

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

Кафедра суднових енергетичних установок

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему:

**ВИКОРИСТАННЯ СКРУБЕРНИХ СИСТЕМ
ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ
СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

Курсанта 2-го року навчання навчально-наукового інституту інженерії
Турбіна Владислава Олександровича

Керівник: д-р техн. наук, професор Мінос М.В.

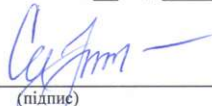


Нормоконтроль

Дресел К.М., доц. Фарисенко 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)

Мінос М.В. Алтанов 19.12.25

(ПІБ, підпис, дата)

Рецензент (внутрішній)

Колесаслово 18.12.25

(ПІБ, підпис, дата)

Одеса – 2025

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 _____ Турбін Владислав Олександрович _____

1. Тема дипломної роботи: _____ Використання скрубберних систем _____
очищення випускних газів суднових дизелів _____

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

2. Об'єкт дослідження _____ процес забезпечення екологічних показників _____
суднового дизеля _____

3. Предмет дослідження _____ процес управління емісією оксидів сірки з _____
випускними газами суднових дизелів _____

4. Обсяг пояснювальної записки: _____ 60...70 стор. _____

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи: _____
Аналіз технологічних рішень щодо зменшення емісії оксидів сірки з _____
випускними газами суднових дизелів _____

Методологічні основи наукових досліджень _____

Аналіз способів скрубберного очищення випускних газів суднових _____
дизелів від домішок сірки _____

Експериментальні дослідження скрубберних систем очищення _____
випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки _____

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

Аналіз технологічних рішень щодо зменшення емісії оксидів сірки з _____
випускними газами суднових дизелів _____

Методологічні основи наукових досліджень _____

Аналіз способів скрубберного очищення випускних газів суднових _____
дизелів від домішок сірки _____

Експериментальні дослідження скрубберних систем очищення _____
випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки _____

7. Перелік графічного матеріалу:

Методологія наукового дослідження _____

Аналіз способів скрубберного очищення випускних газів суднових _____
дизелів від домішок сірки _____

Експериментальні дослідження скрубберних систем очищення _____
випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки _____

Висновки _____

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 72 сторінки, 14 рисунків, 14 таблиць, 58 літературних джерел.

Магістерське наукове дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – забезпечення міжнародних вимог щодо емісії оксидів сірки з випускними газами дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Висунута та підтверджена наукова гіпотеза про те, що необхідний рівень емісії оксидів сірки досягається шляхом використання спеціальних систем очищення випускних газів, в якості яких доцільно використовувати скрубери.

Визначені вимоги міжнародної конвенції MARPOL щодо вмісту сірки в паливі та вмісту оксидів сірки у випускних газах суднових дизелів

Розглянуті найбільш розповсюджені схеми скрубєрного очищення випускних газів від оксидів сірки.

Розглянута система безперервного моніторингу роботи суднової системи скрубєрного очищення випускних газів від оксидів сірки.

ВМІСТ ОКСИДІВ СІРКИ У ВИПУСКНИХ ГАЗАХ, ВМІСТ СІРКИ У ПАЛИВІ, ЕМІСІЯ ОКСИДІВ СІРКИ, МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, СКРУБЕРНЕ ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ, СПЕЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ, СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ

ABSTRACT

Master's degree thesis: 72 pages, 14 figures, 14 tables, 58 references.

Master's research is aimed at solving the scientific and applied task – ensuring international requirements for sulfur oxide emissions from diesel exhaust gases of ships of maritime and inland waterway transport.

A scientific hypothesis has been put forward and confirmed that the required level of sulfur oxide emissions is achieved by using special exhaust gas cleaning systems, as which it is advisable to use scrubbers.

The requirements of the international MARPOL convention regarding the sulfur content in fuel and the sulfur oxide content in the exhaust gases of ship diesel engines have been determined.

The most common schemes for scrubber cleaning of exhaust gases from sulfur oxides have been considered.

A system for continuous monitoring of the operation of a ship's scrubber cleaning system for exhaust gases from sulfur oxides has been considered.

MARITIME TRANSPORT, SCRUBBER CLEANING OF EXHAUST GASES,
SHIP DIESEL ENGINES, SPECIAL EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS,
SULFUR CONTENT IN FUEL, SULFUR OXIDE CONTENT IN EXHAUST
GASES, SULFUR OXIDE EMISSIONS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ СІРКИ З ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ	11
1.1. Шкідливі компоненти випускних газів суднових дизелів	11
1.2. Аналіз міжнародних конвенцій, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки морських суден щодо емісії оксидів сірки	16
1.3. Варіанти досягнення відповідності вимогам щодо контролю та обмеження викидів сірковмісних продуктів.....	22
1.4. Висновки за розділом 1	28
2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	29
2.1. Загальна концепція наукових досліджень, пов'язаних з екологічною ефективністю морських засобів транспорту	29
2.2. Основні етапи математичного моделювання процесу попередження забруднення довкілля	31
2.3. Системний підхід під час дослідження екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту	32
2.4. Висновки за розділом 2	35
3. АНАЛІЗ СПОСОБІВ СКРУББЕРНОГО ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ВІД ДОМІШОК СІРКИ	36
3.1. Загальні принципи забезпечення очищення випускних газів ...	36
3.2. Системи із відкритим контуром (циклом)	39
3.3. Замкнені / гібридні системи	40
3.4. Типи одноканальних та багатоканальних скрубєрів	42

3.5. Висновки за розділом 3	44
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СКРУБЕРНИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ВІД ОКСИДІВ СІРКИ	46
4.1. Технологія проведення експерименту	46
4.2. Результати досліджень	50
4.3. Висновки за розділом 4	56
5 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ	57
ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВГ	– випускні гази
ДВЗ	– двигун внутрішнього згоряння
ЄС	– Європейський Союз
ККД	– коефіцієнт корисної дії
ККЕЕ	– конструктивного коефіцієнту енергоефективності
МАРПОЛ	– Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден
ПАВ	– поліциклічні ароматичні вуглеводні
ПУЕС	– план управління енергетичною ефективністю судна
СЕУ	– суднова енергетична установка
СПГ	– скраплений природний газ
DNV GL	Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd
EEDI	– Energy Efficiency Design Index
ECA	– Emission Control Areas
LNG	– скраплений природний газ
LPG	– Liquefied Petroleum Gas
MEPC	– Marine Environment Protection Committee
NECA	– NOX Emission Control Area
ПАН	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PSC	– Port State Control
SECA	– SO _x Emission Control Areas
SEEMP	– Ship Energy Efficiency Management Plan

ВСТУП

Забруднення атмосфери з суден відбувається внаслідок викидів відпрацьованих газів суднових енергетичних установок, викидів під час роботи допоміжних та утилізаційних котлів та інсинераторів. Також значна частка забруднення атмосфери з суден пов'язана з транспортуванням нафти та нафтопродуктів водним транспортом, при перевантаженні нафтопродуктів в атмосферу потрапляють легкі органічні сполуки, що містять велику кількість отруйних речовин.

Щодо суднових дизелів встановлена наступна номенклатура контрольованих параметрів, що визначає їх допустимий вплив на атмосферу:

- питомий середньозважений викид оксидів азоту NO_x , наведений до діоксиду азоту NO_2 ;
- питомий середньозважений викид оксиду вуглецю CO ;
- питомий середньозважений викид суми вуглеводнів CH_x .

Технічними засобами, що забезпечують аналіз та контроль викидів шкідливих речовин від суднових дизелів, є газоаналізатори. Контролю підлягає також димність випускних газів (ВГ) суднових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Димність газів визначається оптичним або ваговим методом за допомогою димомірів.

Шкідливі викиди випускних газів суднових дизелів значною мірою залежить від якості палива, використовуваного під час роботи суднових енергетичних установок. Основним критерієм якості палива, що використовується на судні, є вміст сірки в рідкому паливі. Норми вмісту сірки у рідкому паливі встановлюються Додатком VI до МАРПОЛ 73/78.

Забезпечення вимог щодо вмісту сірки в судовому паливі може вирішуватися трьома шляхами:

1) використання замість суднового важкого палива легких сортів дизельного палива. Однак вартість 1 тонна легкого палива в середньому в 1,5...1,8 рази дорожча за високосірчисте важке паливо;

2) очищення випускних газів з допомогою систем нейтралізації. Цей варіант дозволяє застосовувати паливо з будь-яким вмістом сірки та очищати його до необхідних норм;

3) переведення роботи дизеля на скраплений пропан-бутановий газ чи скраплений природний газ. Проте запаси пропано-бутану обмежені (трохи більше 3% обсягу видобутку нафти). Природний газ необхідно охолоджувати до температури мінус 190 °С, що потребує додаткової витрати енергії.

Таким чином, перспективним методом зниження оксидів сірки у вихлопних газах є застосування систем очищення з використанням судових скрубєрів.

Саме цим питанням присвячено дипломну роботу.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ СІРКИ З ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

1.1. Шкідливі компоненти випускних газів суднових дизелів

Однією із серйозних екологічних проблем суднових енергетичних установок є випускні гази, що утворюються у циліндрах дизеля під час спалювання палива. Проблема полягає у наступному. До складу рідкого палива, що використовується для суднових дизелів, входять, в основному, вуглець, водень і кисень, незначна кількість азоту та сірки, а також вода та механічні домішки, що становлять баласт палива [1, 2].

Процес згоряння палива полягає в окисленні його складових частин киснем повітря з виділенням теплоти. При цьому утворюються продукти згоряння палива (гази), які характеризуються наступним складом:

1) діоксид вуглецю (вуглекислий газ) CO_2 , що утворюється під час повного згоряння палива і є відносно нешкідливою речовиною;

2) у разі неправильній організації процесу згоряння (або за нестачі кисню повітря, або при поганому сумішоутворенні) утворюється токсичний оксид вуглецю CO ;

3) водяна пара H_2O ;

4) під час згоряння сірки, що входить до складу палива, утворюється токсичний сірчистий ангідрид SO_2 і ще токсичніший сірчаний ангідрид SO_3 . Під час їх взаємодії з водяною парою утворюється сірчиста H_2SO_3 та сірчана H_2SO_4 кислоти, які призводять до низькотемпературної корозії та інтенсивного зношування втулок циліндрів, шийок колінчастого валу, підшипників, відкладення нагару в зоні поршневих кілець, на головці та днищі випускних вікон та каналів; виснаження масляної плівки дзеркала циліндра та ін.; одночасно з цим вони у складі випускних газів потрапляють у повітря, далі конденсуються та з опадами повертаються на водню та континентальну поверхню;

5) за високій температурі в камері згоряння азот, що міститься в паливі, починає інтенсивно взаємодіяти з киснем повітря. В результаті утворюються сильно-токсичні оксид NO та діоксид NO_2 азоту. Це призводить до нестачі кисню в камері згоряння, а отже, до неповного згоряння палива, втрати частини потужності двигуна, надлишку у випускних газах оксидів азоту. Викиди надмірної кількості оксидів азоту в атмосферу є причиною кислотних дощів, оскільки, потрапляючи до складу дощових крапель, вони осідають на поверхні води та ґрунту, отруюючи все живе;

6) вуглеводні C_nH_m ;

7) альдегіди;

8) незгорілий вуглець (сажа), що веде до димного випуску газів.

Таким чином, у випускних газах дизеля найбільш токсичними є оксиди вуглецю CO , азоту NO_x та сірки SO_x [3, 4].

Кількість шкідливих викидів випускних газів суднових енергетичних установок (СЕУ) залежить від наступних факторів:

1) забезпечення повноти згоряння палива;

2) якість сумішоутворення палива;

3) якість палива;

4) наявність присадок;

5) конструктивні особливості СЕУ;

6) температурний режим у циліндрі дизеля та його випускному колекторі;

7) режим експлуатації СЕУ [5, 6].

Вміст CO прямо пропорційно кількості палива, що спалюється, і знизити його можна або шляхом підвищення економічності двигуна, або збільшенням коефіцієнта надлишку повітря.

Вміст NO_x визначається кількістю азоту, що окислився в процесі згоряння, і залежить в основному від температури в камері згоряння.

Вміст SO_x знаходиться у прямій залежності від вмісту сірки у паливі. Тенденція використання на суднах дешевшого важкого палива з підвищеним

вмістом сірки призводить до збільшення вмісту SO_x у випускних газах двигуна та загострення ситуації з охороною довкілля. У зв'язку з цим відповідно до Додатку VI Міжнародної Конвенції щодо запобігання забрудненню з суден МАРПОЛ 73/78 вводяться обмеження на гранично допустимий вміст сірки в паливі, що спалюється в суднових дизелях (рис. 1.1). Особливо суворі вимоги висуваються до спеціальних екологічних районів. При цьому двигун повинен забезпечувати викид із випускними газами відповідно до співвідношення об'ємних концентрацій SO_x (млн^{-1} або ppm) і CO_2 (% за об'ємом), наведеному у таблиці 1.1.



Рис. 1.1. Максимальний середній вміст сірки в рідкому паливі, що постачається для використання на судах

Таблиця 1.1. Відповідність вмісту сірки у паливі співвідношенню SO_x/CO_2

Вміст сірки у паливі (% за масою)	Співвідношення викидів $SO_x(\text{млн}^{-1}$ або ppm) / CO_2 (% об'ємом)
3,5	151,7
1,5	65,0
1,0	43,3
0,5	21,7
0,1	4,3

В даний час існує два шляхи забезпечення вимог Конвенції МАРПОЛ73/78.

Перший полягає у повному переведенні роботи двигуна на малосірчисте (дизельне) паливо. Перевага полягає у зниженні енергетичних витрат на бункерування та паливopідготовку (підігрів) палива. Недолік: суттєве збільшення вартості палива.

