складною сумішшю парів, газів, крапель рідин і частинок і містять близько 270 речовин, частина з яких є токсичними. Під час використання вуглеводневих палив нафтового походження і атмосферного повітря як окислювача ВГ суднових енергетичних установок (СЕУ) складаються на 99...99,9 % з нетоксичних компонентів – продуктів неповного згорання (діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$  і водяна пара  $\text{H}_2\text{O}$ ), а також повітря зі зниженим вмістом кисню  $\text{O}_2$  і азоту  $\text{N}_2$ ; решту 0,1...1,0 % обсягу складають домішки, які є шкідливими для довкілля та людини [8].

Під час окислення киснем повітря горючих елементів палива (вуглецю  $\text{C}$ , водню  $\text{H}$  та сірки  $\text{S}$ ), а також азоту  $\text{N}$  та подальшого згорання паливо-повітряної суміші здійснюється утворення наступних токсичних компонентів: вуглекислого газу  $\text{CO}$ , оксидів вуглеводню, вуглеводнів  $\text{C}_n\text{H}_m$  (в тому числі поліциклічних і ароматичних), сажі  $\text{C}$ , оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , оксидів сірки  $\text{SO}_x$ , а також сполук важких металів, що знаходяться в паливі (рис. 1.1).

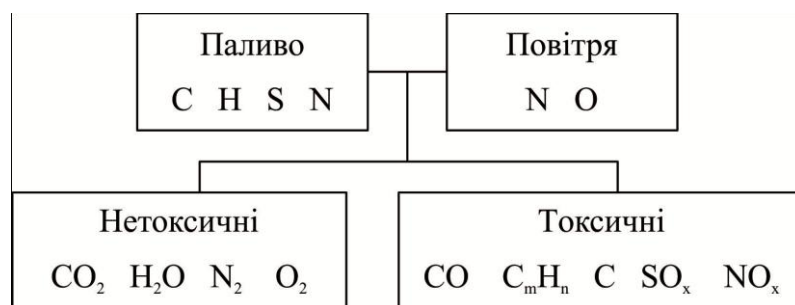


Рис. 1.1 Механізм утворення токсичних складових ВГ під час окислення та згоряння палива

Усі токсичні компоненти, які утворюються в суднових дизелях, можна розподілити на дві групи. До першої групи належать продукти неповного згоряння палива (речовини, що містять вуглець) – це монооксид вуглецю CO, вуглеводні  $C_nH_m$ , альдегіди R-CH-O, сажа (твердий вуглець) C. Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива і повітря – це оксиди азоту  $NO_x$  і сірки  $SO_x$  [9-13].

Оксиди азоту  $NO_x$  є одними з найбільш токсичних компонентів ВГ [14]. За нормальних атмосферних умов азот являє собою інертний газ. За умовами високого тиску і особливо високих температур азот активно вступає в реакцію з киснем, перетворюючись на оксиди азоту [15, 16].

Утворення шкідливих домішок у ВГ суднових дизелів морського та внутрішнього водного транспорту має деякі особливості. Малообертові дизелі (МОД) працюють з сумарним коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha_\Sigma = \alpha \cdot \varphi_a$  (де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря,  $\varphi_a$  – коефіцієнт продувки) більше трьох. Більше половини повітря споживається в процесі згоряння, а інша частина йде на продувку циліндрів. Тому ВГ МОД містять підвищений відсоток (до 13...16 %) активного  $O_2$ . Азот N, який в атмосфері займає 80 % і складає при високих  $\alpha$  основну частину ВГ, вступає в реакцію з киснем під час робочого процесу, утворюючи токсичні оксиди азоту, які є найшкідливішими складовими ВГ: це NO,  $NO_2$ ,  $N_2O$ . Кількість кожного з

окислів визначається локальними умовами: величиною температури і концентрацією кисню [17].

У середньооберткових дизелях (СОД) це відбувається менш інтенсивно через швидкий перебіг процесу згоряння (за рахунок підвищеної частоти обертання вала) та менших (за рахунок більшого часу продування та випуску) коефіцієнту продувки  $\phi_a$  та сумарного коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha_z$ . Склад ВГ для МОД та СОД надано у таблиці 1.1 [20].

Таблиця 1.1. Шкідливі включення у випускних газах суднових двигунів

Найменування включень	Кількість включень, кг/т палива	
	МОД	СОД
Оксиди азоту	84...86	59...61
Оксиди сірки	18...21	12...14
Окисел вуглецю	9...10	8...9
Вуглеводні	2,5...3,0	2,7...3,5
Вуглекислота	3150...3200	3250...3300

Дослідження Регістру Ллойду показали, що у ВГ МОД вміст  $\text{NO}_x$  набагато більше, ніж у СОД. Так, викиди  $\text{NO}_x$  при навантаженні двигунів 80 % від максимально тривалої потужності у МОД складають 1300...1800 ppm за вмістом  $\text{O}_2$  15 %, в економічній модифікації СОД не більше 1000 ppm за тому ж вмісті  $\text{O}_2$ , в екологічній модифікації СОД вони складають 500...700 ppm. Тому можна вважати, що СОД знаходяться ближче до нормативних вимог, ніж МОД [21]. Проте за іншими шкідливими складовими ВГ у СОД і МОД мало відмінностей (див. таблицю. 1.1).

На даний час існують суворі норми за окремими компонентами, що містяться у ВГ ДВЗ такі, як: оксид вуглецю  $\text{CO}$ , вуглеводні  $\text{C}_n\text{H}_m$ , оксиди сірки  $\text{SO}_x$  і оксиди азоту  $\text{NO}_x$  [22, 23]. ІМО введені не тільки норми на вміст у випускних газах  $\text{SO}_x$  і  $\text{NO}_x$ , але й визначені спеціальні морські акваторії (зони контролю  $\text{SO}_x$  і  $\text{NO}_x$ ), де вимоги до цих параметрів ще більш регламентовані [24].

## 1.2. Вимоги Міжнародних та національних організацій щодо забезпечення рівня шкідливих домішок у випускних газах суден морського та внутрішнього водного транспорту

Проведені Комісією із захисту морського середовища МЕРС (The Marine Environment Protection Committee), що входить у Міжнародну морську організацію (The International Maritime Organization – ІМО), випробування різних типів суден показали, що в середньому величини викидів судових дизелів у кг на 1 тонну палива складають:  $\text{NO}_x$  – 59 кг/т;  $\text{CO}$  – 8 кг/т;  $\text{CH}$  – 2,7 кг/т;  $\text{CO}_2$  – 3250 кг/т і  $\text{SO}_2$  – 2,4 кг/т. Частка забруднення повітряного середовища транспортними суднами складає 5...10 % і поступово збільшується. Річний викид судового дизеля потужністю біля 20 тис. кВт рівний: за  $\text{NO}_x$  – 1500 тонн;  $\text{SO}_x$  – 600 тонн;  $\text{CO}$  – 100 тонн і за твердими частками – 50 тонн [25, 26].

Екологічні характеристики дизельних двигунів визначаються головним чином вмістом у продуктах згоряння оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , 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  $\text{NO}_x$ », з січня 2016 року всі нові судна повинні будуть відповідати стандартам рівня Tier-III, які передбачають зниження викидів на 80 % (рис. 1.2) порівняно зі стандартами рівня I, для експлуатації в зонах, позначених як зони контролю викидів  $\text{NO}_x$  [27, 28].

У зв'язку з цим ціла низка міжнародних організацій (зокрема ІМО) вводить суворі вимоги, виконання яких дозволяє забезпечити екологічні параметри роботи судових дизелів [29].

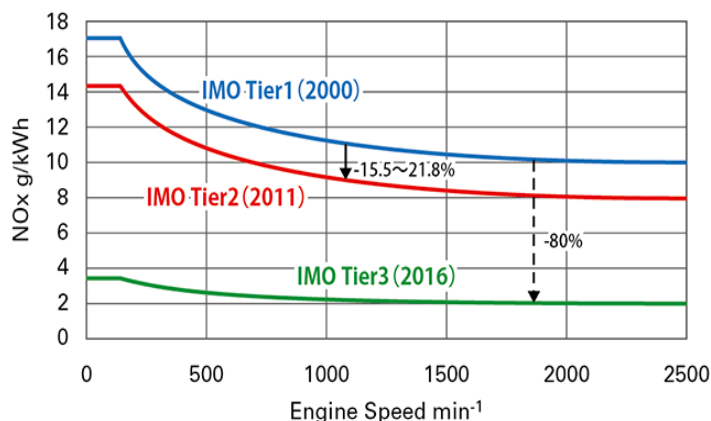


Рис. 1.2. Вимоги ІМО до кількості  $\text{NO}_x$  у випускних газах суднових дизелів

Україна є повноправним членом ІМО і ратифікувала всі її основні конвенції. У зв'язку з цим експлуатація суден річкового та морського транспорту здійснюється відповідно до резолюцій, розроблених Комітетом із захисту морського середовища Міжнародної морської організації (Marine Environment Committee for the Protection of the of the International Maritime Organization – МЕРС ІМО): «Запобігання забрудненню повітря з суден і контроль якості палива» ("Prevention of Air Pollution from Ships and Quality Control of Fuel") і «Переглянутий Додаток VI до Конвенції МАРПОЛ» та згідно із Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» [30].

Основним документом, який регламентує шкідливі викиди в атмосферу від морських транспортних суден, є Додаток VI до Міжнародної конвенції по запобіганню забрудненню з суден (МАРПОЛ). Цим документом викиди оксидів сірки  $\text{SO}_x$  запропоновано унормувати відповідно до вмісту сірки в паливі, а викиди оксидів азоту  $\text{NO}_x$  – виходячи з типу суднового дизеля [31]. Додаток VI МАРПОЛ (Правила запобігання забрудненню повітряного середовища з суден) встановлює рівневий підхід до скорочення цих викидів:

- рівень Tier I являє собою межу вмісту оксидів азоту  $\text{NO}_x$  в викидах дизелів суден, побудованих після 1 січня 2000 року, але до 2011 року;
- рівень Tier II – стандарт за вмістом  $\text{NO}_x$  для двигунів, встановлених на судах, побудованих 1 січня 2011 року, або після цієї дати;

• рівень Tier III – стандарт за вмістом  $\text{NO}_x$  у викидах двигунів, встановлених на суднах, побудованих 1 січня 2016 року або після цієї дати.

На даний час на сучасних річкових та морських транспортних суднах використовуються дизелі, відповідні рівням Tier II і Tier III. При цьому викиди  $\text{NO}_x$  двигунів рівня Tier II в залежності від номінальної частоти обертання колінчастого вала дизеля  $n$  в об/хв, повинні складати:

- $14,4 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  – при  $n < 130$  об/хв;
- $44n^{-0,23} \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  – при  $130 < n < 2000$  об/хв;
- $7,7 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  – при  $n \geq 2000$  об/хв.

Двигуни рівня Tier III повинні забезпечувати наступні вимоги щодо вмісту  $\text{NO}_x$  у випускних газах:

- $3,4 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  – при  $n < 130$  об/хв;
- $9n^{-0,2} \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  – при  $130 < n < 2000$  об/хв;
- $2,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  – при  $n \geq 2000$  об/хв.

Слід зазначити, що виконання вимог рівня Tier II можливе за рахунок зміни конструкції двигуна. Водночас досягнення норм рівня Tier III неможливе без використання спеціальних технологій: каталітичного відновлення [32]; рециркуляція випускних газів (Exhaust Gas Recirculation – EGR) [33]; перепуск випускних газів (Exhaust Gas Wastegate – EWG) [34]; перехід на зріджений природний газ [35].

### 1.3. Аналіз основних шляхів поліпшення екологічних показників роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту

Під час використання вуглеводневих палив нафтового походження, які спалюють у циліндрі дизеля з надлишком кисню, приблизно 80...95 % загальної маси токсичних домішок ВГ припадає на п'ять основних токсичних компонентів:  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , альдегідів і незгорілих вуглеводнів.

До числа методів, спрямованих на нейтралізацію шкідливих компонентів у ВГ суднових дизелів, належать такі організаційні заходи:

- обмеження кількості маневрів ГД при відходах і підходах суден річкового та морського транспорту до портів;
- зведення до мінімуму роботи допоміжних двигунів на стоянках;
- переведення суден на малосірчисте паливо;
- використання альтернативних видів палива (додавання водню в камеру згоряння при здійсненні робочого циклу; використання спирту, метанолу, стисненого природного газу, зрідженого нафтового газу) [36].

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

- з метою зниження  $\text{NO}_x$  – зниження загальних і локальних температур у камері згоряння, зниження локального і місцевого вмісту кисню, зниження вмісту азоту в паливі, підвищення швидкості згоряння;
- з метою зниження  $\text{CO}$  – оптимізація закону виділення теплоти під час згоряння, використання антидимних присадок, виключення місцевих перезбагачених зон;
- з метою зниження альдегідів – турбулізація заряду, руйнування зон гасіння [37].

Під поняттям «поліпшення екологічних показників роботи дизеля» хоча розглядається зниження всього традиційного набору шкідливих речовин, що утворюються під час спалювання рідких палив – оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , оксидів вуглецю  $\text{CO}$ , оксидів сірки  $\text{SO}_x$ , твердих часток, вуглеводних  $\text{C}_n\text{H}_m$ , особлива увага приділяється оксидам азоту  $\text{NO}_x$ , які мають односпрямовану дію з оксидами сірки  $\text{SO}_x$  і становлять до 80...90 % токсичності від загальної кількості ВГ.