Другий шлях – ефективне очищення випускних газів від SO_x . Перевага полягає в тому, що під час використання традиційного високосірчистого важкого палива можна вийти на рівень, що задовольняє вимоги Міжнародної Конвенції щодо запобігання забрудненню суден МАРПОЛ-73/78 (таблиця 1.1). Недолік: підвищення гідравлічного опору газопускного тракту внаслідок встановлення очисного обладнання. Для ДВЗ загальний опір випускного трубопроводу не повинен бути більшим за 4 кПа, включаючи опори утилізаційного котла (до 1,2 кПа), глушника шуму (до 0,1 кПа) та іскрогасника (до 0,1...0,4 кПа). Таким чином, максимальний допустимий опір очищувача газу (скрубера) має бути не більше ніж 1,3 кПа. За цією ознакою досить перспективними є очищувачі газу, що працюють за «мокрому» інерційному методу – судові скрубери, які мають опір 0,7...1,2 кПа.

Принцип дії «мокрих» методів очищення газів заснований на розчиненні та хімічній взаємодії токсичних компонентів випускних газів ДВЗ під час пропускання їх через воду. Перевагою способу є те, що очищувачі надійно працюють на змінних режимах, мають низьке енергоспоживання та пожежобезпечні. Після очищення воду, що використовується для обробки, можна видаляти за борт. Крім того, очищувач додатково виконує функції глушника шуму, «мокрого» іскрогасника та охолоджувача газів [7, 8].

Одним із варіантів зниження викидів SO_x є система очищення випускних газів головного двигуна (ГД) за рахунок їх промивання прісною або забортною водою, змішаною з каустичною содою NaOH. Схема системи представлена на рис. 1.2.

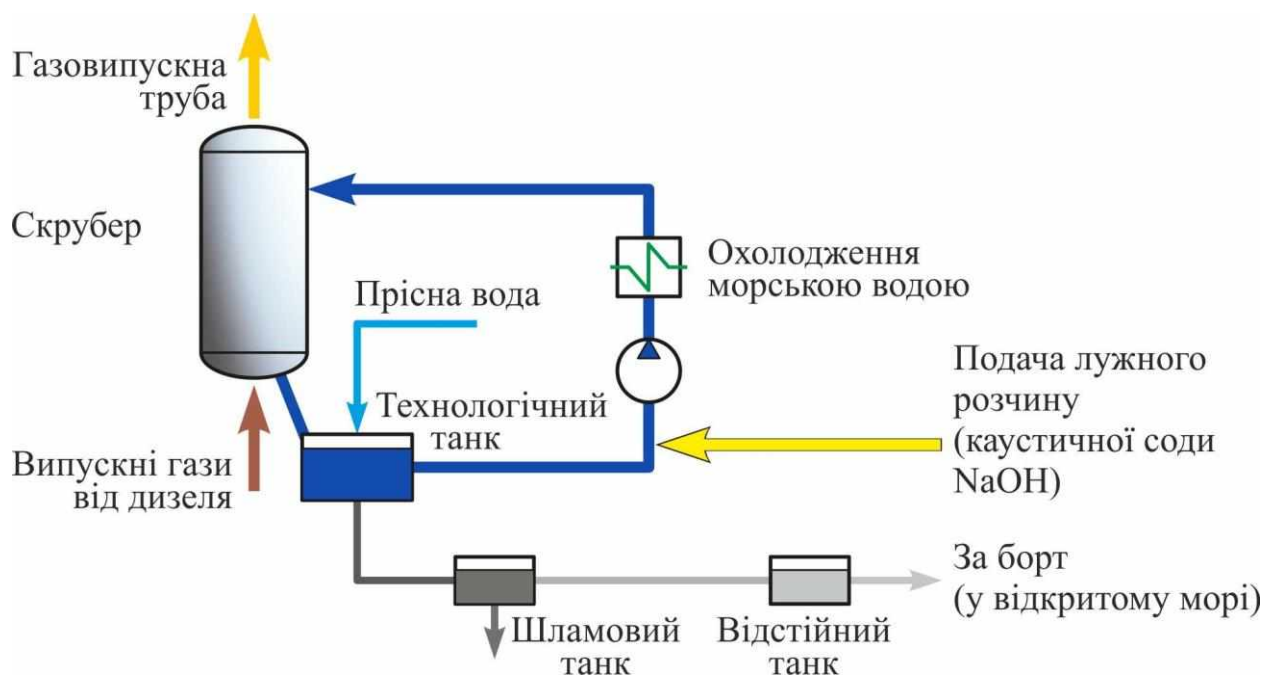


Рис. 1.2. Системи очистки випускних газів дизеля

Система включає скруббер, встановлений на випускній трубці після утилізаційного котла, і допоміжне обладнання, що обслуговує його. Незважаючи на досить великі габарити газоочисника та високу вартість, його термін окупності максимум 3 роки. При цьому система газоочищення дозволяє виконати вимоги Конвенції МАРПОЛ73/78 щодо вмісту токсичних викидів у випускних газах, оскільки очищувач дозволяє видалити понад 90 % SO_x та до 80 % твердих частинок. В результаті двигун, продовжуючи працювати на важкому паливі з високим вмістом сірки (до 3,5 % за масою). При цьому, після очищення випускних газів забезпечуватиметься співвідношення $SO_x/CO_2=4,3$, що відповідає вмісту сірки в 0,1 % за масою або $SO_x/CO_2=21,7$, що відповідає вмісту сірки в паливі 0,5 % за масою. Крім того, застосування газоочисника скасовує потребу в глушнику [9, 10].

1.2. Аналіз міжнародних конвенцій, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки морських суден щодо емісії оксидів сірки

Питанням екологічної безпеки мореплавання у комплексі проблем сучасного морського транспорту приділяється особлива увага. Найбільших збитків довкіллю завдається з боку суднової енергетичної установки, у результаті експлуатації якої утворюються такі шкідливі компоненти, як незгорілі вуглеводні, тверді частинки, оксиди азоту, парникові гази і, окремих випадках, сполуки сірки. У той час як на утворення ряду небезпечних компонентів, що містяться у випускних газах, можна впливати за рахунок спеціальної організації процесів в циліндрі двигуна, емісія сірковмісних компонентів цілком і повністю визначається вмістом сірки у паливі, що використовується. Як наслідок, вирішення проблем скорочення викидів SO_x потребує специфічних рішень. З 2020 р. набули чинності нові правила щодо обмеження до 0,5 % вмісту сірки у паливі, що використовується на судах. Нові вимоги діють у всіх міжнародних водах і торкаються інтересів судновласників понад 70 тис. суден. Принциповим питанням є те, що досягнення нормативних показників викидів SO_x може бути отримано в результаті використання спеціальних видів низькосірчистого палива або шляхом очищення ВГ в спеціальних периферійних пристроях (у випадку, коли ДВЗ експлуатується на традиційних високосірчистих сортах палива). Цієї проблеми присвячені матеріали міжнародних організацій: IMO (International Maritime Organization – Міжнародна морська організація), ICS (Міжнародна палата судноплавства – International Chamber of Shipping), ISO (Міжнародна організація зі стандартизації – International Standard Organization), класифікаційного товариства Det Norske Veritas та Germanischer Lloyd (DNV GL), у яких відображені останні нормативні зміни та заходи щодо забезпечення дотримання вимог до викидів сполук сірки, а також технологічні та ринкові

розробки для альтернативних рішень щодо проблеми скорочення викидів SO_x . Зазначені матеріали є актуалізацією більш ранньої публікації DNV GL «Global Sulfur Cap», виданої у жовтні 2016 р., і включають розширений розділ по скруберах [11, 12].

Діючі обмеження щодо викидів SO_x . Враховуючи те, що судові енергетичні установки є основними споживачами високосірчистих важких палив – High-Sulphur Fuel Oil (HSFO), для регулювання викидів SO_x IMO у 2015 р. було введено спеціальне поняття – зони контролю викидів сірки (Sulphur Emission Control Areas – SECA). Розташування SECA показано на рис. 1.3.

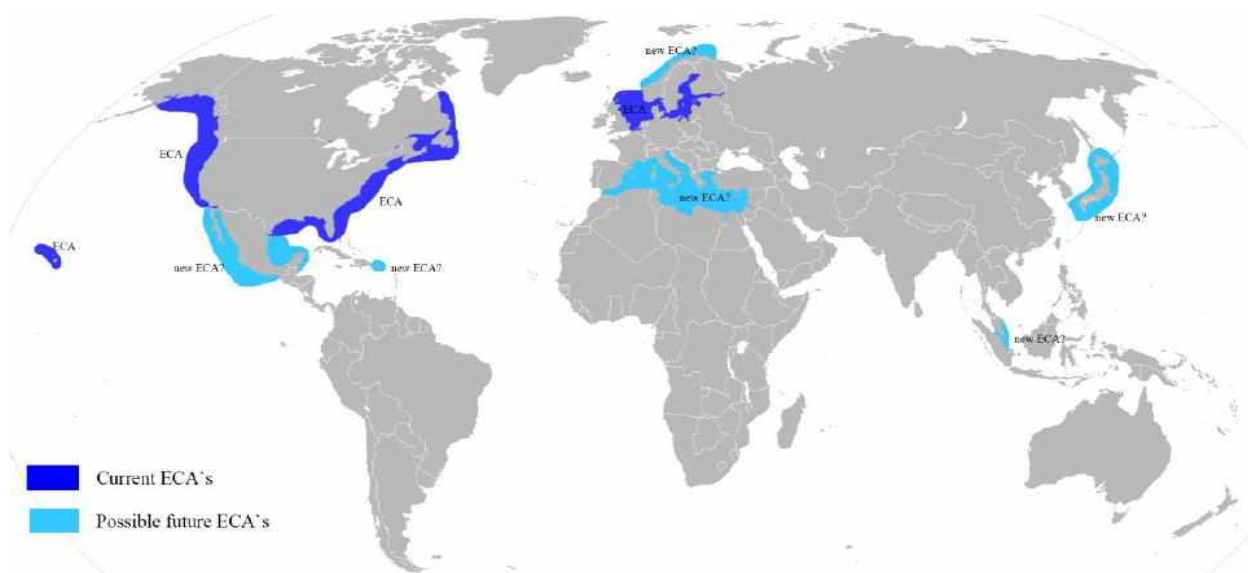


Рис. 1.3. Розміщення SECA

Після огляду допустимості застосування сумісного малосірчистого важкого палива IMO було ухвалено рішення, згідно з яким з 01.01.2020 р. глобальне обмеження вмісту сірки у паливі для всіх районів плавання становить 0,5 %. Ця вимога прийнята на додаток до обмежень 0,1 % сірки в районах спеціального екологічного контролю викидів сірки – SECAs. При цьому суднам, на енергетичних установках яких встановлені системи очищення випускних газів від сполук сірки, дозволено використання важкого палива HSFO (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2. Регіональні та глобальні регулятори сірки

Регіон	Максимально можливий вміст сірки у паливі	Можливість використання скрубєрів
Усі райони плавання у міжнародних водах	0,5 %	Так
Зони контролю SECA	0,1 %	Так
Євросоюз	0,1 % у всіх портових акваторіях	У деяких країнах обмежене використання відкритого циклу
Китай	0,5 % у національних водах у 12-мильній зоні	Так
Каліфорнія	0,1 %, у 24-мильній зоні узбережжя	Ні, тільки як виняток у разі окремої заявки та додаткових досліджень

Суттєвою поправкою до регулювання є «Угода про заборону перевезення HSFO у паливній системі», за винятком суден, обладнаних скрубєрами. Як і раніше, дозволено перевозити HSFO як вантаж, проте забороняється мати HSFO в резервуарах паливних систем у разі, якщо не використовуються скрубєри. Ця поправка дозволяє затримувати судна, що використовують невідповідне паливо, при проведенні державного контролю порту – Port State Control (PSC), без необхідності перевірки незалежно від того, було воно використане чи ні. Очікується, що такі виправлення дозволять значно знизити ймовірність порушення вимог екологічного законодавства у міжнародних водах. Як очевидно з таблиці 1.2, директива Європейського Союзу (ЄС) передбачає вміст сірки у паливі не більше 0,1 % для суден у портах ЄС. У деяких країнах ЄС в рамках директиви обмежується скидання скрубєрної води. Так, країни Бельгія та Німеччина заборонили скидання води зі скрубєрів у багатьох районах, що послужило обмеженням для роботи скрубєрів з відкритим циклом. Незважаючи на те,

що до цього часу в ЄС не існує загальноприйнятої концепції, інші країни ЄС можуть наслідувати цей приклад [13, 14].

Нині у Гонконгу діє обмеження утримання сірки 0,1 % для суден біля причалу. Наприкінці 2015 р. Китай опублікував правила для внутрішніх вимог SECA у морських районах за межами Гонконгу, Гуанчжоу, Шанхаю та в Бохайському морі. Китай розпочав поетапний підхід, спочатку обмежуючи максимальний вміст сірки в 0,5 % у паливі, яке спалюється в основних портах у цих районах. З 1 січня 2019 р. розширено географічне охоплення зоною контролю території у 12 морських миль вздовж усієї берегової лінії Китаю, крім того введено вимогу щодо вмісту сірки – 0,1 %.

Найбільш суворі вимоги були висунуті Каліфорнійською радою з повітряних ресурсів (Air Resources Board – ARB) та введено обмеження на використання палива із вмістом сірки в 0,1 % у межах 24 морських миль від узбережжя Каліфорнії. Регулювання не допускає будь-яких інших варіантів відповідності, крім використання малосірчистого палива (DMA або DMB). Використання скрубєрів допускається як тимчасове виключення, при цьому заявка на рух повинна бути відправлена до входу до води Каліфорнії. Після офіційного перегляду постанови законодавці Каліфорнії вирішили зберегти її як доповнення до загальних вимог SECA.

З 1.05.2025 р. запроваджено нові зони SECAs, якими визнали Арктичне узбережжя Канади, територіальні води Норвегії та Північне море.

Загалом існує загальна глобальна тенденція до посилення місцевих правил щодо запобігання забрудненню повітря.

Крім розглянутих зон контролю, посилення норм викидів SO_x відбувається в таких зонах, як Панамський канал, Тайбей (Тайвань) та інших місцевих муніципалітетах по всьому світу.

Правозастосування технічних регламентів. Джерелом забруднення довкілля сполуками сірки є суднові енергетичні установки. Причина викидів сірки полягає в присутності сірки у паливах, що використовуються механічними установками. ІМО працює над керівництвами та циркулярами,

спрямованими на полегшення переходу до нових вимог для судновласників та заохочення однакової практики PSC у всьому світі. Одним із керівних принципів є «Керівництво ІМО за планом впровадження судна з межею вмісту сірки 0,5 %», згідно з Додатком IV до МАРПОЛ (Ship Implementation Plan – SIP), призначене для більш легкої адаптації керуючих компаній до нових вимог щодо дотримання граничного рівня сірки в 0,5 % або визнаною організацією –Recognized Organization (класифікаційне суспільство). Тим не менш, PSC може брати до уваги запропоновані підготовчі дії при перевірці відповідності. У SIP включені рекомендації щодо впливу на механічні установки та процедури очищення резервуарів, а також розглянуті питання використання сумісного важкого палива та виявлення будь-яких ризиків безпеки, пов'язаних з використанням таких видів палива [15].

У разі відсутності можливості використання судном палива, що відповідає вимогам, ІМО пропонує звіт про недоступність використання важкого палива – Fuel Oil Non-Availability Report (FONAR), в якому мають бути зазначені заплановані відвідування портів та інша необхідна інформація. При цьому суду не зобов'язані відхилитися від запланованого маршруту, і паливо, що є на борту, може бути використане до наступного порту, де має бути придбано паливо відповідної якості.

Незважаючи на те, що держави прапора несуть відповідальність за дотримання вимог щодо запобігання забрудненню сіркою міжнародних вод, очікується, що правозастосування виконання залишиться насамперед питанням PSC. Для того, щоб перешкоджати порушенням правил у міжнародних водах, ІМО підтримує загальну заборону на перевезення HSFO у паливних системах, за винятком суден, обладнаних скруберами. Це дозволить PSC затримувати судна, що перевозять невідповідне паливо, без доказів того, що воно фактично використовувалося у внутрішніх або міжнародних водах.

Як попередня перевірка відповідності суден регламенту передбачається моніторинг викидів SO_x за допомогою дистанційних датчиків. Такі датчики,

або так звані сніфери, встановлені на літаках або закріплені на мостах або входах у гавань, можуть вказувати на підставі аналізу вихлопного шлейфу при проходженні судна на використання відповідного палива. Ці дії спрямовані на те, щоб ідентифікувати судна, які повинні бути піддані подальшій інспекції PSC. Слід зазначити, що такий моніторинг неспроможний замінити бортовий відбір проб палива, оскільки служби PSC юридично мають покладатися лише з аналіз фізичних зразків палива. Під час бортової інспекції PSC повинен займатися пошуком доказів відповідності важкого палива, доставленого або використовуваного на борту судна, бункерної накладної та книги, що фіксує запас нафтопродуктів, а також докази письмового порядку та записів про будь-яку зміну виду палива.

Одночасно з боку ІМО розроблено вимогу щодо призначення точки відбору проб палива, що використовується – а Requirement for a Designated Sampling Point for in-use Fuel. Мета документа полягає в тому, щоб дати можливість компетентним органам (наприклад, PSC) приймати репрезентативні зразки палива, що використовується. З 2021 р. на етапах первинного контролю при поновленні сертифікації до існуючих суден застосовується вимога IAPP (International Air Pollution Prevention – Міжнародне обстеження щодо запобігання забрудненню повітря). При цьому судна, обладнані паливними системами з низькою температурою спалаху, будуть звільнені від цієї процедури.

Наразі не сформовано загальних вимог до єдиних штрафних санкцій за недотримання норм щодо викидів SO_x , тому санкції визначаються індивідуально кожним PSC. Незважаючи на те, що штрафи за порушення вимог суттєво відрізнятимуться між державами порту, очікується, що зазначена заборона на перевезення HSFO стане вагомим фактором для дотримання нових екологічних вимог. Можливо також, що, крім штрафних санкцій, суди будуть зобов'язані вивантажувати паливо, що не відповідає вимогам. Таким чином, правозастосування поки що залишатиметься

нерівномірним у всьому світі, оскільки ресурси служб PSC, їх можливості та історичний досвід правозастосування значно різняться [16].

Вибір стратегії відповідності технічним регламентам. Враховуючи, що час на підготовку та реалізацію заходів, що забезпечують перехід до нових екологічних вимог, обмежений, судновласники мають обрати свою стратегію відповідності, проаналізувати та вибрати можливі варіанти. Універсальних рішень проблеми не існує, і найкращий варіант значною мірою залежить від типу судна, його розміру, експлуатаційних характеристик і того, які види палива доступні в короткі та тривалі терміни.

Для варіантів, що вимагають модифікації, важливо враховувати складність установки, інтенсивність та ефективність експлуатації, а також термін експлуатації судна, що залишився. Ускладнюючим фактором при розгляді варіантів відповідності є регіональні та місцеві правила, які в деяких випадках передбачають суворіші вимоги, а в інших – заборона деяких варіантів відповідності [17].

1.3. Варіанти досягнення відповідності вимогам щодо контролю та обмеження викидів сірковмісних продуктів

Використання морського газойлю чи дистилатів. Перехід на дистилатне або MGO (Marine Gas Oil) паливо означатиме значне збільшення витрат за статтею паливно-мастильних матеріалів, а також може вимагати модернізацію енергетичної установки в частині паливопідготовки через значно нижчу в'язкість палива. Паливні танки, які раніше використовуються для HSFO, повинні бути ретельно очищені до бункерування MGO, щоб уникнути проблем забруднення і, як наслідок, порушення вимог. Основна проблема використання MGO або дистилатів пов'язана з їхньою доступністю та вартістю на ринку палива. Багато аналітиків вважають, що в перші кілька

місяців після впровадження нових вимог різниця цін між HSFO та дистиллятами буде дуже високою, що значно збільшить вартість палива та зробить альтернативні варіанти фінансово привабливими. Недоліки та переваги використання дистиллятів наведено у таблиці 1.3 [15].

Таблиця 1.3. Порівняння результатів використання морського газойлю чи дистиллятів

Дистиллятні палива	
Переваги	Недоліки
Використовується для більшості конфігурацій двигунів	Вища вартість палива. Може створити робочі проблеми через низьку в'язкість палива

Використання палива з низьким вмістом сірки. Очікується, що паливні суміші з низьким вмістом сірки будуть доступні на ринку у вигляді різних продуктів. Однак установки для десульфурації дуже дорогі, а їх монтаж, впровадження та налагодження можуть зайняти кілька років до того, як вони почнуть функціонувати з повною продуктивністю. Таким чином, більшість нафтопереробних заводів вважають за краще переробляти високосортні види палива, а не інвестувати в системи десульфурації. Можна вважати, що для задоволення попиту виготовлять нові паливні суміші, які відповідатимуть потрібній межі вмісту сірки менше 0,5 %, при зниженні вартості на 10...15 % порівняно з прямими видами палива. Перші зразки палива були представлені наприкінці 2018 р. Цілком ймовірно, що під час використання нових паливних сумішей виникнуть проблеми сумісності і це зробить технологічну підготовку палива дуже важливим процесом для безпечної експлуатації агрегатів енергетичної установки.

Інші проблеми, пов'язані з видом палива, що розглядається, включають довготривалу стабільність, вплив на каталізатори і відносно низьку температуру спалаху. Велике значення набуває контроль якості під час бункерування, необхідний для того, щоб забезпечити отримання палива

відповідно до специфікації. Проте чинний стандарт палива ISO 82171 не охоплює всі аспекти безпеки, пов'язані з новими паливними сумішами. Шосте видання цього стандарту, опубліковане в березні 2017 р., не призначене та не може вирішити всі питання, що виникають у зв'язку з впровадженням на ринок менш традиційних видів суднового палива з максимальною 0,1 % сіркою для експлуатації в районах ЕСА.

Технічний комітет, що займається розглядом та оновленням стандарту ISO 8217 на морське паливо, а також ISO 8216 («Класифікація морського палива»), приступив до розгляду питання про наступний перегляд у розрахунку на обмеження граничного вмісту сірки 0,5 % у 2020 р.

У відповідь на запит ІМО про забезпечення узгодженості між діючими стандартами ISO з морських палив та впровадженням межі вмісту сірки в паливі до 0,5 % Технічний комітет ISO 8217 (ISO TC28/SC4/WG6) у 2019р. прийняв загальнодоступну специфікацію PAS «Міркування щодо постачальників палива та користувачів щодо якості морського палива з урахуванням максимального вмісту сірки до 0,5 % у 2020 р.». PAS містить інструкції (як постачальників палива, так і для судновласників) забезпечення вимог 2020 р.

В даний час ISO 8217 розділений на сорти MD (Distillate Marine Fuel – суднове дистилатне паливо), DF (Distillate FAME – Fatty Acid Methyl Esters – дистилатне паливо на основі метилових ефірів жирних кислот) та RM (Residual Marine – паливо для суднових установок). Є деякі види палива, що задовольняють граничному рівню вмісту сірки 0,1 %, які не входять до категорії дистилатів і, як правило, продаються за залишковими морськими специфікаціями ISO 8217 (марки RM).

Найбільш нагальні проблеми, пов'язані з якістю сумішей із граничним вмістом сірки 0,5 % пов'язані зі стабільністю та сумісністю різних продуктів. Через це слід розробити нові методи випробувань для більш точної оцінки стабільності та сумісності палива. Особливості та результати використання сумісних низькосірчистих палив наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Переваги та недоліки палив з низьким вмістом сірки

Палива з низьким вмістом сірки	
Переваги	Недоліки
Використовується більшість конфігурацій двигунів	Невідома вартість палива. Невизначена доступність. Може створювати операційні проблеми через відмінність фізико-хімічних характеристик чи несумісності

Використання палив з високим вмістом сірки (до 3,5 % класу HSFO) з додатковим очищення випускних газів у скрубери SO_x. Застосування HSFO, як і раніше, можливе. Однак для відповідності нормам потрібне впровадження в конструкцію газовипускних трактів енергетичної установки пристроїв з технологією очищення випускних газів, широко відомих як скрубери SO_x.

Установка скруберів не вимагає жодних змін у конструкції двигунів енергетичної установки або систем паливопідготовки та паливоподачі. Проте загалом така модернізація силової енергетичної установки може виявитися досить складною та дорогою, оскільки існує значна інвестиційна вартість установки обладнання, яка сумуватиметься з експлуатаційними витратами, пов'язаними зі збільшенням споживання енергії, можливою потребою у хімічних витратних матеріалах, а також із витратами на обробку осаду. Одне з ключових питань полягає в тому, чи зможуть виробники скруберів та інші постачальники пов'язаного з цими системами обладнання забезпечити можливість виробництва та монтажу достатньої кількості таких систем на судах. У довгостроковій перспективі, якщо різниця в ціні між високо- та низькосірчистим паливом виявиться досить високою, а досвід експлуатації та технічного обслуговування доведе доцільність використання цих систем, то скрубери можуть стати широко поширеною технологією. Основні переваги та недоліки технології представлені в таблиці 1.5, більш детальна інформація про технології скруберів SO_x наведена у наступних розділах [16].

Таблиця 1.5. Технологія скрубберів SO_x

Важке паливо з високим вмістом сірки (до 3,5 % класу HSFO) разом зі скруббером SO _x	
Переваги	Недоліки
Може використовувати стандартний HSFO. Можливе переоснащення. Зменшує вміст твердих частинок, а також SO _x . Привабливий бізнес-проект для певних типів суден.	Значні початкові інвестиції (2...10 млн. дол.). 3-5% штрафу за паливо. Можливі додаткові витрати на хімікати. Необхідна інтеграція у систему управління. Потрібний моніторинг.

Зріджений природний газ (Liquified Natural Gas – LNG) як паливо.

Цілком очевидним є той факт, що використання LNG як основне паливо отримує нові переваги у світлі нових обмежень ІМО щодо викидів сірки. LNG як суднове паливо є технічно обґрунтованим рішенням, а бункеровочна інфраструктура швидко розвивається по всьому світу.

Традиційні нафтові палива залишатимуться основним видом палива для більшості існуючих суден у найближчому майбутньому, проте комерційні можливості LNG перспективні головним чином нових проектів суден, але у деяких випадках також цікаві й у проектів конверсії і модернізації. При цьому переведення енергетичної установки на LNG слід проводити лише на основі ретельного аналізу різнобічної інформації [18].

Крім комерційних аспектів, основним аргументом на користь вибору LNG як заміну звичайних нафтових палив є суттєве скорочення загального забруднення повітря від викидів як SO_x, а й NO_x, і навіть викидів твердих частинок (Particulate Matter – PM). Повне усунення викидів SO_x і PM – потенційна можливість скорочення викидів NO_x до 85 % – сприяє використанню LNG особливо у зонах контролю. Крім того, LNG може знизити викиди парникових газів на 10...20 % залежно від технології двигуна. Таким чином, використання LNG виявляє безліч переваг як для

здоров'я людини, так і для збереження довкілля. Крім того, воно також позитивно впливає на коефіцієнт енергоефективності судна (Energy Efficiency Design Index – EEDI).

Сьогодні двигуни, які здатні використовувати газоподібне паливо, охоплюють широкий діапазон потужності. Таким чином, газові двигуни, а також двопаливні чотиритактні та двотактні двигуни (газодизелі) підходять практично для всіх типів суден. Переваги та недоліки використання LNG наведені у таблиця 1.6.