Нейтралізація шкідливих компонентів у ВГ ДВЗ поділяється на дві групи методів:

1-ша група – методи внутрішньої нейтралізації (первісні методи), які характеризуються: забезпеченням малотоксичних робочих процесів, подачею води в циліндр, рециркуляцією ВГ, регулюванням подачі палива;

2-га група – методи зовнішньої нейтралізації (вторинні методи), а саме використання: фільтрів, рідинних та каталітичних нейтралізаторів [24].

Під час проектування СЕУ найбільш перспективними вважаються методи, в основі яких лежить нейтралізація оксидів азоту в рідинних, термічних і каталітичних нейтралізаторах. Дослідженням різних аспектів цієї проблеми займалася велика кількість організацій, як вітчизняних, так і закордонних, включаючи науково-дослідні інститути та лабораторії дизелебудівних фірм.

Слід зазначити, що в цей час не існує комплексної оцінки (або критерію) ефективності методів (засобів) поліпшення екологічних показників суднових дизелів. 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 пропонованих методів і засобів поліпшення екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту.

#### 1.4. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту у випускних газах дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту

Основним технологічним завданням методів, що спрямовані на зменшення емісії оксидів азоту у ВГ, є зменшення максимальної температури в циліндрі дизеля під час згоряння палива.

Найбільшого розповсюдження серед первинних методів зниження емісії  $\text{NO}_x$  отримали наступні:

- 1) зволоження повітря наддуву;
- 2) застосування водопаливних емульсій (ВПЕ);
- 3) використання прямого впорскування води в циліндр дизеля;
- 4) модернізація конструкції паливної апаратури;
- 5) керування ВГ через їх рециркуляцію (системи EGR), або перепуск (системи EWG) [38].

Перший варіант передбачає додаткове впорскування в об'єм повітря, що надходить в циліндр дизеля, прісної води. Впорскування проводиться спеціальною форсункою, встановленою або за охолоджувачем повітря наддуву, або безпосередньо в ресивері продувочного повітря. Надходження в циліндр зволоженого повітря вимагає додаткових витрат теплової енергії на його випаровування, що сприяє зниженню температури в циліндрі дизеля в процесі згоряння палива [39].

Другий варіант забезпечується створенням високо-однорідної суміші води і палива і подачею утвореної емульсії до циліндра дизеля. При цьому також відбувається зниження температури в процесі згоряння палива, а центральна частина паливного факела додатково збагачується киснем, що утворюється під час випаровування води. Однак, з огляду на те, що кількість палива, яке подається в циліндр, повинна залишатися постійною, додаткова подача води (оптимальна кількість якої знаходиться в межах 15...20 %) призводить до збільшення тривалості впорскування порції ВПЕ порівняно з впорскуванням «чистого» палива. Це зумовлює збільшення кута випередження подачі палива, що може спричинити впорскування ВПЕ в повітряне середовище, температура якого ще не забезпечує надійне самозаймання.

Третій варіант передбачає пряме впорскування води в циліндр дизеля і здійснюється або загальним (коли паливо і вода подаються через загальну форсунку), або роздільним впорскуванням (коли вода і паливо впорскується в циліндр через індивідуальні форсунки). Однак, даний варіант також сприяє

нестійкому згорянню палива. Кут випередження подачі палива знижує температуру в кінці стиснення. Знаходження в циліндрі дизеля підвищеної порції розпорошеної води може призвести до зниження температури в циліндрі дизеля до критичного рівня і неможливості подальшого самозаймання палива.

Четвертий варіант забезпечення необхідного рівня емісії  $\text{NO}_x$  первинними методами пов'язаний із вдосконаленням конструкції паливної апаратури (зміною форми розпилювача форсунки, збільшенням тиску впорскування палива і т.д.) і пов'язаний з модернізацією всієї паливної системи високого тиску.

П'ятий варіант – використання систем EGR та EWG активно розробляється в даний час і має позитивний досвід застосування на морських судах.

Серед вторинних методів зниження емісії  $\text{NO}_x$  найбільшого поширення набуло виборче (селективне) каталітичне відновлення – Selective catalytic reduction (SCR).

## 1.5. Висновки за розділом 1

Як результат досліджень, пов'язаних з оглядом та аналізом літературних джерел, у яких вивчається та висвітлюється завдання забезпечення екологічності морських суден, визначимо наступне.

1. Генератором механічної енергії яка використовується для забезпечення руху морських суден, або електропостачання судових споживачів є дизелі, здійснення замкненого робочого циклу яких неможливе без видалення у довкілля випускних газів, до складу яких входить численні шкідливі речовини. Перше місце (з точки зору негативного впливу на

довкілля) серед шкідливих газових викидів з річкових та морських суден практично на всіх режимах роботи дизелів, незалежно від їх типу, класу, розмірів і конструктивних особливостей, займають оксиди азоту.

2. Серед механізмів утворення оксидів азоту найбільш проблемним залишається високотемпературний, нівелювання його впливу на емісію  $\text{NO}_x$  пов'язано з необхідністю зниження температурних піків, що утворюються під час згоряння рідкого палива.

3. Здійснення інформаційного пошуку за напрямом дослідження, застосовуючи філософський підхід сходження від загального до окремого через часткове дозволило встановити, що різноманітність систем, які сприяють зниженню емісії оксидів азоту, не дозволяє скласти та використовувати єдиний загальний алгоритм визначення оптимальних режимів їх експлуатації. Тому кожна з цих систем повинна вивчатися системно, з розробкою рекомендацій, які враховують її власні характеристики та особливості.

4. До однієї зі найбільш ефективних технологій, що забезпечують екологічність роботи морських суден, належить керування випускними газами, яке здійснюється шляхом їх рециркуляції або перепуску. Реалізація цього методу впроваджується на окремих морських суднах, але відсутність системного підходу до визначення його оптимальних режимів експлуатації та недосконалість критеріїв оцінки його ефективності потребує проведення досліджень, що спрямовані на розробку алгоритмів та способів підвищення екологічної ефективності морських суден шляхом керування випускними газами теплових двигунів, яким є їх рециркуляція та перепуск.

## 2. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ

### 2.1. Вибір теми наукового дослідження

Наукові дослідження, що виконуються в Національному університеті «Одеська морська академія», як фундамент, який забезпечує їх доцільність, цілісність, стійкість та ієрархічну підпорядкованість, використовують методологію та технологію наукових досліджень, що вдосконалена відомим українським вченим – професором В.А. Голіковим, який поширив ідею розробки структурної схеми магістерського дослідження, яка

- базується на запиті практики, спрямованому на розв’язання науково-прикладної проблеми, що пов’язана з вдосконаленням експлуатації річкового та морського транспорту;

- визначає мету та завдання дослідження;

- формулює головне завдання магістерського дослідження та допоміжні завдання, які допомагають його розв’язанню;

- виявляє наукове значення та практичну цінність закінченого дослідження з подальшим формулюванням наукового положення [40].

При цьому головним методологічним принципом проведення наукового дослідження є стратегія, що спрямована на запобігання однобічності під час вивчення властивостей об’єкта та передбачає обов’язкове врахування всіх його суттєвих зв’язків [41].

Одним із методів, що сприяють розв’язання прикладних науково-дослідницьких завдань, є метод експертних оцінок. Основне призначення методів експертних оцінок – це визначення індивідуальних точок зору експертів і формування на їхній основі єдиного рішення. Методи експертних оцінок – це організаційні, логічні і математико-статистичні процедури, які

спрямовані на отримання від фахівців інформації, її аналіз та узагальнення для підготовки і прийняття ефективних рішень.

Низький ступінь можливої формалізації деяких об'єктів дослідження, недостатні знання законів їх розвитку і тощо визначають методологічні основи використання експертних оцінок з метою забезпечення обґрунтованості прийняття рішень з управління ними. Процес експертизи включає пред'явлення експертам прогностичних гіпотез, їх персональну оцінку кожним з експертів і визначення міри правдоподібності гіпотези на основі узагальнення оцінок.

Класифікація методів експертних оцінок проводиться на основі двох класифікаційних ознак: методи опитування експертів і методи оцінювання результатів (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Класифікація методів експертних оцінок

З огляду на наведені підходи до розв'язання наукових та науково-прикладних завдань, вибір напрямку наукового дослідження був заснований на проведеній експертній оцінці можливих варіантів виконання завдання забезпечення екологічності роботи суден морського транспорту шляхом мінімізації емісії оксидів азоту у випускних газах двигунів внутрішнього згоряння за наступними критеріями:

- 1) актуальність;

- 2) наукова новизна;
- 3) економічна ефективність;
- 4) можливість використання в умовах морського судна;
- 5) відповідність основним напрямкам наукової спеціальності і наукової школи.

Його результати наведені в таблиці 2.1, при цьому випадку позитивної оцінки відповідає позначка «+», випадку негативної позначка «-».

Таблиця 2.1

Порівняння можливих варіантів розв'язання завдання дослідження

Варіант розв'язання	Критерії					сума балів
	актуальність	наукова новизна	економічна ефективність	можливість використання в умовах морського судна	відповідність основним напрямкам наукової спеціальності і наукової школи	
1. Удосконалення системи подачі палива	-	-	+	+	-	2
2. Впровадження альтернативних видів рідких або газоподібних палив	+	+	-	-	+	3
3. Удосконалення перебігу робочого циклу	+	-	+	+	-	3
4. Використання додаткового очищення випускних газів	+	+	-	+	+	4
5. Використання перепуску випускних газів	+	+	+	+	+	5

Як об'єкт дослідження визначено процес підвищення екологічної безпеки суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Як предмет дослідження прийнято процес перепуску випускних газів суднових дизелів.

## 2.2. Обґрунтування мети і завдань дослідження

Наукові дослідження, результати яких наведені в магістерській роботі, базуються на запиті практики, яким є розв'язання завдання мінімізації емісії оксидів азоту з випускними газами дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту з одночасним забезпеченням їх ефективних та економічних показників та запобіганням теплової напруженості під час їх експлуатації, а також необхідність забезпечення екологічної ефективності морського судна.

Метою дослідження підвищення екологічної ефективності суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза про те, що підвищення екологічної ефективності суден морського та внутрішнього водного транспорту досягається шляхом перепуску випускних газів двигунів внутрішнього згорання.

Головне завдання наукового дослідження полягає у розробці та визначенні режимів експлуатації систем перепуску випускних газів двигунів внутрішнього згорання, що гарантують забезпечення екологічних показників морських суден відповідно до вимог міжнародних стандартів.

### 2.3. Системний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження

Сучасний етап розвитку теорії та практики наукових досліджень характеризується підвищенням рівнем системності. Науковці, інженери, фахівці та представники різноманітних професій оперують поняттям системний / комплексний підхід, що використовується під час розв'язання наукових проблем та вирішення наукових питань. Корисність та важливість системного/комплексного підходу вийшла за рамки спеціальних наукових істин та набула рангу звичайних та загальноприйнятих. Така ситуація стала відображенням об'єктивних процесів розвитку уявлень про матеріальний світ, сформувалася під впливом об'єктивних чинників [42].

Систему, що відповідає темі магістерського дослідження – «Забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом перепуску випускних газів», можливо відобразити у вигляді рис. 2.2. При цьому компоненти цієї системи «морське судно» і «двигун внутрішнього згоряння» мають двосторонні зв'язки. Технічний стан морського судна, режими та райони його експлуатації створюють зовнішні обурення на роботу двигуна внутрішнього згоряння. Механічна енергія, що генерується двигуном внутрішнього згоряння, забезпечує рух і функціонування морського судна.

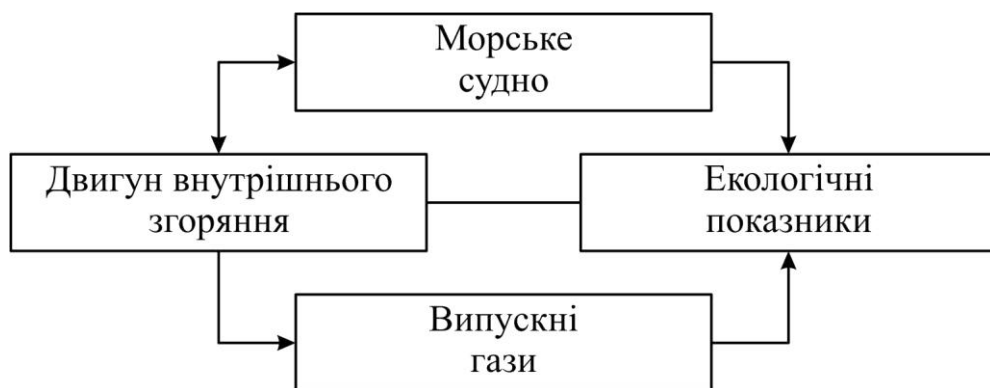


Рис. 2.2. Принципова схема системи забезпечення екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту

Одним із вихідних параметрів (як для двигуна внутрішнього згорання, так і для морського судна) є екологічні показники (під якими може розглядатися широкий спектр величин, але в цілях і завданнях магістерського дослідження – емісія оксидів азоту). Вплив на екологічні показники з боку двигуна внутрішнього згорання виявляється шляхом керування випускними газами.