Таблиця 1.6. Переваги та недоліки використання LNG

LNG як палива	
Переваги	Недоліки
Має добрі екологічні показники. Може досягати вимог до рівня NO _x Tier III. Позитивний вплив на EEDI.	Високі інвестиційні витрати (3...30 млн. дол. Дороге дооснащення/модернізація. Великі регіональні різницю за цінами LNG. Можливість появи у випускних газах метану. Потрібно місце та умови для зберігання. Деякі типи двигунів потребують додаткових засобів для досягнення рівня NO _x Tier III. Вибухонебезпечний.

Використання альтернативних видів палива. Існує безліч нових видів палива, які також можуть розглядатися як варіанти відповідності вимогам щодо глобального обмеження викидів сірки. Найбільш поширеними є метанол, різні види біопалива та зріджений газ – пропан-бутанові суміші – Liquefied Petroleum Gas (LPG). Вважається, що зазначені види палив дуже мало впливають на світовий ринок, але вони можуть розглядатися як альтернативні варіанти у випадках, коли їх постачання легко можна здійснити [19].

В даний час існує кілька суден, що працюють на метанолі як основне паливо, і кілька газозовів зрідженого газу, які використовують LPG як

паливо. Проте для переходу на ці види палива (крім деяких видів біопалива) знадобиться адаптація двигунів, а також створення специфічних паливних систем та систем управління. Для невеликих суден з малою дальністю плавання технічно здійсненним рішенням є двигуни або паливні елементи, що працюють на водні, і можна розглядати електроаккумуляторні системи. Такі енергетичні установки вже знаходяться в експлуатації та забезпечують переваги операцій із нульовим рівнем викидів. Наприклад, в експлуатації вже знаходяться поромі з батарейним живленням, а парові поромі з водневим двигуном планується збудувати в найближчі роки в Норвегії, Шотландії та Каліфорнії [15].

1.4. Висновки за розділом 1

1. Виконаний аналіз технологічних рішень щодо зменшення емісії оксидів сірки SO_x з випускними газами суднових дизелів свідчить про актуальність цієї проблеми для суден морського та внутрішнього водного транспорту.

2. Особливу актуальність проблема зменшення емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів набувають під час знаходження суден у районах спеціального екологічного контролю SECAs/

3. Одним з варіантів розв'язання цієї проблеми є використання скрубберного очищення випускних газів від оксидів сірки SO_x , проте багатоспрямованість схем та принципів його експлуатації, а також широкий спектр управління параметрами цих систем завжди залишає можливість визначення їх найбільш раціональних режимів роботи.

2. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальна концепція наукових досліджень, пов'язаних з екологічною ефективністю морських засобів транспорту

У контексті технічного регламенту екологічна ефективність, як і будь-яка інша, могла розумітися як відношення корисного ефекту (в даному випадку природоохоронного) до витрачених на виробництво цього ефекту ресурсів, виражених у тих самих одиницях виміру, що й корисний ефект. Враховуючи специфіку питання, можна подати також екологічну ефективність як відношення природоохоронного ефекту до ефекту забруднення навколишнього середовища в тому випадку, якби заходи щодо запобігання її забруднення не були вжиті.

Будь-яке із зазначених уявлень про екологічну ефективність дозволяє зробити висновок про те, що кількісна міра екологічної ефективності є безрозмірним параметром, значення якого менше одиниці, але прагне до неї, або при множенні на 100 % бути виражений у відсотках (бути менше 100 %, але прагнути цієї межі). Вимір корисного природоохоронного ефекту і навіть визначення цього поняття досить важко. Природоохоронний ефект внаслідок застосування обладнання та засобів попередження забруднення довілля з судна може бути виражений у будь-яких умовних або вже використовуваних одиницях забруднення довілля. Однак усе ускладнюється ще й тим, що різні відходи (забруднення) мають різну фізичну природу та їх кількісні заходи мають різні одиниці виміру. Тому необхідно представляти екологічну ефективність як ймовірність запобігання можливого шкідливому впливу на довілля з боку життєдіяльності людей на судні та неминучих при експлуатації технічних засобів та обладнання втрат робочих середовищ та продуктів неповного згоряння палива. У цьому випадку показник екологічної ефективності також повинен бути описаний у зазначених числових межах.

Таким чином, якщо розраховане значення показника екологічної ефективності виявиться близьким до одиниці (до 100 %), наприклад, 0,95 (або 95 %), то ймовірність запобігання шкідливому впливу судна на довкілля буде вважатися високою, а якщо близьким до нуля, наприклад, 0,1...0,2 (що відповідає 10...20 %) – низькою. Відповідно до раніше наведених обґрунтувань екологічна ефективність як поняття покликана оцінювати ймовірність запобігання можливому шкідливому впливу на довкілля життєдіяльності людей на судні, а також негативного неминучого впливу при експлуатації технічних засобів та обладнання втрат робочих середовищ та продуктів неповного згоряння палива. Кількісна міра екологічної ефективності, а саме показник екологічної ефективності, має бути безрозмірним або відсотковим заходом запобігання шкоди, що завдається навколишньому середовищу зазначеними вище відходами та забрудненнями. До таких відходів відносяться нафтовмісні (ляльні) води, стічні (сточно-фанові) води, сміття, викиди в атмосферу шкідливих речовин з випускними газами, шум. Чим більше показник екологічної ефективності наближається до одиниці, тобто до 100 %, тим більше запобігає шкоди, яка могла би бути завдана судном довкіллю.

Визначення показника екологічної ефективності суден, безумовно, слід зарахувати до складних завдань, оскільки подібні завдання зазвичай пов'язані з математичним описом складних явищ, ситуацій чи об'єктів. В даному випадку доцільно розглядати показник екологічної ефективності не як явище або ситуацію, а як модель запобігання забрудненню, яку можна вважати складним об'єктом, оскільки вона може бути скомпонована з декількох складових частин, що характеризують різні сторони процесу, що описується. Умовно можна припустити, що ці частини перебувають у відносинах взаємозв'язку та підпорядкування. Тоді модель опису запобігання забрудненню можна вважати об'єктом із розподіленою структурою [12].

2.2. Основні етапи математичного моделювання процесу попередження забруднення довкілля

Труднощі створення моделі, тобто математичного опису процесів запобігання забрудненню довкілля різної фізичної природи, можна подолати за допомогою методів дослідження операцій, які виявляються ефективними у випадках, коли використання традиційних математичних методів не дає потрібного результату [20].

Якщо уявити створювану модель запобігання забрудненню об'єктом з розподіленою структурою у вигляді системи, що задовольняє набору певних ознак, то для вирішення сформульованої раніше завдання може бути використаний науковий метод, який отримав назву системного підходу, що є однією з форм методологічного знання, пов'язану з дослідженням та створенням об'єктів як систем. Системні принципи знайшли широке застосування у різних сферах теоретичної думки. Опубліковано значну кількість робіт, в яких виконано дослідження ролі та місця системного підходу в ряді інших методологічних концепцій: встановлюються особливості та напрямки практичної реалізації системного підходу, розглядаються математичні методи та апарат, рівні вивчення систем тощо. Проте вичерпну характеристику цих питань дати ще складно. Можна лише розраховувати на деяку повноту висвітлення тих сторін.

Одним із принципів системного підходу є принцип ієрархічності пізнання, що вимагає трирівневого вивчення предмета:

1-й рівень – вивчення самого предмета - власний рівень;

2-й рівень – вивчення цього предмета як елемента ширшої системи – «вищий» рівень;

3-й рівень – вивчення цього предмета у співвідношенні зі складовими даний предмет компонентами – «нижчий» рівень.

Ще один принцип – принцип інтеграції – відображає особливість системного підходу, що полягає в тому, що він спрямований на вивчення інтеграційних властивостей і закономірностей систем і комплексів систем, розкриття базисних механізмів інтеграції цілого. І, нарешті, принцип формалізації показує, що системний підхід спрямовано отримання кількісних характеристик, створення методів, що звужують неоднозначність понять, визначень, оцінок тощо.

2.3. Системний підхід під час дослідження екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту

Розглянемо тепер ознаки «системності» та оцінимо можливість задоволення цим ознаками об'єкта «модель запобігання забрудненню», що зазвичай представляється у вигляді системи. До характерних ознак систем, яких можна застосувати системний підхід, ставляться такі:

1) наявність певної кількості взаємозалежних між собою підсистем (складових частин системи). Розчленування системи на підсистеми (декомпозиція) нині важко піддається формалізації і найчастіше носить евристичний характер, що залежить від цілей дослідження складної системи. Виділення підсистем часто виробляють за функціональними ознаками, вважаючи у своїй, що самостійне існування підсистем неможливо (випускні гази двигунів, наприклад, що неспроможні самостійно утворюватися і існувати). Можлива також класифікація підсистем за видами об'єктів управління, що входять до складу складної системи (іноді підсистем ставлять у відповідність завдання, вирішення яких необхідно здійснити для виконання основного завдання, поставленого перед складною системою, що створюється). У зв'язку з цим слід зазначити, що розбиття складної системи на підсистеми доцільно виконувати таким чином, щоб вони були самостійно

функціонуючі частини системи, що вирішують свої завдання, але при цьому враховувалася роль підсистем у всій системі;

2) багатомірність системи, що обумовлюється наявністю великої кількості зв'язків між підсистемами;

3) багатокритеріальність, що обумовлюється різноманітністю цілей окремих підсистем, що входять до складної системи, а також різноманітністю вимог, що висуваються до досліджуваної системи з боку інших систем;

4) властивості системи не вичерпуються властивостями окремих підсистем (синергетичний ефект), навпаки, система має властивості, які притаманні підсистемам, і може бути утворені простим підсумовуванням властивостей підсистем, а формуються завдяки обліку взаємодії між окремими частинами системи;

5) різноманітність природи підсистем, що характеризується їх різною фізичною сутністю [21].

Таким чином, складність системи, до якої можна застосувати системний підхід, характеризується не просто збільшенням розмірності, а й багатокритеріальністю, ієрархічності структури, наявністю підсистем різного виду, функціонування яких підпорядковане досягненню єдиної мети для всієї системи в цілому. Однак можна констатувати, що складові частини системи «екологічна ефективність судна»: екологічна ефективність по нафтовмісних водах, по стічних водах, по сміттю, по викидам в атмосферу твердих частинок, оксидів азоту NO_x , оксидів сірки SO_x , оксиду вуглецю CO , сумарних вуглеводнів CH , парникового газу підсистем складної системи) і в цьому випадку (при правильному структуруванні системи) вони задовольнятимуть усім п'яти зазначеним вище ознакам [22].

З урахуванням системного підходу розроблена технологічна карта наукового дослідження, що надана на рис. 2.1.

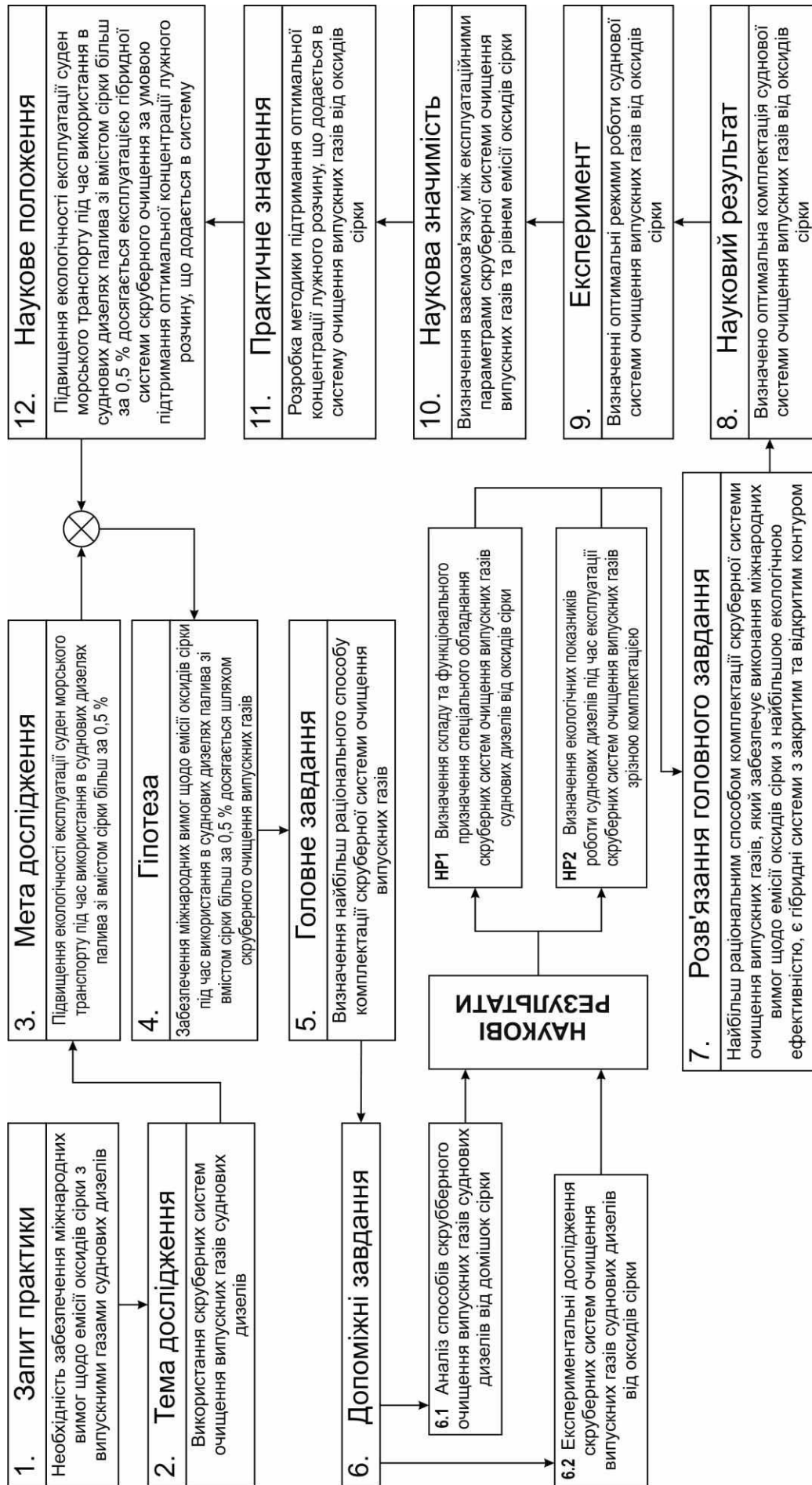


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

2.4. Висновки за розділом 2

Як об'єкт дослідження визначено процес забезпечення екологічних показників суднового дизеля.

Як предмет дослідження обрано процес управління емісією оксидів сірки з випускними газами судових дизелів.

Спираючись на принципи системного підходу розроблена технологічна карта наукового дослідження.

3. АНАЛІЗ СПОСОБІВ СКРУБЕРНОГО ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ВІД ДОМІШОК СІРКИ

3.1. Загальні принципи забезпечення очищення випускних газів

Використання технології скрубєрів у складі суднових енергетичних установок набуло поширення з моменту впровадження зон SECA в Європі та в Північній Америці в 2015 р. Видалення викидів SO_x з випускних газів до або нижче граничних значень викидів, передбачених у МЕРС.259(68) вважається повним еквівалентом вимог, зазначених у регламенті 4 Додатка VI до MARPOL.

Застосування скрубєрів призводить до істотного збільшення робочого навантаження екіпажу, вимагаючи зусиль з експлуатації та технічного обслуговування і водночас є вагомою альтернативою для використання малосірчистих палив. При цьому слід зазначити, що рішення щодо встановлення скрубєра в основному зумовлені привабливими термінами окупності. Скрубєри нейтралізують сірку у випускних газах абсорбентом, в якості якого можуть використовуватися різні поглиначі. Тому технології нейтралізації зазвичай класифікуються як «мокрі» або «сухі» системи [23].

«Мокрі» системи, що використовують морську воду як поглинач, відомі як скрубєри з відкритим циклом (Open-Loop), на сьогоднішній день є найбільш використовуваною і затребуваною конструкцією. Більшість постачальників також пропонують замкнуті та гібридні системи з використанням каустичної соди або гідроксиду магнію як абсорбент (таблиця 3.1). «Сухі» системи використовують реагенти в сухій формі, наприклад, вапно. «Сухі» системи можуть складатися з нерухомого або псевдозрідженого шару, що сприяє встановленню повнішого контакту між газоподібною та твердою фазами. У такій конструкції, можливо, буде потрібна додаткова установка фільтрів для видалення твердих частинок з оброблених у скрубєрі газів [24, 25].

Таблиця 3.1. Реагенти скрубєрів із замкнутим циклом

Мокрий / вологий адсорбер	Сухий адсорбер
Морська вода	Вапно
Каустична сода	–
Гідроксид магнію	–

Скрубєри повинні відповідати вимогам обмеження викидів шкідливих речовин як в атмосферу, так і зі скрубєрною водою, що бере участь в очищенні газів, що відпрацювали. Посібники ІМО для систем очищення вихлопних газів МЕРС.259 (68) пропонують дві можливості для сертифікації систем:

схема А пропонує можливість схвалити окремі системи, серії аналогічних систем або асортимент продукції (аналогічні конструкції з різною ємністю) та продемонструвати відповідність за допомогою безперервного моніторингу експлуатаційних параметрів та вибіркового перевірок викидів [26, 27];

для схеми В відповідність дотримується за допомогою безперервних вимірів викиди та перевірки параметрів [28, 29].

Способи сертифікації за схемою А вимагають великих повномасштабних випробувань викидів за умов тривалої експлуатації. Більшість систем, встановлених досі, дотримуються схеми В, вимагаючи безперервних вимірів викидів SO₂, CO₂ та якості води для очищення (рис. 3.1). Моніторинг якості води для очищення включає безперервні вимірювання рН, поліциклічних ароматичних вуглеводнів (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – ПАН) та каламутності (одиниці вимірювання мутності FNU – Formazine Nephelometric Unit або NTU – Nephelometric Turbidity Unit) [30, 31].

Якість палива під час контролю викидів SO₂ в атмосферу оцінюється значеннями відношення SO₂ у випускних газах, вираженого в ppm (Parts Per Million), до викиду CO₂ в об'ємних відсотках, як це показано на рис. 3.1.

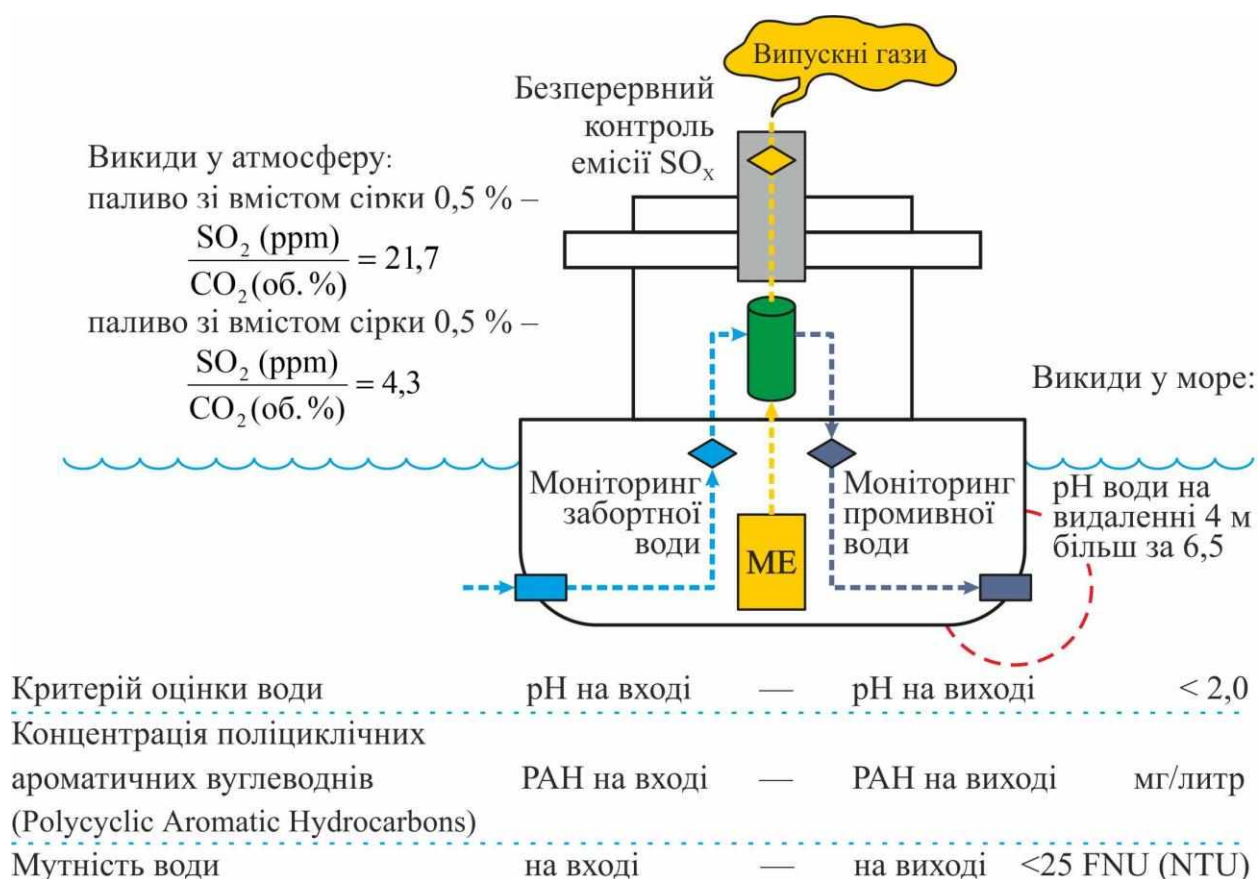


Рис. 3.1. Загальна структура моніторингу емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів

Контрольні значення зазначеного співвідношення можуть бути критеріями якості очищення випускних газів у скрубєрі при використанні HSFO. Аналіз та вимоги до викидів у забортну воду забезпечуються на основі різниці вимірювань показників рН забортної води та води на виході зі скрубєра у чотириметровій зоні навколо зливної труби [32, 33].

Аналогічно виконується контроль каламутності води та вмісту поліциклічних ароматичних вуглеводнів, при цьому зміна РАН не повинна перевищувати 50 мг/л, а мутність води не повинна збільшуватися більш ніж на 25 FNU або NTU (1 FNU = 1 NTU). Крім того, промивна вода скрубєра повинна бути проаналізована на вміст нітратів при введенні в експлуатацію та кожному повторному обстеженні.

З метою формування більш повного уявлення про технічні можливості концепції технології очищення газів, що відпрацювали, від сполук сірки розглянемо можливі варіанти конструкцій таких систем і пристроїв.

3.2. Системи із відкритим контуром (циклом)

Дані системи є найпростішими за конструкцією та дешевими в частині монтажу та експлуатації. Для нейтралізації сірки у випускних газах системи використовують природну лужність морської води. Ці системи можуть задовольняти вимоги споживання палива з вмістом сірки від 0,5 до 0,1 % і використовуватися у всіх морських регіонах з достатньою лужністю морської води, за винятком випадків, коли існують обмеження на скидання скрубберної води [34, 35].

Концепція скруббера з відкритим контуром показано на рис. 3.2.

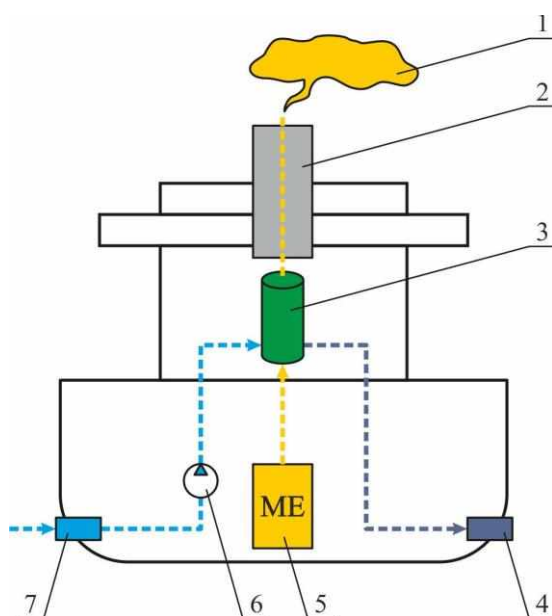


Рис. 3.2. Скруббер із відкритим контуром:

- 1 – випускні гази; бортовий кінгстон; 2 – глушник; 3 – скруббер; 4 – зливна труба; 5 – головний двигун ME (Main Engine); 6 – насос заборотної води; 7 – бортовий кінгстон

У відкритій системі великі обсяги морської води закачуються в скрубберну вежу, яка призначена для забезпечення достатнього часу утримання випускних газів. Розпилювальні сопла розпилюють забортну морську воду для максимальної нейтралізації кислих газів обсягом скрубберу. Вода після очищення випускних газів зливається з дна скрубберної вежі і виводиться за межі корпусу судна через зливні труби. Деякі системи з відкритим контуром можуть включати конструкцію обладнання для очищення води, що пройшла через скруббер. Переваги та недоліки конструкції скруббера з відкритим циклом представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Переваги та недоліки скруббера з відкритим циклом

Скруббер із відкритим контуром	
Переваги	Недоліки
Простота конструкції (нижча вартість). Використовує морську воду безпосередньо з моря, не потрібні ніякі небезпечні хімікати.	Не допускається у деяких портах та зонах. Не підходить для солонуватої та прісної води. Для відповідності вимогам води за рН в США потрібен насос, що «розбавляє».

3.3. Замкнені / гібридні системи

Система із замкнутим контуром, схема якої показана на рис. 3.3 забезпечує можливість роботи скруббера в зонах з обмеженнями на випуск промивної води або з низькою лужністю морською водою [36, 37].

У замкнутій системі технологічна вода циркулює із бака технологічної води через вежу і назад у резервуар. Технологічну воду охолоджують у теплообміннику зменшення випаровування. Технічна вода судна додається в технологічну воду для компенсації випаровування води, в той час як луг

додається для підтримки лужності. Деяка частина технологічної води зливається та обробляється за допомогою центрифуг чи хімікатів. Оброблена технологічна вода переноситься в накопичувальний резервуар і вивантажується, коли це дозволено, а осад переноситься в резервуар для осаду [38, 39].

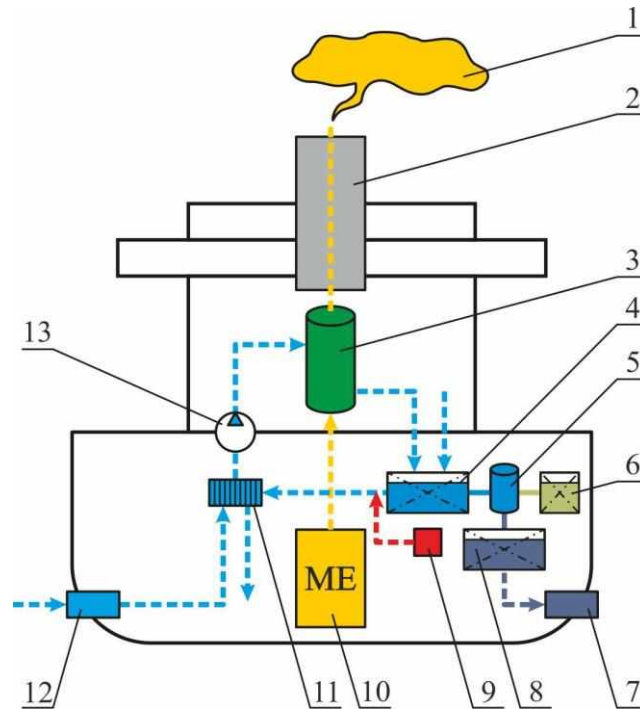


Рис. 3.3. Скрубер із замкнутим контуром:

- 1 – – випускні гази; 2 – глушник; 3 – скруббер; 4 – технологічний танк;
- 5 – очищувач скрубберної води; 6 – танк збору осаду (шламовий танк);
- 7 – зливна труба; 8 – накопичувальний танк; 9 – танк з лужним розчином (каустичної соди NaOH); 10 – головний двигун ME (Main Engine);
- 11 – теплообмінний апарат; 12 – бортовий кінгстон; теплообмінний апарат;
- 13 – циркуляційний насос заборотної води

Деякі системи можуть працювати як по відкритому, так і замкнутому циклу і називаються гібридними скруберами, що забезпечує підвищену гнучкість при роботі у всіх областях незалежно від лужності морської води або правил, що обмежують використання скрубберів з відкритим циклом [40].