З урахуванням загальної методології наукових досліджень і системного підходу до проблеми безпечної експлуатації морського судна, процес керування випускними газами можна уявити як складну багатокomпонентну систему. Ця система характеризується динамічно мінливими контрольованими і регульованими параметрами і (в залежності від конструкційного виконання) може складатися з додаткових підсистем. Дослідження процесів, що відбуваються в цих підсистемах, і вибір оптимальних режимів керування цими підсистемами призводить до розв'язання завдання щодо забезпечення екологічності експлуатації морського судна з одночасним забезпеченням його енергетичної та економічної ефективності

З урахуванням принципів, послідовності і законів системного аналізу замкнутий цикл магістерського дослідження може бути представлений у вигляді технологічної карти, наведеної на рис. 2.3.

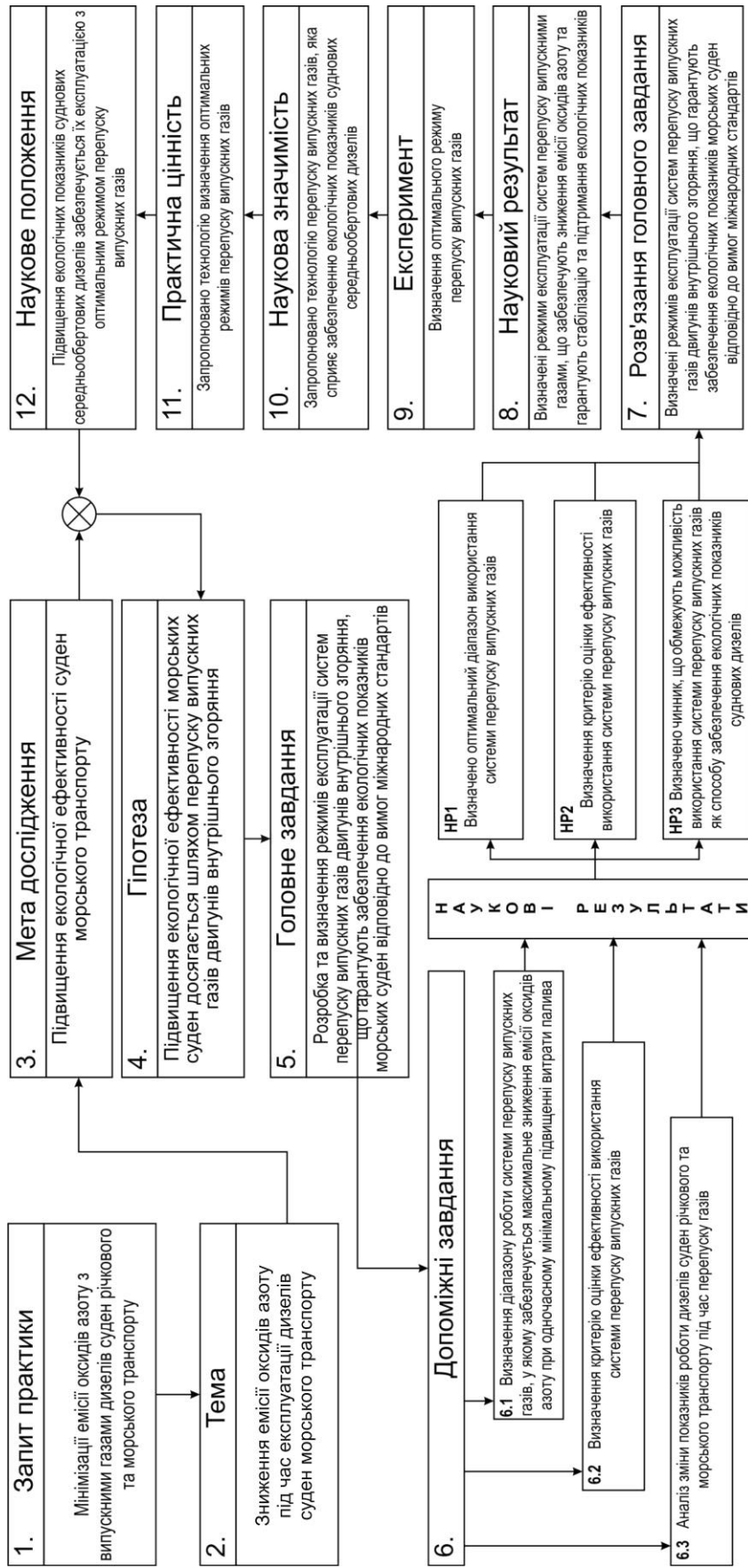


Рис. 2.3. Технологічна карта наукового дослідження

## 2.4. Висновки за розділом 2

1. Як результат вибору теми дослідження, застосовуючи метод експертного оцінювання за факторами: актуальність, наукова новизна, економічна ефективність, можливість використання в умовах морського судна, відповідність основним напрямкам наукової спеціальності і наукової школи, сформульована тема роботи – «Підвищення екологічності роботи судових дизелів шляхом перепуску випускних газів», що спрямована на забезпечення екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Об'єктом дослідження обрано процес підвищення екологічної безпеки суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Предметом дослідження є процес перепуску випускних газів судових дизелів.

2. Метою дослідження є підвищення екологічної ефективності суден морського та внутрішнього водного транспорту шляхом зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах двигунів внутрішнього згоряння.

3. Головне завдання магістерського дослідження полягає у розробці та визначення режимів експлуатації систем керування випускними газами, що гарантують забезпечення екологічних показників морських суден відповідно до вимог міжнародних стандартів.

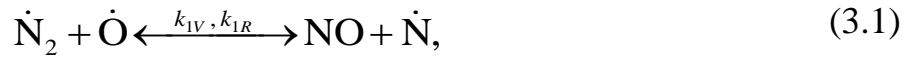
4. За допомогою системного підходу розроблена технологічна карта наукова дослідження, що визначає його основні етапи та результати.

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В ЦИЛІНДРІ ДИЗЕЛЯ ПІД ЧАС ЗГОРЯННЯ РІДКОГО ПАЛИВА

Ефективні та екологічні показники робочого циклу поршневого двигуна обумовлені перш за все характером складних нестационарних гідродинамічних, газодинамічних, теплофізичних і хімічних процесів, що відбуваються в циліндрі за короткі проміжки часу. Математичне моделювання турбулентних процесів перенесення і горіння в сучасній теорії поршневих двигунів засноване на застосуванні системи з тривимірних рівнянь кількості руху (Нав'є-Стокса), енергії (Фур'є-Кірхгофа), дифузії (Фіка) і збереження маси [43]. В результаті чисельного розв'язання такої системи рівнянь визначають локальні значення нестационарних параметрів робочого тіла в об'ємі, а також локальні теплові навантаження (термічні граничні умови) на теплосприймаючих поверхнях камери згорання.

#### 3.1. Моделювання процесу утворення оксидів азоту під час згорання палива

Відповідно до результатів літературного огляду, виконаного в розділі 1, у продуктах згорання ДВЗ кількість NO становить понад 90 % від сумарної кількості всього комплексу оксидів азоту  $NO_x$ , у зв'язку з цим у розрахунках за визначенням екологічних параметрів поршневих двигунів в якості переважаючого приймається механізм утворення. При цьому розширений механізм утворення NO Зельдовича може бути представлений як



де  $k_i$  – константа швидкості  $i$ -ї реакції;

$V$  і  $R$  – індекси, що вказують на пряму і зворотню реакції відповідно [44].

У даний час розширений механізм утворення NO Зельдовича є основним під час опису наведених процесів. Одночасно з цим, при дослідженнях розглядається ряд інших схем утворення NO, які засновані на детальному описі кінетичних механізмів, при цьому кількість проміжних реакцій досягає декількох десятків і сотень. Огляд цих схем, що застосовуються при моделюванні процесів утворення  $\text{NO}_x$  у поршневих двигунах, може бути виконаний на підставі даних і наведений у вигляді таблиці 3.1 [45].

Таблиця 3.1

Схеми утворення NO в поршневих двигунах внутрішнього згорання

№ реакції	Схема № 1. На основі тепломасообміну і хімічної кінетики реакції догорання	№ реакції	Схема № 2. На основі хімічної термодинаміки і реакції розпаду молекулярного азоту	№ реакції	Схема № 3. На основі хімічної термодинаміки і кінетики хімічних реакцій
1	$\text{OH} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	1	$\text{N}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{NO} + \text{N}$	1	$\text{O} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{N} + \text{NO}$
2	$\text{OH} + \text{OH} \leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	2	$\text{O}_2 + \text{N} \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$	2	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{N} + \text{NO}_2$
3	$\text{OH} + \text{H} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	3	$\text{OH} + \text{N} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$	3	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$
4	$\text{H} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{HO}_2$	4	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{NO}$	4	$2\text{NO} \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$
5	$\text{OH} + \text{OH} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	5	$\text{NO} + \text{M} \leftrightarrow \text{N} + \text{O} + \text{M}$	5	$\text{NO} + \text{O} \leftrightarrow \text{N} + \text{O}_2$
6	$\text{CO} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$	6	$\text{N}_2\text{O} + \text{M} \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{O} + \text{M}$	6	$\text{O} + \text{N} + \text{M} \leftrightarrow \text{NO} + \text{M}$
7	$\text{N} + \text{NO} \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{O}$	7	$\text{NO} + \text{NO} \leftrightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{O}$	7	$\text{NO}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{O} + \text{NO} + \text{M}$
8	$\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$	8	$\text{NO} + \text{O} + \text{M} \leftrightarrow \text{NO}_2 + \text{M}$	8	$\text{NO}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{O}_2 + \text{N} + \text{M}$
9	$\text{N} + \text{OH} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$	9	$\text{NO}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}_2$	9	$\text{NO} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}$
10	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$				
11	$\text{H} + \text{CO} \leftrightarrow \text{HCO}$				
12	$\text{OH} + \text{HCO} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$				
13	$\text{H} + \text{HCO} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$				

У ній як приклад показані три такі схеми приблизно з однаковим числом проміжних реакцій. Через М позначена нейтральна молекула, яка не бере участі в даній реакції і сприймає енергію збудника активних частинок. Схеми, показані в таблиці 3.1, свідчать про те, що реакції класичного або розширеного механізмів Зельдовича (виділені жирним шрифтом) наявні у всіх випадках.

Струменево-кінетична модель горіння (схема № 1) розв'язує пов'язані завдання тепломасообміну і хімічної кінетики реакції догорання в зоні продуктів згорання поршневого двигуна з безпосереднім уприскуванням палива. Такий підхід, при якому розраховуються поля температури і дифузії, дозволяє визначити локальні зони в камері згорання, де суміш інтенсивно реагує і де вона виходить слабкореагуючою.

Дві інші схеми утворення NO, наведені в таблиці 3.1, розроблено та запропоновано В. Клайншмідтом (W. Klein Schmidt) і А.І. Лушпою. Незважаючи на однакову кількість реакцій вони значно відрізняються одна від одної. Схема № 2 містить реакції розширеного механізму Зельдовича, а схема № 3 – класичного механізму Зельдовича (виділені жирним шрифтом). Константи швидкостей реакції визначаються згідно із законом Арреніуса. Решта реакцій (2-4 і 7-9) грають другорядну роль [46].

Відзначимо, що всі розглянуті схеми утворення оксидів азоту є модельними, тобто відображають реальний кінетичний процес тільки приблизно. Ці модельні схеми зазвичай використовуються для розрахунку утворення NO в поршневих двигунах. Більш докладний опис хімічної кінетики утворення NO під час горіння суміші традиційних палив з повітрям на сучасному рівні наших знань неможливий. Складність полягає в тому, що нафтові сорти палива є сполуками вуглецю і водню  $C_mH_n$ , у молекулах яких міститься кілька атомів вуглецю. А для вуглеводнів з декількома атомами вуглецю в молекулі число можливих проміжних реакцій і проміжних

продуктів згоряння настільки велике, що повний кінетичний опис процесу стає неможливим.

Для розширеного механізму Зельдовича з трьох реакцій (3.1)-(3.3) на основі закону діючих мас випливає, що швидкість утворення оксиду азоту можна знайти як

$$\frac{d[\text{NO}]}{d\tau} = k_{1V}[\text{N}_2][\text{O}] - k_{1R}[\text{NO}][\text{N}] + k_{2V}[\text{O}_2][\text{N}] - k_{2R}[\text{NO}][\text{O}] + k_{3V}[\text{N}][\text{OH}] - k_{3R}[\text{NO}][\text{H}] \quad (3.4)$$

Зміна правої частини рівняння (3.4), тобто зміна числа проміжних реакцій, може впливати тільки на час обрахунку, що для рівнянь такого типу в разі застосування сучасних комп'ютерів не принципово. Тут виникає інша проблема: зі збільшенням числа проміжних реакцій зростає число констант швидкостей прямих і зворотних реакцій, які зазвичай задаються. При виборі цих констант проблемою є їх неоднозначність: їх значення залежать від умов, покладених в основу їх визначення. Експериментальну перевірку достовірності обраних макрокінетичних констант слід проводити шляхом безпосереднього вимірювання NO в продуктах згоряння двигуна [47, 48].

### 3.2. Моделювання переносу теплової енергії в циліндрі дизеля

Утворення оксидів азоту  $\text{NO}_x$  у циліндрі дизеля відбувається в результаті високотемпературних реакцій процесу згоряння палива. Критичною вважається температура 1800 К (1530° С), досягнення якої призводить до виникнення ланцюгової реакції утворення  $\text{NO}_x$ .