Опис переваг та недоліків гібридних та скрубберів із замкнутим циклом наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Недоліки та переваги гібридних та скрубберів із замкнутим циклом

Скруббер із замкнутим контуром	
Переваги	Недоліки
Підвищена гнучкість в експлуатації. Може працювати у всіх областях, незалежно від лужності чи температури морської води.	Підвищена складність конструкції (вищі витрати). Потрібна постійна подача лужного середовища (NaOH є небезпечним та потребує спеціальної обробки).

3.4. Типи одноканальних та багатоканальних скрубберів

Крім розглянутих конструктивних особливостей систем очищення випускних газів від оксидів сірки, можна виділити ще одну особливість компонування, яка розділяє скрубери на одно-і багатоканальні [41, 42]. У тому випадку, якщо скруббер здійснює очищення випускних газів від одного двигуна і має тільки один вхід, він є одноканальним (рис. 3.4).

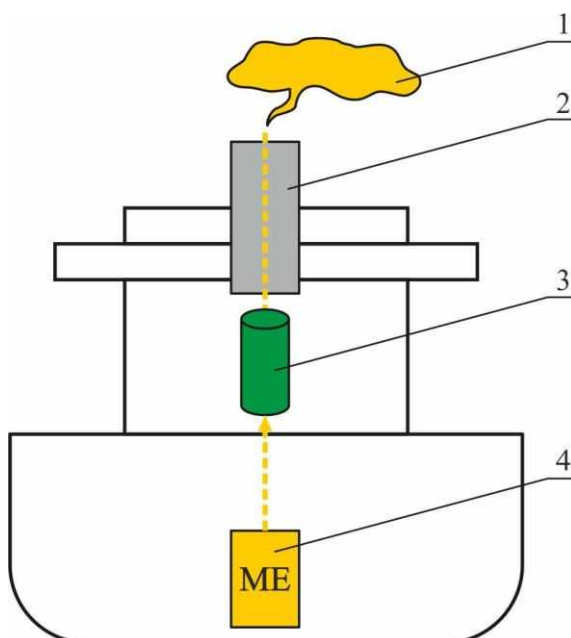


Рис. 3.4. Одноканальна система скруббера:

1 – випускні газы; 2 – глушник; 3 – скруббер; 4 – головний двигун ME (Main Engine)

У тих випадках, коли одним скруббером проводиться обробка газів від декількох двигунів, включених до складу суднової енергетичної установки, скруббер повинен мати кілька входів і вважається багатоканальним (рис. 3.5).

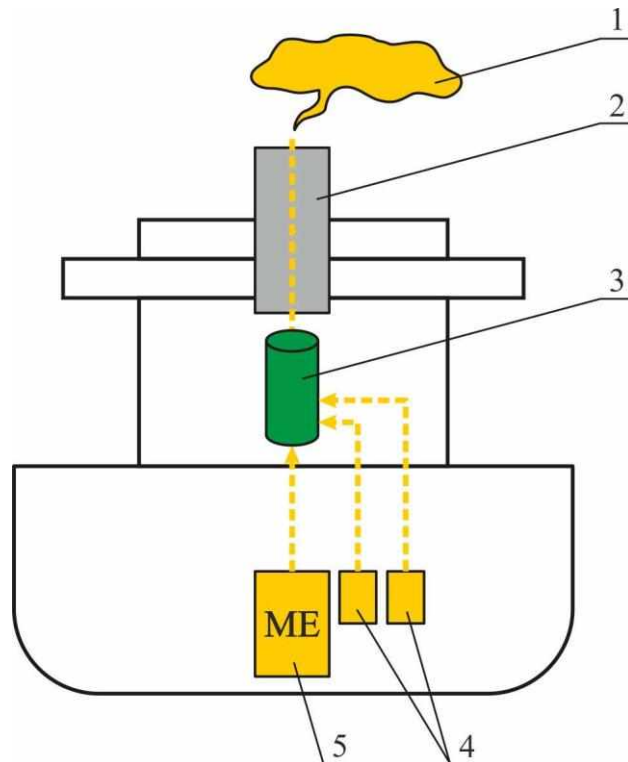


Рис. 3.5. Система скруббера з кількома входами:

1 – випускні гази; 2 – глушник; 3 – скруббер; 4 – допоміжні двигуни АЕ (Auxiliary Engine); 5 – головний двигун МЕ (Main Engine)

У таблиці 3.4 показані переваги та недоліки такої схеми компонування.

Таблиця 3.4. Характеристики одноканального скруббера

Одноканальна система скруббера	
Переваги	Недоліки
Мала займана площа, якщо скруббер може замінити глушник. Низький центр тяжкості, що зменшує вплив на стійкість. Нижче споживання енергії. Призначений для підтримки сухого ходу (не допускається у деяких портах та зонах).	Можлива складніша установка скруббера. Вимагає додаткових скрубберів для покриття більшої кількості двигунів.

Незалежно від кількості входів, конструктивно скрубери може бути поєднаний з глушником, як це показано на рис. 3.5. Переваги та недоліки багатоканальних скрубери зведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5. Багатоканальні скрубери

Скрубери з кількома входами	
Переваги	Недоліки
Може обробляти кілька потоків газів, що відпрацювали, в одному скрубери. Можливе просте встановлення. Зазвичай більш економічне рішення всім двигунів, об'єднаних в енергетичну установку.	Можливо, складніша маршрутизація трубопроводів. Потребує обхідних рішень.

Необхідно відзначити, що в даний час існує досить велика кількість способів та заходів щодо вирішення проблеми викидів оксидів сірки. Ця обставина ставить судновласників перед непростим вибором коштів для досягнення відповідності з 2020 р. новою вимогою ІМО щодо обмеження вмісту сірки у паливі. Вибір способу відповідності новим вимогам ІМО є складною організаційно-технічною проблемою, що вимагає всебічного аналізу досить великої кількості факторів впливу[43, 44] .

3.5. Висновки за розділом 3

1. Скорочення викидів SO_x потребує специфічних рішень, головними з яких є:

- переведення дизелів високосірчастого важкого палива (HSFO) на морський газойль (MGO) або дистилляти;

- використання палива з дуже низьким вмістом сірки або сумісних паливних сумішей (вміст сірки в яких не перебільшує 0,5% сірки);
- дообладнання суден для використання альтернативних видів палива, таких як ЗПГ або інші види, що не містять сірки;
- встановлення систем очищення випускних газів (скрубєрів), що дозволяє працювати зі звичайним HSFO.

2. Вибір технології скорочення викидів продуктів, що містять сірки, на основі наявних альтернативних варіантів повинен проводитися на основі всебічного аналізу наступних факторів впливу:

- тип та розмір судна, його експлуатаційні характеристики;
- доступні види палива у різні терміни, а також складність енергетичної установки;
- інтенсивність та ефективність експлуатації та термін служби судна, що залишився, та ін.

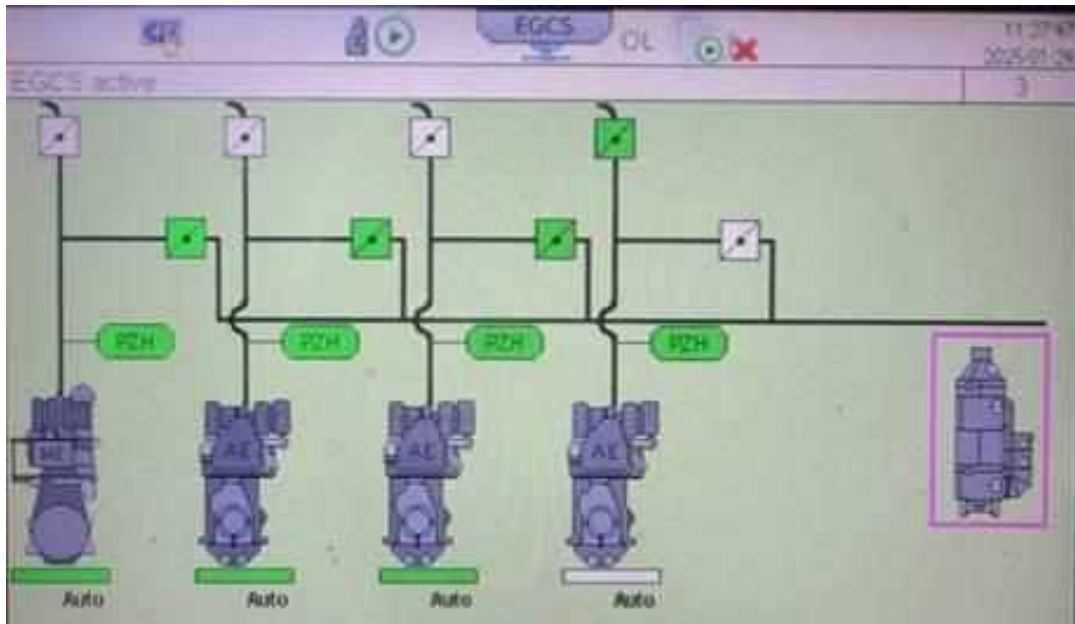
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СКРУБЕРНИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ВІД ОКСИДІВ СІРКИ

4.1. Технологія проведення експерименту

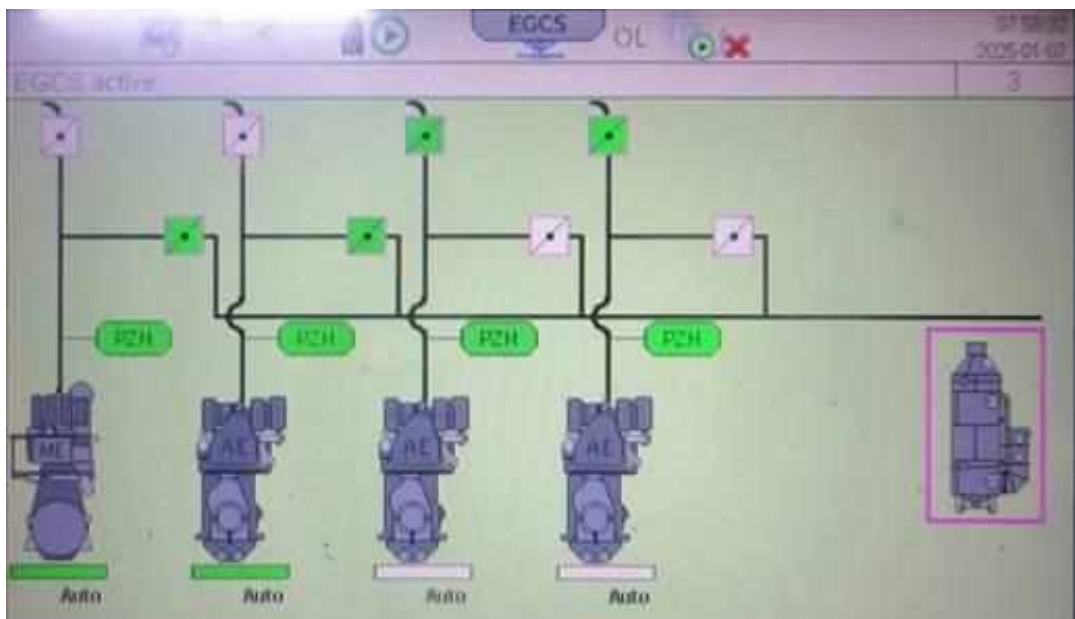
З метою визначення найбільш раціональних способу очищення випускних газів суднових дизелів від оксидів виконувались дослідження на гібридній скруберній системі SO_x . Система дозволяла виконувати очищення випускних газів як за відкритому контурі (у разі якого очищення забезпечувалось лише забортною водою), також і замкненому контурі (у разі якого для очищення додатково використовувалась сода – NaOH) [45, 46].

Дослідження виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 82,000 тонн. До складу суднової енергетичної установки судна входили головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C з ефективною потужністю 9932 кВт та три допоміжні дизель-генератори Yanmar 6EY18ALW2 з потужністю 800 кВт кожний. Випускні гази всіх дизелів (головного та допоміжних) спрямовувались до загального скрубера SO_x – Exhaust Gas Cleaning System, де здійснювалось їх очищення від сірчистих з'єднань. Скруберне очищення випускних газів дозволяло використовувати під час експлуатації дизелів палива з вмістом сірки до 3,5 % [47, 48].