Максимальна температура робочого циклу (температура в кінці «видимого» згоряння)  $T_z$  може бути визначена в результаті розв'язання

термодинамічного рівняння згоряння методом послідовних наближень з виразів для  $T_z$  і середньої питомої ізобарної теплоємності продуктів згоряння  $c_{pz}$ :

$$\begin{cases} T_z = \frac{(m_T - 1)\xi_z Q_H + (c_{pc} + R_c(\lambda - 1))T_c}{m_T c_{pz}} \\ c_{pz} = 0,9727 + \frac{0,1274}{\alpha} + \left(0,97 - \frac{0,1298}{\alpha}\right) \cdot 10^{-4} \cdot T_z. \end{cases}$$

Значення, що входять до системи:

$m_T$  – коефіцієнт збільшення маси заряду;

$\xi_z=0,9\dots0,95$  – коефіцієнт використання тепла в т. з. діаграми;

$Q_H$  – нижча теплотворна здатність палива, кДж/(кг·К);

$c_{pc}$ ,  $R_c$ ,  $T_c$  – середня питома ізобарна теплоємність, кДж/(кг·К), універсальна газова постійна, кДж/(кг·К), температура, К, суміші повітря і залишкових газів в кінці процесу стиснення (у точці  $c$  індикаторної діаграми);

$\lambda$  – ступінь підвищення тиску під час згоряння;

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря,

приймаються або розраховується виходячи з наступного:

$$m_T = 1 + \frac{1}{(1 + \gamma_r)\alpha G_0}, \quad (\text{де } G_0=14,28 \text{ кг повітря/кг палива} - \text{теоретичне}$$

кількість повітря для згоряння 1 кг палива);

$Q_H=38000\dots44000$  кДж/(кг·К) – в залежності від характеристик палива;

$$c_{pc} = 0,9582 + 0,8834 \cdot 10^{-4} \cdot T_c, \text{ кДж/(кг·К);}$$

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c}, \quad (\text{де тиски в циліндрі в кінці згоряння } p_z, \text{ МПа, і в кінці стиснення}$$

$p_c$ , МПа, визначаються шляхом індичіювання дизеля).

Температура в кінці процесу стиснення  $T_c$  (у точці  $c$  індикаторної діаграми) визначається комплексом виразів:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1} \\ T_a = \frac{T_s + \Delta T_s + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \\ \varepsilon = \frac{V_a}{V_c} \\ n_1 = 1 + \frac{1}{2,339 + 3,078 \cdot 10^{-4} T_a (\varepsilon^{n_1 - 1} + 1)}, \end{array} \right.$$

в який входять значення:

$T_a$  – температура суміші повітря і залишкових газів на початку процесу стиснення (у точці  $a$  індикаторної діаграми), К;

$T_s$  – температура в продувному ресивері, К (відповідно до Правил технічної експлуатації суднових двигунів внутрішнього згорання підтримується в межах  $T_s=310...313$  К);

$\Delta T_s$  – ступінь підігріву повітря об стінки циліндра ( $\Delta T_s=5...15$  К в залежності від конструкційних особливостей дизеля);

$T_r$  – температура залишкових газів, К ( $T_r=600...750$  К залежно від організації процесів продувки і випуску, а також від конструкції дизеля);

$\gamma_r$  – коефіцієнт залишкових газів ( $\gamma_r=0,01...0,08$  залежно від організації процесів продувки і випуску, а також від конструкції дизеля);

$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$  – ступінь стиснення ( $\varepsilon=10...17$  в залежності від конструкції циліндричної втулки дизеля,  $V_a, V_c$  – об'єм циліндру на початку і наприкінці стиснення, м<sup>3</sup>);

$n_1$  – показник політропи стиснення в циліндрі (розраховується методом послідовних наближень,  $n_1=1,34...1,39$ ) [49].

### 3.3. Висновки за розділом 3

Як висновки досліджень, що наведені у розділі 3, визначимо наступне.

1. Під час згоряння палива в циліндрі дизеля відбуваються нестационарні процеси переносу теплоти, енергії і маси, які призводять до різних швидкісних і масових характеристик утворення оксидів азоту. У зв'язку з цим математичне моделювання процесу утворення оксидів азоту в дизелях суден морського та внутрішнього водного транспорту передбачає використання рівнянь збереження кількості руху, збереження потоку енергії, збереження маси та дифузії. Одночасно з цим, визначення емісії оксидів азоту може бути здійснено шляхом безпосереднього вимірювання їх концентрації в випускних газах шляхом використання сучасних високоточних газоаналізаторів.

2. Відсутність системного підходу до питань визначення оптимальних режимів експлуатації систем керування випускними газами суднових дизелів спонукає виконувати додаткові дослідження.

## 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕПУСКУ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ ЯК ЗАСОБУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ

### 4.1. Аналіз схем перепуску випускних газів дизелів морського та внутрішнього водного транспорту

Перебіг робочого процесу, який здійснюється у ДВЗ суден морського та внутрішнього водного транспорту, знаходиться у тісному взаємозв'язку з перебігом процесу повітропостачання та газовипускни [49, 50].

Для узгодження перебігу робочого процесу в камері згоряння двигуна і кількості повітря, що подається компресором, застосовують такі способи автоматичного регулювання:

- перепуск частини відпрацьованих газів минаючи турбіну [51];
- поворот соплового лопаточного апарата в компресорі або турбіні [52];
- зміна прохідного перетину на вході в турбіну [53].

Найбільшого застосування в практиці отримала система автоматичного регулювання з перепуском газу минаючи турбіни. Вона дозволяє забезпечити двигун необхідною кількістю повітря на всіх режимах роботи і обмежити максимальну частоту обертання вала турбокомпресора.

Використання перепуску газів минаючи газову турбіну ГТН можливе для одно- та двоступеневих систем наддуву (рис. 4.1.). В одноступеневій системі наддуву (рис. 4.1, а) під час перепуску основний потік газів, що потрапляє у випускний колектор 4 після циліндрів 5, спрямовується в напрямку спрямувального апарата газової турбіни ГТН 2, а частина потоку (яка в конструкціях різних виробників знаходиться в межах 0...15 %) переспрямовується безпосередньо до газовипускної труби за допомогою клапана перепуску (клапана EWG) 1. Охолоджувач 3 забезпечує підтримання необхідної температури повітря наддуву у ресивері 6.

Для двоступеневих систем наддуву (рис. 4.1, б) перепуск частини потоку газів, який із циліндрів дизеля рухається у бік ГТН високого 2 та низького 7 тиску, може здійснюватися або до спрямувального апарату газової турбіни ГТН високого тиску 2 (за допомогою клапана перепуску 1), або за ГТН 2 ( за допомогою клапана 9). За допомогою охолоджувача 8 знижується температура повітря після компресора ГТН низького тиску 7. Інші елементи установки забезпечують функції, аналогічні одноступеневій системі наддуву. Під час перепуску потоку газів здійснюється його дроселювання до тиску меншого за тиск газів за ГТН. Це попереджує явище закиду газів та гальмування потоку газів, який виходить з газової турбіни. Незважаючи на великий цикл проведених експериментальних досліджень на двигунах із двоступеневою системою подачі повітря, поки існує багато незрозумілостей з фізикою термогазодинамічного потоку.

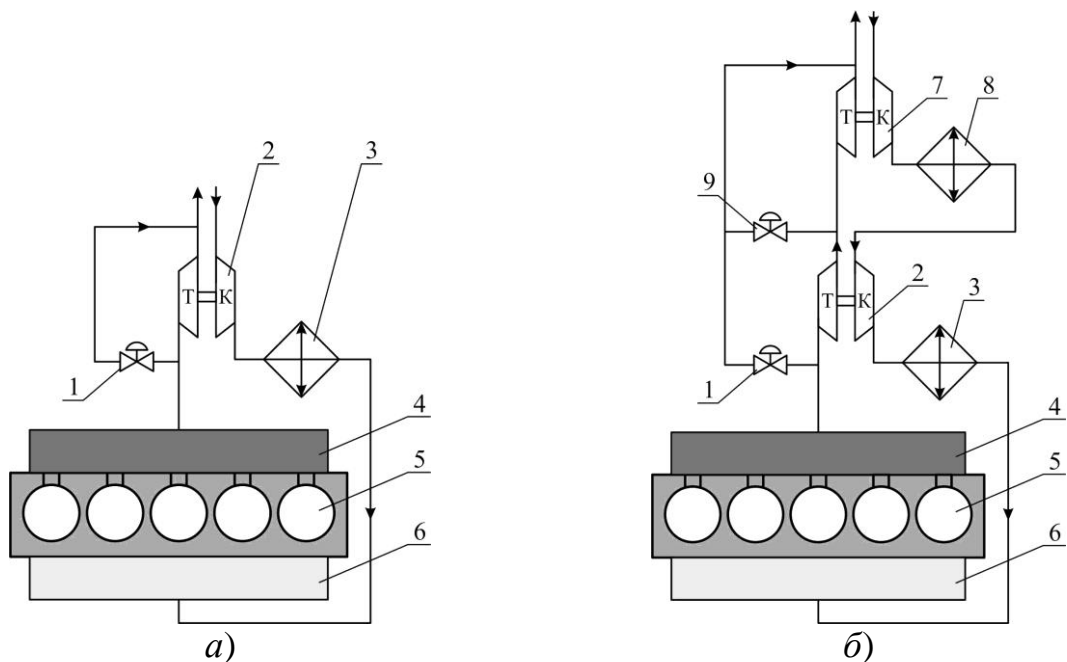


Рис. 4.1. Технологічні схема перепуску газів минаючи газову турбину ГТН:

- 1, 9 – клапан EWG; 2, 7 – ГТН; 3, 8 – охолоджувач повітря наддуву;  
 4 – випускний колектор, 5 – циліндри дизеля; 6 – ресивер повітря наддуву;  
 а – одноступеневий наддув; б – двоступеневий наддув

## 4.2. Експериментальні дослідження впливу перепуску випускних газів на показники роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту

Екологічні показники суднових ДВЗ регламентується вимогами міжнародних конвенцій, а їх підтримка в заданому діапазоні є обов'язковим під час експлуатації СЕУ, як в акваторіях Світового океану, так і в територіальних водах морських країн (у тому числі України). Зниження концентрації  $\text{NO}_x$  у ВГ досягається:

- шляхом впливу на робочий процес, що відбувається в циліндрі дизеля [54];
- зміною конструкції і параметрів роботи паливної апаратури високого тиску [55];
- введенням реагентів у випускні гази під час їх проходження через спеціальні реактори [56];
- за допомогою використання системи керування ВГ, яка забезпечує або рециркуляцію випускних газів (Exhaust Gas Recirculation – EGR) [57], або перепуск випускних газів (Exhaust Gas Wastegate – EWG) [58].

### 4.2.1. Результати досліджень, виконаних на судновому середньообертovому дизелі 6L20 Wartsila

Метою дослідження було визначення оптимального об'єму перепуску ВГ судового СОД 6L20 Wartsila. При цьому з одного боку повинні бути забезпечені найкращі для розглянутого режиму роботи дизеля екологічні показники (концентрація  $\text{NO}_x$  у ВГ), а з іншого – мінімальне збільшення

(порівняно з режимом роботи без перепуску) питомої ефективної витрати палива при одночасному підтриманні заданого діапазону теплової напруженості циліндрів дизеля [59].

Основні характеристики дизеля 6L20 Wartsila:

кількість циліндрів – 6;

діаметр циліндра – 0,2 м;

хід поршня – 0,26 м;

максимальний тиск згоряння – 16,3 МПа;

частота обертання – 1000 об/хв;

номінальна потужність  $N_{\text{еном}}=1200$  кВт;

питома ефективна витрата палива – 0,193 кг/(кВт·год).

Дослідження проводилися на трьох однотипних дизелях 6L20 Wartsila з електронною системою керування фазами подачі палива, повітря і газорозподілу. Дизелі входили до складу суднової електростанції як дизель-генератори, мали однаковий моторесурс роботи і експлуатувалися на рівновеликих навантаженнях. Як система керування випускними газами на даних дизелях встановлена система EWG. Використання цієї системи фірма Wartsila рекомендує насамперед для обмеження тиску наддувнего повітря і запобігання помпажних явищ під час високих навантажень і як додаткову функцію – для зниження викидів  $\text{NO}_x$ . Згідно з проектною документацією система EWG забезпечує перепуск газів у діапазоні 0...10 % від їх загального обсягу. Принципова схема системи EWG суднового дизеля 6L20 Wartsila показана на рис. 4.2.

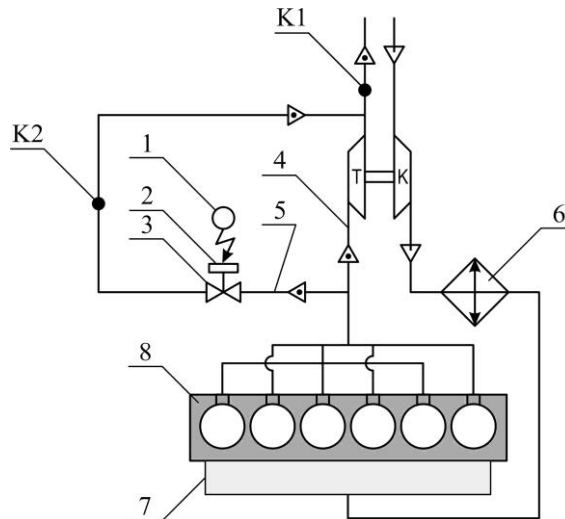


Рис. 4.2. Принципова схема суднового середньообертового дизеля

6L20 Wartsila з системою керування випускними газами EWG:

- 1 – контролер положення перепускного клапана; 2 – пневматичний привід перепускного клапана; 3 – перепускний клапан (клапан wastegate);  
 4, 5 – випускні магістралі основного і перепускного потоку газів;  
 6 – охолоджувач повітря наддуву; 7 – продувний ресивер;  
 8 – циліндри дизеля; K1, K2 – точки контролю витрат газів;  
 Т, К – газова турбіна і повітряний компресор ГТН

Повітря, що нагнітається компресором, охолоджується в охолоджувачі наддувального повітря 6 і надходить у циліндри 8 через продувний ресивер 7. У дизелі (традиційно для СОД фірми Wartsila) реалізується імпульсна система газотурбінного наддуву, при якій ВГ з циліндрів 8 окремими газоходами надходять на лопатки ГТН. Залежно від положення перепускного клапана 3 (переміщення якого здійснюється за допомогою пневматичного приводу 2 і регулюється контролером 1) ВГ надходять або в основну магістраль 4, або в перепускню 5. Витрата ВГ у магістралях 4 і 5 визначалася в точках K1 і K2 за допомогою витратоміра MT100S фірми «Siemens AG» (Німеччина). Витратоміри серії MT100 відносяться до багатоточкових (із кількістю вимірювальних зондів від 2 до 8) масових витратомірів повітря і газів, які працюють за принципом теплового розсіювання. У витратомірах MT100

технологічно розв'язана одна з головних проблем вимірників газових потоків, до якої відноситься наявність квадратичної залежності між витратою і перепадом тиску (це не дозволяє визначати витрату в діапазоні менше 30 % від максимальної через високу похибку вимірювання). Чутливість витратомірів МТ100 становить 0,07...0,2 м<sup>3</sup>/с, робоча температура – до 454° С, що забезпечує їх функціональність у всьому діапазоні експлуатаційних навантажень дизеля. Витратоміри МТ100 відповідають вимогам Системи безперервного моніторингу викидів (Continuous Emission Monitoring System – CEMS) Агентства з охорони навколишнього середовища (Environmental Protection Agency – EPA). Під час експерименту в точці К1 за допомогою газоаналізатора Testo350XL визначалася концентрація NO<sub>x</sub> у ВГ. Питома ефективна витрата палива  $b_e$  визначалась за допомогою суднової системи діагностики Doctor.

Ступінь перепуску газів розраховувалася за виразом:

$$\delta_{\text{EWG}} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де  $G_{\text{п}}$  – кількість випускних газів, які пройшли через перепускний клапан, кг/с (вимірювалася в точці 9 за допомогою витратоміра МТ100S);

$G_{\Sigma}$  – сумарна кількість випускних газів, що надходять у газовипускную магістраль від ГТН при повністю закритому перепускному клапані, кг/с (вимірювалася в точці 1 за допомогою витратоміра МТ100S).

Похибка у вимірюванні витрати газів визначається витратоміром МТ100S, не перевищувала  $\pm 0,5$  %, похибка у вимірі емісії NO<sub>x</sub> у випускних газах газоаналізатором Testo350XL становила  $\pm 3,5$  %, похибка у визначенні питомої ефективної витрати палива не перевищувала  $\pm 2,5$  % [60].

Дизель, на якому виконувалися експериментальні дослідження, забезпечував потужністю постійні групи споживачів. При цьому (залежно від досліджуваних режимів) його потужність становила 660 кВт, 805 кВт,

890 кВт, 1010 кВт, що відповідало  $0,55N_{\text{еном}}$ ,  $0,67N_{\text{еном}}$ ,  $0,74N_{\text{еном}}$ ,  $0,83N_{\text{еном}}$ . Похибка в зміні потужності не перевищувала  $\pm 1,5\%$ .

Для визначення ступеня відкриття перепускного клапана (wastegate) спочатку в точці К1 визначалася загальна витрата газів  $G_{\Sigma}$ , що виходять із циліндрів дизеля і проходять через магістраль основного потоку газів 4 (із повністю закритим клапаном 3). Після цього при зміненому положенні перепускного клапана (wastegate) 3 у точці К2 визначалась витрата газів  $G_{\Pi}$  через перепускную магістраль 5 та за виразом (4.1) розраховувався ступінь перепуску газів  $\delta_{\text{EWG}}$ . Подальші вимірювання виконувалися за двома схемами (рис. 4.3), отримані таким чином експериментальні значення показали хорошу збіжність, що підтверджувало правильність обраної схеми вимірювань та коректність отриманих значень.

Як критерій теплової напруженості ДВЗ приймалося середнє значення температури ВГ за циліндрами дизеля –  $t_{\text{Г}}$ , вимірювання якої забезпечувалося судновою системою діагностики Doctor. Значення температури ВГ рекомендується дизелебудівними фірмами та науковими дослідниками як критерії оцінки перебігу робочого процесу і стану паливної апаратури високого тиску [61].



Рис. 4.3. Послідовність виконання експериментальних досліджень

Результати узагальнені в таблицях 4.1-4.3 і представлені на рис. 4.4.

Таблиця 4.1. Зміна емісії  $\text{NO}_x$ , г/(кВт·год) суднового дизеля 6L20 Wartsila залежно від навантаження і ступеня перепуску випускних газів

Навантаження, %	Ступінь перепуску випускних газів, $\delta_{EWG}$ , %				
	0	3,8	6,0	8,1	9,6
55	7,58	7,48	7,43	7,33	7,28
67	7,81	7,62	7,52	7,43	7,32
74	8,21	7,82	7,71	7,52	7,34
83	8,48	8,19	7,78	7,64	7,38

Таблиця 4.2. Зміна питомої ефективної витрати палива,  $b_e$ , г/(кВт·год), суднового дизеля 6L20 Wartsila залежно від навантаження і ступеня перепуску випускних газів

Навантаження, %	Ступінь перепуску випускних газів, $\delta_{EWG}$ , %				
	0	3,8	6,0	8,1	9,6
55	198,6	200,7	201,6	203,5	206,8
67	196,9	198,9	199,6	201,3	202,6
74	195,5	196,3	196,8	197,3	198,1
83	191,6	192,5	193,6	195,1	195,7

Таблиця 4.4. Зміна температури випускних газів  $t_r$ , °C, суднового дизеля 6L20 Wartsila залежно від навантаження і ступеня перепуску випускних газів

Навантаження, %	Ступінь перепуску випускних газів, $\delta_{EWG}$ , %				
	0	3,8	6,0	8,1	9,6
55	285	294	298	312	318
67	279	285	294	304	308
74	278	283	291	293	297
83	273	281	288	290	293

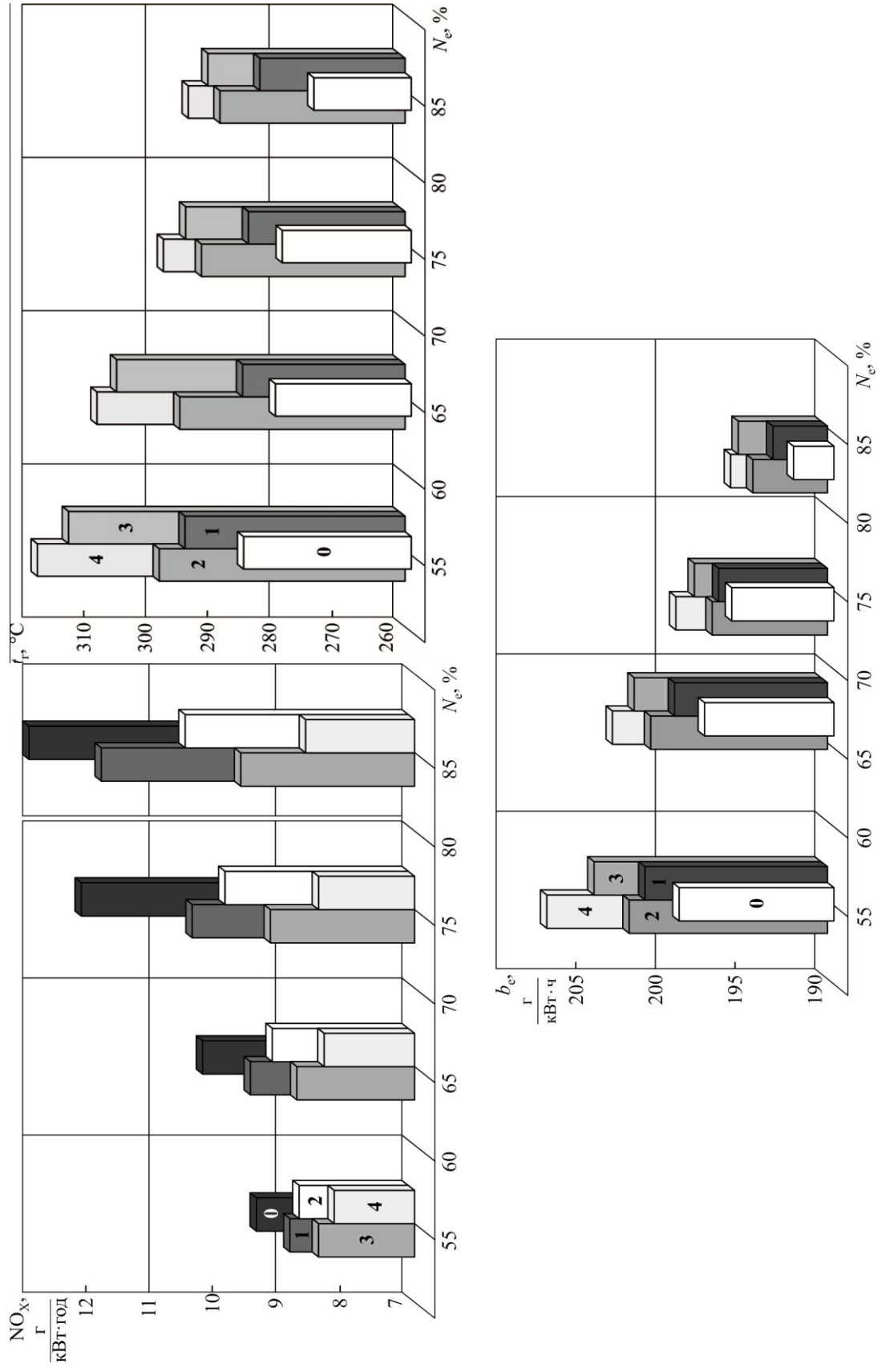


Рис. 4.4. Зміна емісії  $NO_x$ , г/(кВт·год), температури випускних газів  $t_p$ , °C, та питомої витрати палива,  $b_e$ , г/(кВт·год) для різних навантажень  $N_e$ , %, суднового дизеля 6L20 Wartsila та різного ступеня перепуску газів  $\delta_{EWG}$ : 0 – відсутність перепуску; 1 – 3,8 %; 2 – 6,0 %; 3 – 8,1 %; 4 – 9,6 %

Результати досліджень, виконаних на дизелі 6L20 Wartsila дозволяють зробити наступні висновки.

Система EWG рекомендується і використовується деякими фірмами (наприклад Wartsila) для зниження тиску наддувного повітря на підвищених навантаженнях судових дизелів. Система EWG забезпечує перепуск ВГ у діапазоні 0...10 % від їх загального об'єму безпосередньо у випускную трубу без використання їхньої енергії в ГТН. При цьому систему EWG можливо використовувати для забезпечення екологічних параметрів роботи ДВЗ (зокрема для зниження емісії  $\text{NO}_x$  з ВГ) в усьому діапазоні експлуатаційних режимів роботи дизеля.

Для судового дизеля 6L20 Wartsila, що працює в діапазоні навантажень  $N_{\text{раб}}=(0,55...0,83)N_{\text{ном}}$  під час використання системи EWG зі ступенем перепуску випускних газів  $\delta_{\text{EWG}}=3,8...9,6\%$  були отримані наступні результати:

1) підвищення ступеня перепуску ВГ в діапазоні 0...9,6 % сприяє зниженню емісії оксидів азоту з 8,72 г/(кВт·год) до 6,53 г/(кВт·год) і залежить від навантаження на дизель; при цьому відносне зниження викидів  $\text{NO}_x$  знаходиться в межах 1,15...13,85%;

2) найбільший рівень зниження концентрації  $\text{NO}_x$  у ВГ відповідає максимальному ступеню перепуску газів і режиму максимального навантаження на дизель (у проведених експериментах 9,6% і  $0,83N_{\text{ном}}$ );

3) використання системи EWG змінює стехіометричне співвідношення паливо-повітря, що сприяє збільшенню питомої ефективної витрати палива;

4) для режимів роботи дизеля, близьких до номінального (у проведених дослідженнях 74...83 % номінальної потужності дизеля), під час використання системи EWG збільшення питомої ефективної витрати палива складає 0,8...1,9 г/(кВт·год) або у відносних значеннях 0,26...1,05 %; при цьому, з огляду на максимальне зниження емісії  $\text{NO}_x$  на даних режимах експлуатації, саме поліпшення екологічних показників роботи дизеля є

переважаючим фактором для даного діапазону навантажень, тому використання системи EWG у цьому випадку доцільне і може бути рекомендовано як спосіб забезпечення екологічних вимог до судових дизелів;

5) на навантаженнях  $(0,55...0,67)N_{\text{ном}}$  збільшення витрати палива під час використання системи EWG може досягати 1,83...2,52 %; враховуючи, що в даній варіації навантажень використання EWG забезпечує зниження емісії  $\text{NO}_x$  на 1,15...5,5 %, застосування системи перепуску газів для цього діапазону не є доцільним.