Exhaust Gas Cleaning System забезпечувала очищення випускних газів від домішок сірки на різних експлуатаційних режимах роботи суднової енергетичної установки. При цьому за мінімальний приймався режим, що відповідав 25% навантаженню на один з допоміжних дизель-генераторів Yanmar 6EY18ALW2. Як максимальний – режим, на якому головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C експлуатувався з навантаженням 85%, три одночасно працюючих дизель-генератори Yanmar 6EY18ALW2 з навантаженням 75%. Деякі випадки експлуатації Exhaust Gas Cleaning System наведені на рис. 4.1.



a)



б)

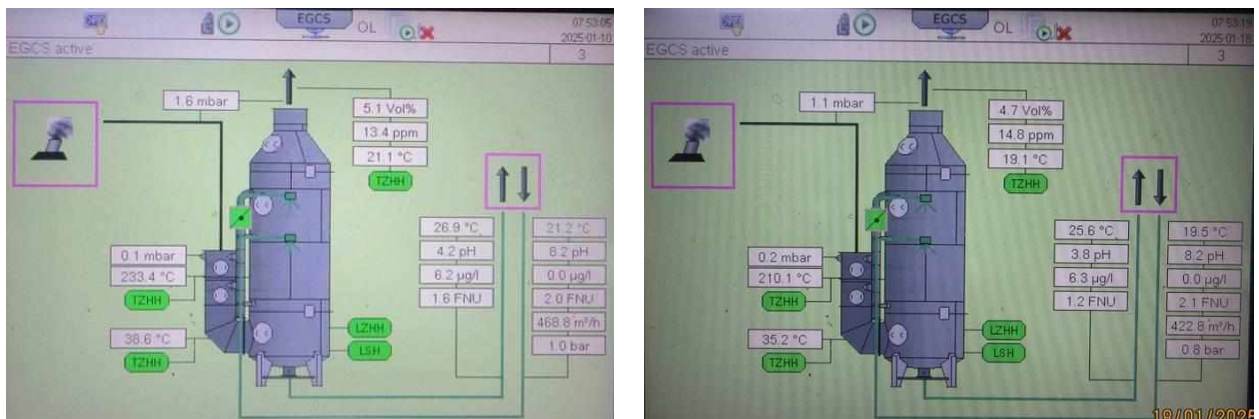
Рис. 4.1. Експлуатаційні режими Exhaust Gas Cleaning System:

- a* – очищення випускних газів головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C та двох допоміжних дизель-генераторів Yanmar 6EY18ALW2;
- б* – очищення випускних газів головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C та одного допоміжного дизель-генератора Yanmar 6EY18ALW2

Exhaust Gas Cleaning System дозволяла визначити наступні основні показники:

- тиск – в mbar, та температуру – в °C, випускних газів до потрапляння в скруббер;
- вміст діоксиду вуглецю CO₂ – в об'ємних відсотках, та вміст діоксиду сірки SO₂ – у ppm після скрубберного очищення;
- температуру – в °C, кислотність – в рН, мутність – в µg/l, витрату – в m³/h, та тиск – в bar, заборотної води, що подається в скруббер;
- температуру – в °C, кислотність – в рН, мутність – в µg/l, заборотної води, що виходить зі скрубера після очищення випускних газів;
- деякі інші показники.

Деякі приклади визначення вказаних показників наведені на рис. 4.2.



a)

b)

Рис. 4.2. Визначення показників роботи Exhaust Gas Cleaning System:

- a – очищення випускних газів головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C та двох допоміжних дизель-генераторів Yanmar 6EY18ALW2;
- б – очищення випускних газів головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C та одного допоміжного дизель-генератора Yanmar 6EY18ALW2

Основним показником, що визначається в разі використання палива, вміст сірки в якому перевищує 0,5 % та за яким оцінюється ефективність очищення випускних газів від сірчистих з'єднань, є відношення діоксиду сірки SO₂ до діоксиду вуглецю CO₂ (див. таблицю 1.1).

Під час проведення досліджень суднова енергетична установка експлуатувалась на різних режимах, які наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Експлуатаційні режими суднової енергетичної установки

Режим	Варіант роботи суднової енергетичної установки
1	60% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 65% навантаження допоміжного двигуна Yanmar 6EY18ALW2
2	75% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 70% навантаження допоміжного двигуна Yanmar 6EY18ALW2
3	70% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 55% навантаження двох допоміжних двигунів Yanmar 6EY18ALW2
4	75% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 65% навантаження двох допоміжних двигунів Yanmar 6EY18ALW2

На всіх експлуатаційних режимах суднові дизелі (як головний STX-MAN B&W 6S60ME-C, також допоміжні Yanmar 6EY18ALW2) використовували на паливо RMG380 (зі вмістом сірки 3,2 %). При цьому під час знаходження судна всередині SECAs скруберна система очищення забезпечувала значення відношення SO_2/CO_2 менш за 4,3. Під час знаходження судна поза SECAs відношення SO_2/CO_2 не перевищувало 21,7. Це забезпечувало вимоги Додатку VI MARPOL щодо вмісту сірки в морському паливі. У деяких морських портах та територіальних водах країн, національні вимоги яких не дозволяли використовувати скруберне очищення випускних газів від оксидів сірки, експлуатація дизелів виконувалась на паливі DMA (зі вмістом сірки 0,42 %) [49, 50].

4.2. Результати досліджень

Дослідження виконувались виключно на сталих режимах роботи суднових дизелів та, відповідно, Exhaust Gas Cleaning System. Перед початком реєстрації показників роботи Exhaust Gas Cleaning System дизелі експлуатувались 0,5...1 годину на обраному експлуатаційному режимі. Це забезпечувало сталість показників, що вимірювались. Тривалість досліджень на кожному з режимів складала 2...3 години. Основними показниками, що приймалися для оцінки ефективності роботи Exhaust Gas Cleaning System, були об'ємна концентрація діоксиду вуглецю CO_2 , відносна концентрація діоксиду сірки SO_2 та їх відношення SO_2/CO_2 . Ці значення фіксувались вузлом автоматичної реєстрації Exhaust Gas Cleaning System та зберігались у відповідних архівних файлах та одночасною візуалізацією на екрані контрольного монітора (аналогічно зображених на рис. 4.2).

Експлуатаційні режими, на яких виконувались дослідження, відповідали режимам, що наведені в таблиці 4.1. Вимірювання всіх експлуатаційних показників роботи дизелів виконувалось за допомогою суднової системи реєстрації, контролю та діагностики Doctor [51, 52].

Результати досліджень наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Визначення показників скруберної системи очищення випускних газів

Експлуатаційний режим *	Відкритий контур			Замкнений контур		
	CO_2 , %	SO_2 , ppm	SO_2/CO_2 , ppm/%	CO_2 , %	SO_2 , ppm	SO_2/CO_2 , ppm/%
Під час знаходження всередині SECAs						
1	4,5	17,2	3,82	4,4	14,0	3,18
2	4,5	16,1	3,58	4,5	13,4	2,98
3	4,9	19,9	4,06	4,8	15,1	3,15
4	5,1	20,5	4,02	5,0	16,3	3,26

Закінчення таблиці 4.2.

Експлуатаційний режим *	Відкритий контур			Замкнений контур		
	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	SO ₂ /CO ₂ , ppm/%	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	SO ₂ /CO ₂ , ppm/%
Під час знаходження поза SECAs						
1	5,3	97,2	18,34	5,2	85,3	16,40
2	5,2	102,6	19,73	5,0	84,8	16,96
3	5,4	106,3	19,69	5,3	92,3	17,42
4	5,2	103,8	19,96	5,1	89,3	17,51

Примітка: режими 1, 2, 3, 4 відповідають наведеним в таблиці 4.1

Для кращої візуалізації результати, що наведені в таблиці 4.2, подані у вигляді рис. 4.3–4.6.

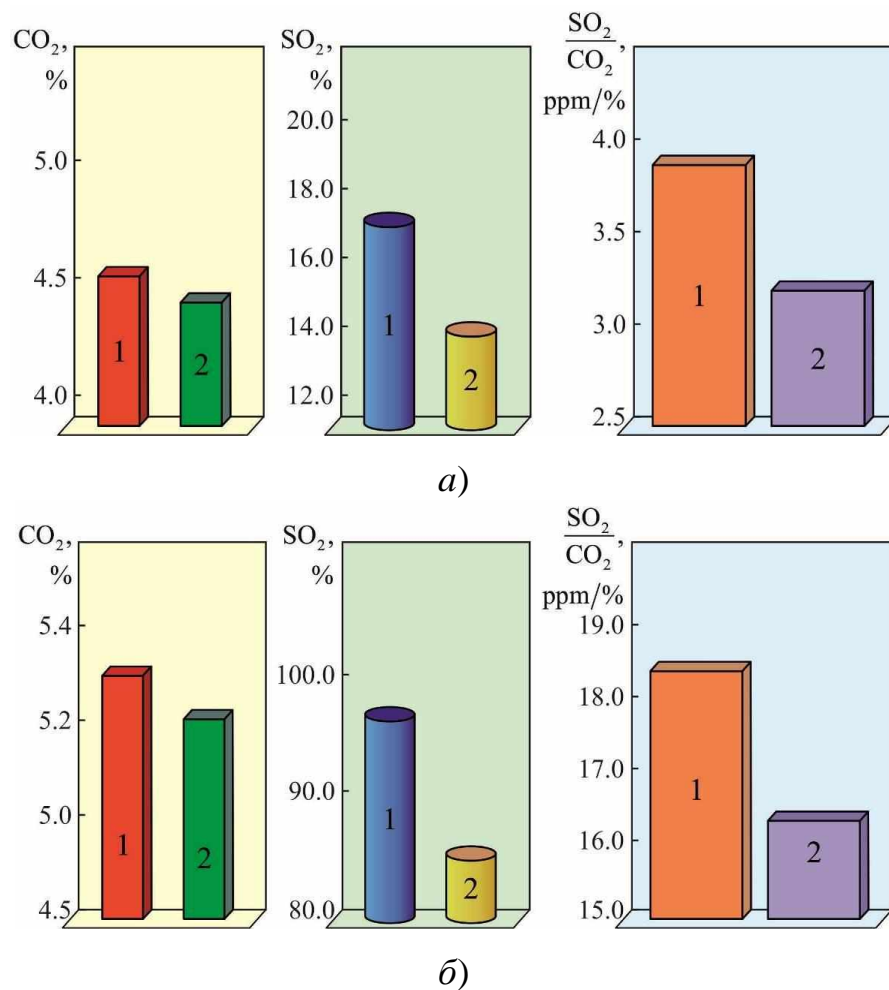


Рис. 4.3. Показники роботи скруберної систем очищення випускних газів (режим 1): 1 – відкритий контур; 2 – замкнений контур;
а – експлуатація всередині SECAs; б – експлуатація поза SECAs

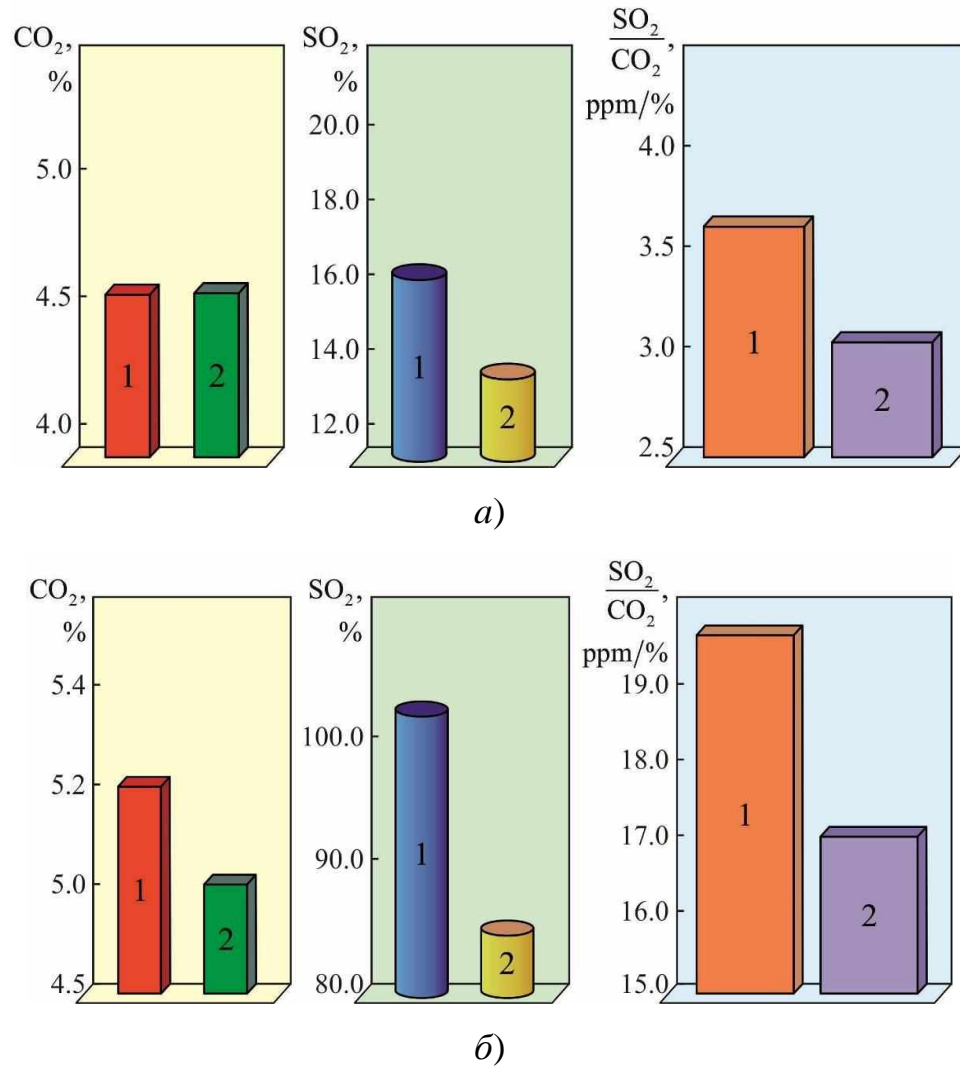


Рис. 4.4. Показники роботи скруберної систем очищення випускних газів (режим 2): 1 – відкритий контур; 2 – замкнений контур;
a – експлуатація всередині SECAs; *б* – експлуатація поза SECAs CAs