#### 4.2.2. Результати досліджень, виконаних на судовому середньооборотовому дизелі 6L26 Wartsila

З метою збільшення масиву експериментальних даних, а також для підтвердження результатів попередніх досліджень, наступний етап випробувань виконувався на судовому СОД 6L26 фірми Wartsila (який за конструктивними характеристиками та основними показниками робочого циклу ідентичний дизелю 6L20 фірми Wartsila, на якому були виконані попередні експерименти).

Основні характеристики дизеля 6L26 фірми Wartsila:

кількість циліндрів – 6;

діаметр циліндру – 0,26 м;

хід поршню – 0,32 м;

максимальний тиск згоряння – 16,1 МПа;

частота обертання – 1000 об/хв;

номінальна потужність  $N_{\text{ном}}=2040$  кВт;

питома ефективна витрата палива – 0,189 кг/(кВт·год).

Технологія досліджень відповідала випробуванням, що виконувалися на дизелі 6L20. Результати експерименту наведені в таблицях 4.4-4.6.

Таблиця 4.4. Визначення емісії  $\text{NO}_x$ , г/(кВт·год), суднового дизеля 6L26 Wartsila

Навантаження, %	Ступень перепуску випускних газів, $\delta_{\text{EWG}}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	7,41	7,36	7,31	7,22	7,18	7,13
65	7,62	7,52	7,38	7,29	7,21	7,18
75	7,93	7,77	7,53	7,45	7,32	7,23
85	8,46	8,10	8,01	7,68	7,57	7,31

Таблиця 4.5. Визначення питомої ефективної витрати палива,  $b_e$ , г/(кВт·год), суднового дизеля 6L26 Wartsila

Навантаження, %	Ступінь перепуску випускних газів, $\delta_{\text{EWG}}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	196,6	203,0	204,0	204,7	204,8	205,3
65	195,3	200,5	202,7	203,2	203,3	203,4
75	193,7	196,8	197,3	197,5	197,6	197,7
85	189,2	190,6	190,9	191,2	191,3	191,4

Таблиця 4.6. Визначення температура випускних газів,  $t_r$ , °С, дизеля 6L26 Wartsila

Навантаження, %	Ступінь перепуску випускних газів, $\delta_{\text{EWG}}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	283	285	291	298	308	315
65	276	277	280	285	298	301
75	276	278	279	283	288	297
85	273	275	277	281	287	292

Зниження емісії  $\text{NO}_x$  під час використання системи EWG показано на рис. 4.5. Ефективність використання системи EWG для кожного з режимів роботи дизеля оцінювалася площею під кривою  $\text{NO}_x=f(\delta_{\text{EWG}})$ .

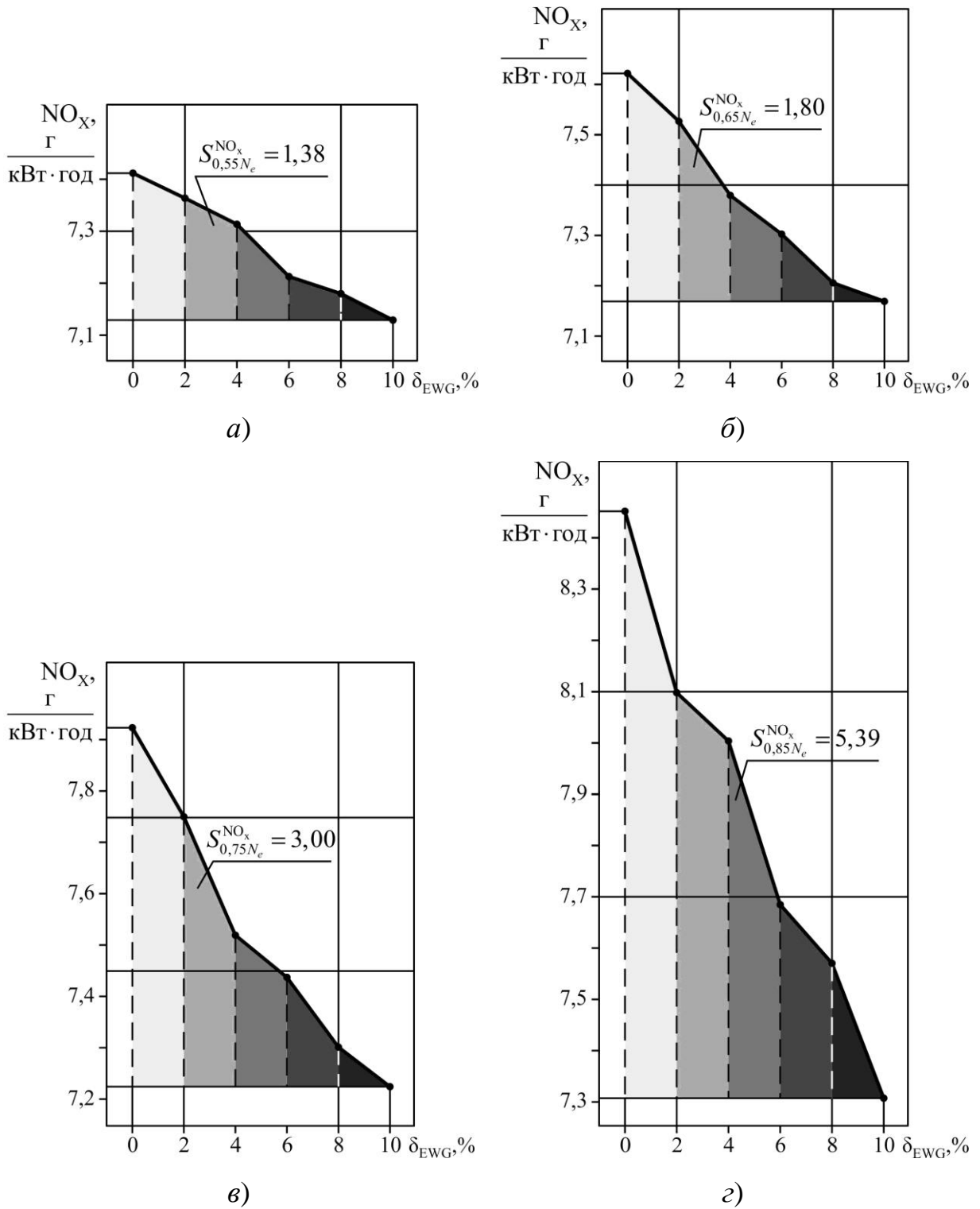


Рис. 4.5. Зміна емісії  $NO_x$  залежно від ступеня перепуску випускних газів  $\delta_{EWG}$  при різних навантаженнях суднового дизеля 6L26 Wartsila:

a – 55 %; б – 65 %; в – 75 %; з – 85 %

З огляду на значення  $\text{NO}_x$ , що наведені в таблиці 4.4, були отримані наступні значення інтеграла, який визначає площу під кривою  $\text{NO}_x=f(\delta_{\text{EWG}})$ :

$$S_{0,55N_e}^{\text{NO}_x} = 1,38; S_{0,65N_e}^{\text{NO}_x} = 1,80; S_{0,75N_e}^{\text{NO}_x} = 3,00; S_{0,85N_e}^{\text{NO}_x} = 5,39.$$

Розмірність цього інтеграла (тобто площі під кривою  $\text{NO}_x=f(\delta_{\text{EGR}})$ ) –  $\left[ \frac{\Gamma}{\text{кВт} \cdot \text{год}} \cdot \% \text{EWG} \right]$ , але для полегшення позначення залишаємо лише чисельні значення.

Збільшення площі під кривою  $\text{NO}_x=f(\delta_{\text{EWG}})$  під час підвищення навантаження на дизель (у діапазоні 55...85 % номінальної потужності) свідчить про більшу екологічну ефективність системи перепуску газів на даних режимах роботи [62].

Зміна питомої ефективної витрати палива  $b_e$  при різному ступені рециркуляції  $\delta_{\text{EWG}}$  і різних навантаженнях представлена у вигляді таблиці 4.8, у якій відображено процентне збільшення  $\Delta b_e$  порівняно з роботою дизеля без використання системи EWG.

Таблиця 4.7. Збільшення питомої витрати палива  $\Delta b_e, \%$ , під час використання системи перепуску випускних газів

Навантаження, %	Ступінь перепуску випускних газів, $\delta_{\text{EWG}}, \%$				
	2	4	6	8	10
55	3,25	3,78	4,12	4,17	4,43
65	2,66	3,78	4,05	4,08	4,15
75	1,62	1,88	1,95	1,98	2,07
85	0,75	0,88	1,07	1,12	1,17

Номограма, що відображає діапазон збільшення питомої витрати палива  $\Delta b_e$  залежно від навантаження дизеля для різного ступеня перепуску випускних газів  $\delta_{\text{EWG}}$ , показана на рис. 4.6.

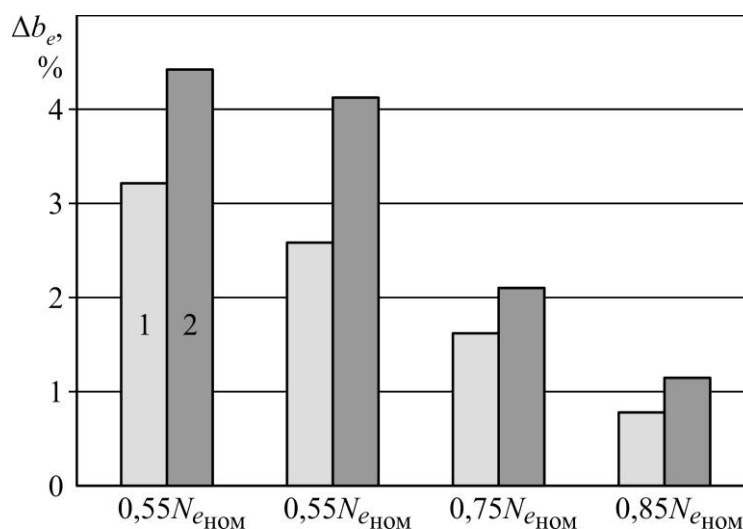


Рис. 4.6. Діапазон збільшення питомої витрати палива  $\Delta b_e$  при різних навантаженнях дизеля 6L26 Wartsila:

1 –  $\delta_{EWG} = 2\%$ ; 2 –  $\delta_{EWG} = 10\%$

Використання системи EWG призводить до підвищення температури випускних газів дизеля  $t_T$ , що, на нашу думку, пов'язане з підвищенням питомої ефективної витрати палива і зміщенням процесу його згоряння на лінію розширення. Номограми, що відображають зміну середнього значення  $t_T$  залежно від ступеня відкриття перепускного клапана  $\delta_{EWG}$  під час різних навантажень дизеля наведені на рис. 4.7.

Як граничні значення температури випускних газів для розглянутого дизеля фірма Wartsila рекомендує наступні значення: із навантаженням 100 % – 305 °С; із навантаженням 85 % – 295 °С; із навантаженням 75 % – 295 °С; із навантаженням 65 % – 300 °С; із навантаженням 50 % – 300 °С.

Наведені результати свідчать про обмеження використання системи EWG на деяких режимах роботи у зв'язку з підвищенням температурного напруженості (перевищенням температури випускних газів встановлених меж).

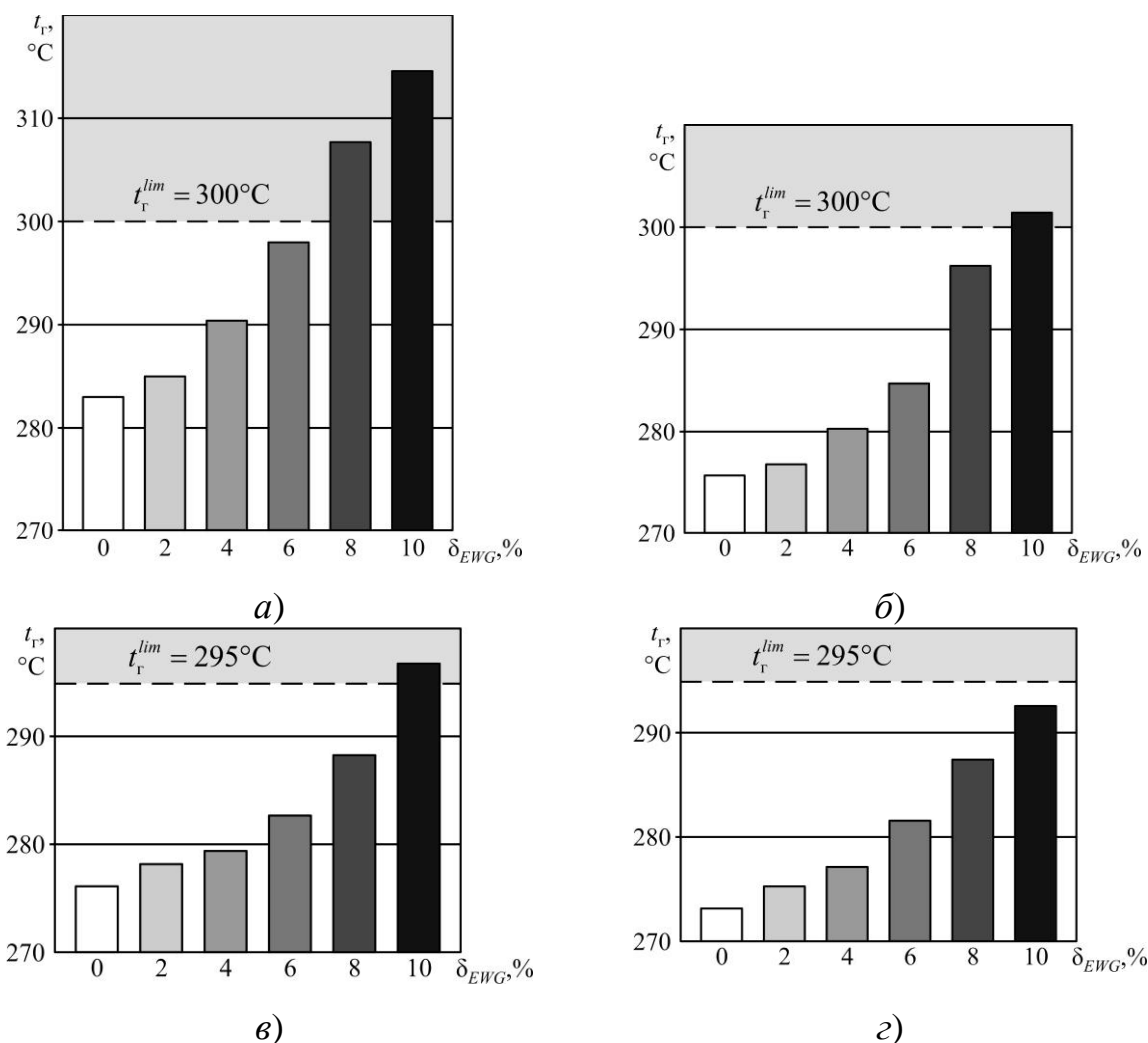


Рис. 4.7. Зміна середнього значення температури випускних газів  $t_r$  залежно від ступеня відкриття перепускного клапана  $\delta_{EWG}$  при різних навантаженнях дизеля 6L26 Wartsila:  
 а – 55 %; б – 65 %; в – 75 %; г – 85 %

Разом з дослідженням з вивчення впливу системи перепуску на екологічність роботи морського судна до комплексу проведених досліджень входило чисельне моделювання за визначенням максимальної температури робочого циклу  $T_z$ . Результати, що відображають зміну величини  $T_z$  під час різного навантаження дизеля (у діапазоні  $0,55 \dots 0,85 N_{eном}$ ) і різного ступеня перепуску ВГ (у діапазоні  $\delta_{EWG} = 0 \dots 10$  %), наведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8. Зміна максимальної температури циклу  $T_z$ , К, суднового дизеля 6L26 Wartsila

Навантаження, %	Ступінь перепуску випускних газів, $\delta_{EWG}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	1946	1938	1906	1886	1874	1862
65	1903	1888	1873	1856	1830	1808
75	1866	1846	1822	1792	1771	1752
85	1834	1822	1801	1768	1734	1717

Компіляція результатів, наведених у таблицях 4.6 і 4.8, показана на рис. 4.8, на якому відображено вплив максимальної температури циклу  $T_z$  на емісію  $NO_x$  під час різного ступеня перепуску ВГ і різного навантаження на дизель. Отримані таким чином графічні залежності  $NO_x=f(T_z)$  свідчать про взаємозв'язок даних параметрів і підтверджують можливість керування екологічністю морського судна за рахунок використання системи EWG.

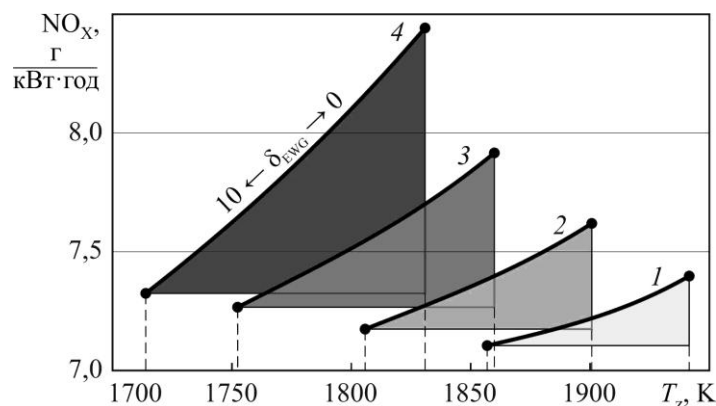


Рис. 4.8. Вплив максимальної температури циклу  $T_z$  на емісію  $NO_x$

(у діапазоні перепуску випускних газів  $\delta_{EWG}=0\dots 10\%$ )

при різних режимах роботи суднового дизеля 6L26 Wartsila:

1 – 55 %; 2 – 65 %; 3 – 75 %; 4 – 85 %

Екологічна ефективність системи перепуску може бути оцінена площею виділеного сектора (1, 2, 3, 4), її збільшення свідчить про більше зниження концентрації  $NO_x$  у випускних газах і збільшення екологічності морського судна.

### 4.3. Висновки за розділом 4

Як висновки досліджень, що наведені у розділі 4, визначимо наступне.

1. Одним зі способів забезпечення екологічності суден морського флоту є керування ВГ шляхом їх перепуску, при якому частина газового потоку переспрямовується з обминанням ГТН безпосередньо у газовипускную трубу. Перепуск газів відбувається за допомогою додаткової газової магістралі, на якій встановлюється клапан перепуску (клапан EWG, однойменний з системою перепуску випускних газів – системою EWG).

2. Ефективність використання системи EWG для кожного з режимів роботи дизеля з точки зору забезпечення екологічності роботи морського судна визначається площею під залежність  $NO_x=f(\delta_{EWG})$ , де  $\delta_{EWG}$  – ступінь перепуску газів. З технічно можливого діапазону (який деякими фірмами-виробниками дизелів забезпечується в межах 0...10 % від загального об'єму газів) найбільш оптимальними (з точки зору ближчого до максимального зниження емісії оксидів азоту з одночасним мінімальним збільшенням витрати палива та підтриманням теплової напруженості) є режими, на яких забезпечується 4...6 %-ий перепуск газів.

3. Під час керування ВГ шляхом їх перепуску створюються умови, що сприяють погіршенню постачання повітря до циліндрів дизеля. Це, у свою чергу, призводить до зменшення температури наприкінці згоряння та пропорційного зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах. Стосовно суднових СОД 6L20 та 6L26 Wartsila відсоткове зниження максимальної температури згоряння під час використання системи EWG (відносно роботи дизеля без використання системи перепуску газів) складає 4,3...6,3 %, при цьому досягається зниження емісії  $NO_x$  з випускними газами до 3,33...15,42 %. Сумісне найбільше зниження температури випускних газів та емісії  $NO_x$  відповідає режимам 75...85 %-ого навантаження. Саме ці режими є найбільш тривалими порівняно з іншими експлуатаційними

режимами суднових СОД під час їх використання як допоміжних двигунів на річковому та морському транспорті.

4. Одночасно з покращенням екологічності роботи суден морського флоту керування ВГ за допомогою системи EWG призводить до збільшення питомої витрати палива та підвищення теплової напруженості дизеля. Перше та друге зумовлюється погіршенням процесу згоряння палива у випадку використання системи EWG (за рахунок зниження швидкості згоряння) та зміщення процесу згоряння в бік розширення. Збільшення питомої витрати палива під час використання системи EWG знаходиться в межах від 3,25...4,43 до 0,75...1,17 %, де більші значення відповідають 55 %-ому навантаженню, менші – 55 %-ому навантаженню на дизель. Підвищення теплової напруженості циліндрів дизеля спостерігається на експлуатаційних режимах  $(0,55...0,65)N_{\text{енорм}}$  під час 8...10 %-го перепуску. За цих умов температура ВГ перевищує максимально допустимі значення. Таким чином, використання системи EWG як способу забезпечення екологічності морського судна обмежується двома чинниками: під час малих навантажень (у діапазоні 55...65 %) – збільшенням витрати палива; під час великого перепуску (у діапазоні 8...10 %) – збільшенням теплової напруженості циліндрів дизеля.

5. Під час вибору найбільш оптимального режиму роботи системи EWG, тобто кількості газів, яка спрямовується в обхід ГТН, необхідно виконувати комплексне оцінювання екологічних та економічних показників роботи дизеля. Незважаючи на збільшення питомої витрати палива і підвищення температури ВГ, використання системи EWG може бути рекомендовано в особливих районах Світового океану, коли переважаючим показником при експлуатації морських суден стають їхні екологічні параметри.

6. Наведені результати підтверджують доцільність використання системи EWG для зниження емісії  $\text{NO}_x$ . Однак найбільш раціональним її використання може бути як додатковий спосіб в комплексі з системою рециркуляції випускних газів EGR, для чого необхідні додаткові дослідження.

## 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)».

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 [63].

У загальному вигляді формулу розрахунку ККЕЕ можна представити таким чином:

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

Кількість викидів CO<sub>2</sub> 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  $i = 1 \dots 7$

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

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

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

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

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 CO<sub>2</sub>)

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

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

$C_{FME(i)}$  – питомий (масовий) вміст CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>)

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

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

$C_{FAE}$  – питомий (масовий) вміст CO<sub>2</sub> 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

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

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 [64].

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

Дані, необхідні для розрахунку ККЕЕ наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.1. Характеристики палив, що використовуються на суднах

№	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

Таблиця 5.2. Вихідні дані для розрахунку ККЕЕ

Тип судна	Контейнеровоз
Загальна довжина, м	181,0
Довжина між перпендикулярами, м	173,2
Ширина, м	32,1
Осадка, м	7,65
Дедвейт, тонн	12545
Головний двигун	8S46MC-C «MAN-B&W»
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і питома ефективна витрата палива, г/(кВт·г)	9600, 174
Потужність, кВт і витрата палива, г/(кВт·г) ГД при 0,75 (MCR)	7200 172
Кількість ГД	1
Використовуване паливо ISO 8217-2010	RMK380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	40868
Допоміжні двигуни	3×6L20 Wartsila,
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і витрата палива (г/кВт·г)	3×1200 кВт, 182
Кількість ДГ	3
Використовуване паливо	RMK 380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Вихідна потужність ДГ, кВт	418
Швидкість судна при літній осаді і 75% потужності ГД на глибокій воді, вузли	19,6

Значення максимального  $K_{KE(MAX)}$

$$K_{KE(MAX)} = 174,2 \cdot 12545^{-0,201} = 26,14 \frac{\text{гСО}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}.$$

Розрахункове значення ККЕЕ визначимо за формулою

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

$$K_{KE(роз)} = \frac{1 \cdot 7200 \cdot 3,114 \cdot 172 + 418 \cdot 3,114 \cdot 178}{1 \cdot 12545 \cdot 1 \cdot 19,6} = 16,63 \frac{\text{гСО}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}.$$

З наведеного розрахунку видно що значення  $K_{KE(роз)}$  при заданих параметрах істотно нижче  $K_{KE(MAX)}$ .

## ВИСНОВКИ

Дипломна робота магістра спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – забезпечення екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту.

ДВЗ як найбільш розповсюджений тепловий двигун, що встановлюється на суднах морського та внутрішнього водного транспорту та забезпечує його рух, функціонування суднового обладнання та механізмів, комфортні умові праці екіпажу та відпочинку пасажирів, не лише генерує механічну енергію, але також викидає у довкілля великі об'єми випускних газів, до складу яких входять шкідливі речовини, насамперед оксиди азоту. Максимально можливий вміст оксидів азоту у випускних газах суден морського та внутрішнього водного транспорту повинен відповідати певним вимогам, перш за все – Додатку VI Конвенції МАРПОЛ. Одним із способів підвищення екологічності суден морського та внутрішнього водного транспорту є зниження пікових температур в циліндрі судових дизелів.

Головним науковим результатом дипломної роботи магістра є визначення технологій, що забезпечують зниження емісії оксидів азоту та гарантують стабілізацію та підтримання екологічних показників морських суден відповідно до вимог міжнародних стандартів.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Генератором механічної енергії яка використовується для забезпечення руху морських суден, або електропостачання судових споживачів є дизелі, здійснення замкненого робочого циклу яких неможливе без видалення у довкілля випускних газів, до складу яких входить численні шкідливі речовини. Перше місце (з точки зору негативного впливу на довкілля) серед шкідливих газових викидів з річкових та морських суден

практично на всіх режимах роботи дизелів, незалежно від їх типу, класу, розмірів і конструктивних особливостей, займають оксиди азоту.

2. Під час згоряння рідкого палива в циліндрі дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту утворюються теплові, паливні та швидкі оксиди азоту. Зменшення кількості паливних оксидів азоту можливо шляхом використання палива, що в своєму складі не містить азот. Прикладом такого палива є зріджені природні гази. Зменшення швидких оксидів азоту досягається шляхом спеціальної обробки випускних газів в газовипускному тракті дизеля. Зменшення теплових оксидів азоту (які характеризуються найбільшою кількістю в загальному обсязі оксидів азоту) досягається шляхом зниження пікових температур в циліндрі дизеля під час згоряння палива.

3. Серед механізмів утворення оксидів азоту найбільш проблемним залишається високотемпературний, нівелювання його впливу на емісію  $\text{NO}_x$  пов'язано з необхідністю зниження температурних піків, що утворюються під час згоряння рідкого палива.

4. До однієї зі найбільш ефективних технологій, що забезпечують екологічність роботи морських суден, належить керування піковими значеннями температури в циліндрі дизеля. Саме з перевищенням критичних значень температури газів в циліндрі дизеля відбувається ланцюгова реакція утворення оксидів азоту, що призводить до збільшення їх емісії з випускними газами. Створення умов, які забезпечують зниження пікових значень температури в циліндрів дизеля під час згоряння палива, сприяє перериванню ланцюгової реакції утворення оксидів азоту та переходу її до звичайної реакції з кінцевою кількістю азотистих з'єднань. Це призводить до суттєвого зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами, та покращує а такий спосіб екологічні показники роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту.

5. Однією з технологій, що сприяють зменшенню пікових температур є подача азоту в циліндри дизеля. При цьому здійснюється охолодження атмосфери циліндра, що призводить до переривання ланцюгової реакції утворення оксидів азоту та її переспрямуванню в бік реакції з кінцевою кількістю компонентів, що містять оксиди азоту. Це сприяє зниженню емісії оксидів азоту на 55...60 %.

6. Зменшенню емісії оксидів азоту з випускними газами також сприяє безпосереднє розпорошення прісної води в робочому циліндрі. При цьому рівень емісії оксидів азоту знижується на 20...25 %.

7. Одним з перспективних способів зниження емісії оксидів азоту є зміна складу повітря в дизельних двигунах, яке досягається підвищенням вологості повітря. Технологічне це може бути досягнуте за рахунок системи Humid Air Motor, яка дозволяє підвищити вологість повітря до 99 %. Випробування системи показало, що на експлуатаційному режимі вміст оксидів азоту у випускних газах суднових дизелів знижується на 70...80 %. Це пояснюється тим, що підвищений вміст водяних парів в наддувочному повітрі сприяє зниженню піків температури в циліндрі дизеля та попереджує утворення оксидів азоту.

8. Наведені результати мають суттєво практичне значення та забезпечують підвищення екологічної ефективності суднового пропульсивного комплексу.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Review of Maritime Transport 2019 // United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD/RMT/2019). – New York and Geneva, 2019. – 132 p.
2. Man's inhumanity to machines // MER, October 2019 – P. 42-47.
3. Diesel Directory // Marine Propulsion Perspective in association with MER. – 2020. – № 1. – P. 10-23.
4. Kuropyatnyk O. A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines / O. A. Kuropyatnyk // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992.
5. 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. – 2015. – Vol. 9. – № 5.– P. 269-278. DOI:10.5539/mas.v9n5p269.
6. 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.
7. Kuropyatnyk O. A. Reduction of NO<sub>x</sub> 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.
8. Богуславець М. М. Забруднення довкілля: чинники і показники екологічної безпеки нафтопереробного об'єкта / М. М. Богуславець, Л. І. Челядин, Д. Р. Крика // Екологічна безпека та збалансоване

ресурсокористування. – 2020. № 19(2). – С. 43-49. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2\(20\)-43-49](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2(20)-43-49).

9. Тимченко І. В. Дослідження екологічних ризиків антропогенного навантаження на екологічні системи обмежених акваторій морських суднохідних каналів / І. В. Тимченко, В. С. Мотигіна // Збірник наукових праць Нац. ун-ту кораблебудування ім. адм. Макарова, 2017. – № 4. – С. 99-102. DOI 10.15589/jnn20170414.

10. Kondranenko O. M. Feature of determination of the efficiency of devices for improvement of ecological safety level of vehicles with reciprocating ice exploitation / O. M. Kondranenko, G. O. Chernobay, Yu. F. Dercach, S. A. Kovalenko // Двигуні внутрішнього згоряння, 2019. – № 2. – С. 36-44. DOI:10.20998/0419-8719.2019.2.07.

11. Graziano B. On the Potential of Oxygenated Fuels as an Additional Degree of Freedom in the Mixture Formation in Direct Injection Diesel Engines / B. Graziano, F. Kremer, S. Pischinger, K. A. Heufer, H. Rohs // SAE International journal of fuels and lubricants. – 2015. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 62-79. DOI: 10.4271/2015-01-0890.

12. Кривенко Г. М. Аналіз викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами / Г. М. Кривенко, Л. В. Возняк, В. О. Зорін // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2019. – № 1(19). – С. 85-93. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1\(19\)-85-93](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1(19)-85-93).

13. Balzani J. M. Field test of available methods to measure remotely SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions from ships / J. M. Balzani, B. Alfoldy, J. Hjorth // Atmospheric measurement techniques. – 2014. – Vol. 7. – Iss. 8. – P. 2597-2613. DOI: 10.5194/amt-7-2597-2014.

14. Aithal S. M. Modeling of NO<sub>x</sub> formation in diesel engines using finite-rate chemical kinetics / S. M. Aithal // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87. – Iss. 7. – P. 2256-2265. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.01.011.

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

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

17. Kavtaradze R. Z. New alternative (partially homogeneous) combustion process as a method for reduction of concentrations of nitric oxides and soot in combustion products of diesel / R. Z. Kavtaradze, S. S. Sergeev // High Temperature. – 2014. – Vol. 52. – Iss. 2. – P. 282-296. DOI: 10.1134/S0018151X14010106.

18. Кузнецов С. І. Високотемпературна нейтралізація нітроген оксидів у вихлопних газах судових двигунів / С. І. Кузнецов, В. О. Малєєв, В. М. Безпальченко // Збірник наукових праць Нац. ун-ту кораблебудування ім. адм. Макарова, 2019. – № 2. – С. 73-77. doi.org/10.15589/znp2019.2(476).11.

19. Андрусенко С. Е. Вопросы снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах судовых среднеоборотных дизелей (обзор статей Diesel Facts, 2010, № 4) / С. Е. Андрусенко, Ю. И. Матвеев // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2022. – № 1. – С. 76-81.

20. Климова Е. В. Образование вредных веществ в выбросах судовых дизелей в процессе горения топливовоздушной смеси / Е. В. Климова // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування.– 2017. – № 2. – С. 98-104.

21. 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.

22. Петров А. П. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками / А. П. Петров Г. Е. Живлюк // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2019. – Т. 11. – №. 1. – С. 130-145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

23. Канило П. М. Повышение канцерогенной безопасности транспортных двигателей внутреннего сгорания / П. М. Канило, А. П. Марченко, И. В. Парсаданов, А. П. Поливянчук // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2016. – № 2. – 68-72. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.11.

24. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotzkyi Y., Fomin O., Pířtřek V., Kuřcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.

25. Wright A. A. Exhaust Emission from Combustion Machinery / A. A. Wright. – Published by IMarEST, London, 2009. – 244 с.

26. 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

27. Van T. G. Global impact of recent IMO regulation on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T. C. Van, J. Ramirez, Z. Ristovski, R. J. Brown // Transportation Research Part D : Transport and Environment. – 2019. – Vol. 70. – P. 123-134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001.

28. Короткий Т. Р. Сборник резолюций Международной Морской Организации по предотвращению загрязнений морской среды /

Т. Р. Короткий, Позолотин Л. А., Торский В. Г. – Одеса : Фенікс, 2012. – 250 с.

29. Сагін С.В., Побережний Р.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 110-117. doi: 10.31653/smf46.2023.110-117.

30. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25 червня 1991 р. № 1264–ХІІ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/conv/page> (дата звернення: 05.10.2019).

31. Куропятник А. А. Обеспечение экологических показателей работы энергетических установок морских судов / А. А. Куропятник // Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2020. – С. 108-112.

32. Koci P. Dynamics and selectivity of NO<sub>x</sub> reduction in NO<sub>x</sub> storage catalytic monolith / P. Koci, F. Plat, J. Stepanek, M. Kubicek, M. Marek // Catalysis Today. – 2008. – Vol. 137. – Iss. 2-4. – P. 253-260. DOI: 10.1016/j.cattod.2007.11.023.

33. Hodjati S. NO<sub>x</sub> sorption–desorption study: application to diesel and lean-burn exhaust gas (selective NO<sub>x</sub> recirculation technique) / S. Hodjati, K. Vaezzadeh, C. Petit, V. Pitchon, A. Kiennemann // Catalysis Today. – 2000. – Vol. 59. – Iss. 3-4. – P. 323-334. doi.org/10.1016/S0920-5861(00)00298-4.

34. Yoo J. High-speed multiplexed spatiotemporally resolved measurements of exhaust gas recirculation dynamics in a multi-cylinder engine using laser absorption spectroscopy / J. Yoo, V. Prikhodko, J. E. Parks, W. P. Partridge, A. Perfetto, S. Geckler // Applied spectroscopy. – 2016. – Vol. 70. – Iss. 4. – P. 572-584. DOI: 10.1177/0003702816636802.

35. Miller Jothi N. K. LPG fueled diesel engine using diethyl ether with exhaust gas recirculation / N. K. Miller Jothi, G. Nagarajan, S. Renganarayanan // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2008. – Vol. 47. – Iss. 4. – P. 450-457. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.012.

36. Куропятник А. А. Диагностирование экологических показателей работы судовых дизелей / А. А. Куропятник // *Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 – Marine Power Plants and Operation)*, квітень 2020. – Одеса : Одеський національний морський університет. – С. 220-227.

37. Sagin S. V., Куропятник О. А., 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

38. Голиков В. А. Новые тенденции в экологичности судовых энергетических установок / В. А. Голиков // *Судовые энергетические установки : науч.-тех. сб.* – 2011. – Вып. 27. – С. 4-9.

39. 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.

40. Кринецкий И. И. Основы научных исследований / И. И. Кринецкий. – К.-Одесса : Вища школа, 1981. – 208 с.

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

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

43. 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.

44. 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.

45. Kuropyatnyk O. A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines / O.A. Kuropyatnyk // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689.

46. Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи судових дизелів // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 52 – 66. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-52-66.

47. Погрибный В.Б. Численное решение уравнений Навье-Стокса методом конечных объемов на структурированной сетке с гибкими границами // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2014. – № 3(50). – С. 413-417.

48. Kuropyatnyk 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.

49. Аболешкин С. Е. Моделирование образования окислов азота в цилиндре дизеля / С. Е. Аболешкин, В. О. Калюжный // Судовые

энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. 28. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 120-128.

50. Аболешкин С.Е. Показатели технического уровня судовой энергетической установки / С.Е. Аболешкин // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2012. – .– Одесса : ОНМА. – Вып. 30.– С. 138-145.

51. Мадей В.В., Волков О.М., Сагин С.С. Забезпечення екологічності морських суден під час їх експлуатації в спеціальних екологічних районах Північної Європи // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 – 23.03.2023.– Одеса: НУ «ОМА», 2023. – С. 87-90.

52. Білоусов Є.В. Аналіз сучасних підходів до проблеми створення судових малооборотних газодизельних двигунів / Є.В. Білоусов, В.П. Савчук, Т.П. Білоусова // Двигуни внутрішнього згорання. – 2016. – № 1. – 81-88. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.15.

53. Мадей В.В., Волков О.М. Екологічні та економічні аспекти використання в судових дизелях палив біологічного походження // Матеріали 14-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 16-18 березня 2023 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – С. 201-204.

54. 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.

55. Сагин С.В. Триботехнические процессы, протекающие в топливной аппаратуре высокого давления судовых дизелей / С.В. Сагин // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 2. – Одеса : ОНМУ. – С. 33-42.

56. Husnain N. Iron oxide based catalysts for low temperature selective catalytic reduction  $\text{NO}_x$  with  $\text{NH}_3$  / N. Husnain, E. Wang, K. Li, M. T. Anwar // *Reviews in chemical engineering*. – 2019. – Vol. 35. – Iss. 2. – P. 239-264. DOI: 10.1515/revce-2017-0064.

57. Bhaduris S. EGR control on operation of a tar tolerant HCCI engine with simulated syngas from biomass / S. Bhaduris, H. Jeanmart, F. Contino // *Applied energy*. – 2018. – Vol. 227. – P. 159-167. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.233.

58. Куропятник А.А. Обеспечение требований конвенции МАРПОЛ73/78 по ограничению выбросов  $\text{NO}_x$  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.*

**59. Воронков Г.С. Зниження емісії оксидів азоту з під час експлуатації дизелів суден морського транспорту / Г.С. Воронков, Ю.В. Заблоцький // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУОМА. –С. 102-107.**

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

61. Куропятник О.А. The use of bypass exhaust gases to ensure the environmental performance of marine diesel engines / О.А. Куропятник // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 38. – С. 217-227.

62. Куропятник О.А. Інтегральна оцінка екологічності та економічності роботи судових дизелів / О.А. Куропятник // *Збірка матеріалів 11-їй Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування»,*

08-10 вересня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 164-167.

63. 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.

64. Половинка Э.М. Показатели эффективности судовых энергетических установок по количеству продуктов сгорания (удельным выбросам  $\text{CO}_2$ ) : методическое пособие / Э.М. Половинка, И.Н. Табулинский. – Одесса : ОНМА, 2014. – 24 с.