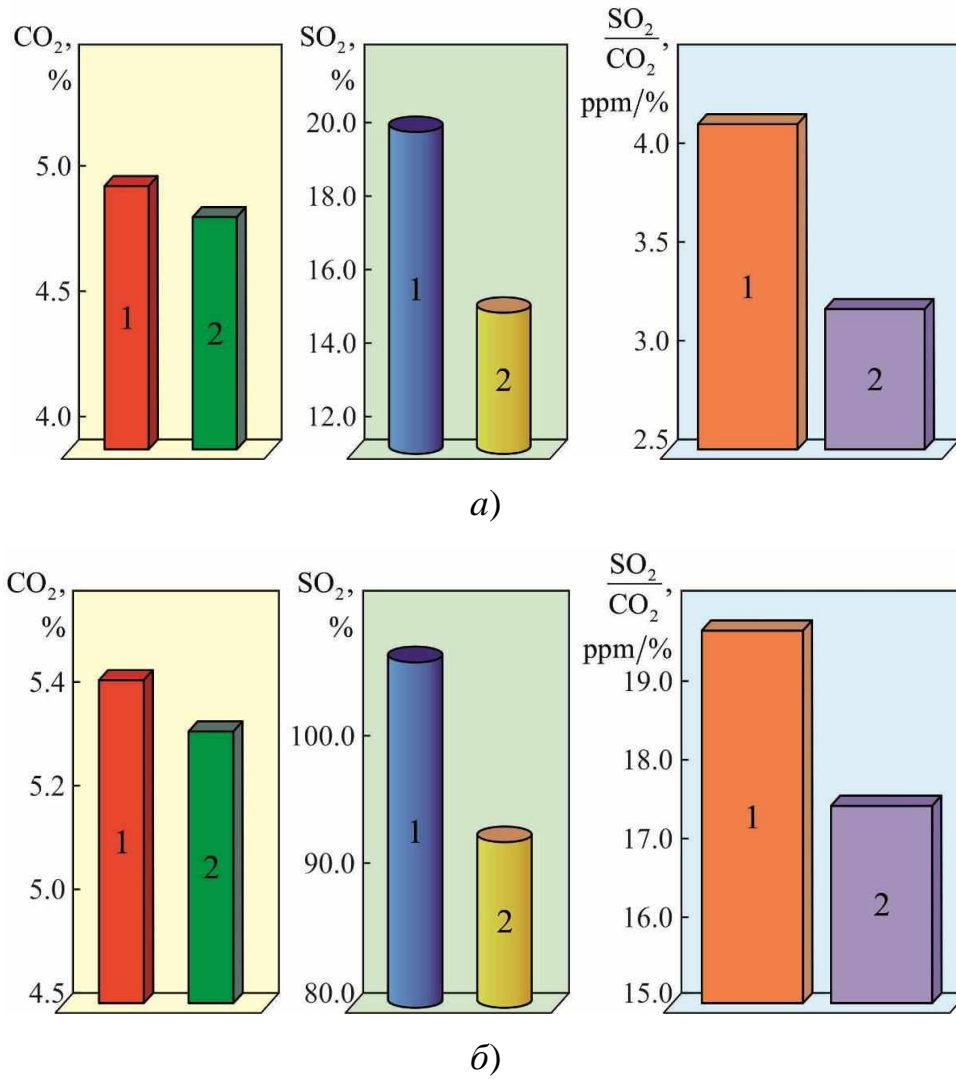


Рис. 4.5. Показники роботи скруберної систем очищення випускних газів (режим 3): 1 – відкритий контур; 2 – замкнений контур;
a – експлуатація всередині SECAs; *б* – експлуатація поза SECAs

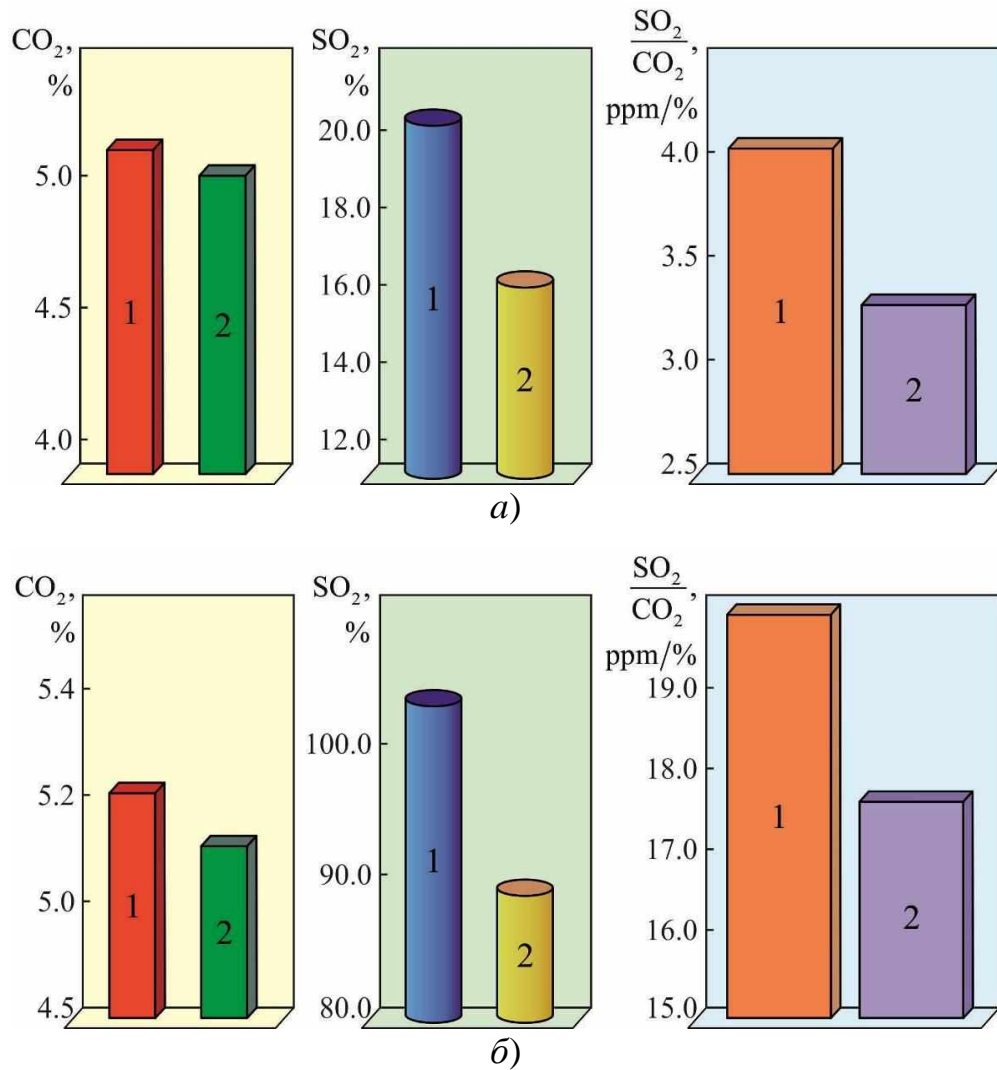


Рис. 4.6. Показники роботи скруберної систем очищення випускних газів (режим 4): 1 – відкритий контур; 2 – замкнений контур;
 а – експлуатація всередині SECAs; б – експлуатація поза SECAs

Відносне зменшення емісії шкідливих речовин – діоксиду вуглецю ΔCO_2 , діоксиду сірки ΔSO_2 , а також їх відношення $\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, розраховувалось за виразами:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta\text{CO}_2 &= \frac{\text{CO}_2^{\text{Scr}} - \text{CO}_2^{\text{NaOH}}}{\text{CO}_2^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \\
 \Delta\text{SO}_2 &= \frac{\text{SO}_2^{\text{Scr}} - \text{SO}_2^{\text{NaOH}}}{\text{SO}_2^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \\
 \Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2) &= \frac{(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^{\text{Scr}} - (\text{SO}_2/\text{CO}_2)^{\text{NaOH}}}{(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^{\text{Scr}}} \cdot 100\%,
 \end{aligned} \right\} (4.1)$$

де CO_2^{Scr} , SO_2^{Scr} , $(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^{\text{Scr}}$ – емісія діоксиду вуглецю, діоксиду сірки, а також їх відношення для відповідного режиму роботи системи очищення випускних газів за відкритим контуром [53, 54];

$\text{CO}_2^{\text{NaOH}}$, $\text{SO}_2^{\text{NaOH}}$, $(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^{\text{NaOH}}$ – значення цих же показників під час використання замкненого контуру [55, 56].

З урахуванням чисельних значень, що наведені в таблиці 4.2, за виразами (4.1) отримані значення, які подані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Відносне зменшення емісії шкідливих речовин під час використання додаткової ультразвукової обробки палива

Експлуатаційний режим*	Під час знаходження всередині SECAs			Під час знаходження поза SECAs		
	ΔCO_2 , %	ΔSO_2 , %	$\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, %	ΔCO_2 , %	ΔSO_2 , %	$\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, %
1	2,22	18,60	16,75	1,89	12,24	10,56
2	2,22	16,77	16,77	3,85	17,35	14,04
3	2,04	24,12	22,54	1,85	13,17	11,53
4	1,96	20,49	18,90	1,92	13,97	12,28

Примітка: режими 1, 2, 3, 4 відповідають наведеним в табл. 4.1.

Використання замкненого контуру підвищує ефективність роботи скруберної системи очищення випускних газів. Це відображається в покращенні екологічних показників роботи суднових дизелів – зниженні емісії діоксиду вуглецю CO_2 , діоксиду сірки SO_2 , а також відношення SO_2/CO_2 . Саме відношення SO_2/CO_2 є показником, яке регламентується вимогами Додатку VI MARPOL у разі використання систем очищення випускних газів від оксидів сірки. Крім того, саме це відношення контролюється під час перевірки екологічності роботи суднової енергетичної установки.

Найбільш ефективну дію замкнений контур створює на сірковмісні компоненти палива. Це відображається в суттєвому зниженні викидів оксидів сірки.

4.3. Висновки за розділом 4

1. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання замкнених контурів як методу, що сприяє вдосконаленню процесу очищення випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки.

2. Очищення випускних газів у скруберах SO_x за замкненим контуром майже не впливає на емісію діоксиду вуглецю CO_2 , при цьому суттєво діє на з'єднання, що містять сірку. Це відображається в зменшенні емісії діоксидів сірки SO_2 та відношення SO_2/CO_2 – показнику, що є основним під час оцінки ефективності системи скрубєрного очищення випускних газів.

3. Для різних експлуатаційних режимів суднової енергетичної установки було встановлено, що відносно зменшення емісії шкідливих речовин під час використання замкненого контуру очищення випускних газів складає під час знаходження всередині SECAs (де відповідно до вимог Annex VI MARPOL відношення SO_2/CO_2 не повинно перевищувати значення 4,3):

– щодо емісії діоксиду сірки SO_2 16,77...24,12 %;

– щодо відношення SO_2/CO_2 16,75...22,54 %;

під час знаходження поза SECAs (де відповідно до вимог Annex VI MARPOL відношення SO_2/CO_2 не повинно перевищувати значення 21,7):

– щодо емісії діоксиду сірки SO_2 12,24...17,35 %;

– щодо відношення SO_2/CO_2 10,56...14,04 %.

4. Додатково підкреслимо більшу ефективність використання замкненого контуру під час знаходження суден всередині SECAs, тобто в прибережних акваторіях. Саме ці морські райони піддають під найбільший негативний впливу з боку засобів транспорту та саме в них діють найбільш суворі екологічні вимоги та норми.

5. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

З 1 січня 2013 року відповідно до положень Резолюції ІМО МЕРС.203(62)(9) вступили в силу правила Конвенції МАРПОЛ, спрямовані на підвищення енергоефективності суден. На всі нові судна, побудовані після 1 січня 2013 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)». Відповідно до поправок до Правила 26 Додатка 6 до Конвенції МАРПОЛ наявність на борту судна ПУЕС є однією з підстав для отримання судном міжнародного сертифікату енергоефективності. 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 [57].

Розрахунок ККЕЕ проводиться за загальною методикою, наведеною ІМО в керівництві МЕРС.308(73) Потім судно перевіряється морською адміністрацією держави або її уповноваженим органом - Регістром судноплавства. Після успішної перевірки судну видається Міжнародний сертифікат з енергоефективності [58].

У загальному вигляді формулу розрахунку ККЕЕ можна представити таким чином:

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

Кількість викидів CO₂ визначається за витраченого за рейс паливу певного сорту. У свою чергу, витрата палива СЕУ базується на потужності двигунів пропульсивного комплексу на певному експлуатаційному режимі та інших споживачів палива на судні.

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

Максимальна величина $K_{KE(MAX)}$ задається статичної 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 $i=1...7$:

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

с) енергозберігаючі технології для допоміжних установок

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

d) енергозберігаючі технології для головних установок

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

e) робота судна з перевезення вантажів

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

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

$Capacity$ – дедвейт судна, тонн;

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

V_{ref} – експлуатаційна швидкість судна, вузли.

Значення питомого (масового) вмісту CO_2 при повному згорянні вуглецю в паливі наведені у таблиці 5.1 [58].

Таблиця 5.1. Характеристики палив, що використовуються на судах

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

Дані, необхідні для розрахунку ККЕЕ наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Вихідні дані для розрахунку ККЕЕ

Тип судна	Комбіноване
Загальна довжина, м	199,95
Довжина між перпендикулярами, м	190,0
Ширина, м	32,22
Осадка, м	9,816
Дедвейт, тонн	18836
Головний двигун	7S60MC-C «MAN-B&W»
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і питома ефективна витрата палива, г/(кВт·г)	16660, 174
Потужність, кВт і витрата палива, г/(кВт·г) ГД при 0,75 (MCR)	12495 172
Кількість ГД	1
Використовуване паливо ISO 8217-2010	RMK380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Допоміжні двигуни	6DK26 Daihatsu
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і витрата палива (г/кВт·г)	1710 кВт, 196
Кількість ДГ	3
Використовуване паливо	RMK 380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Вихідна потужність ДГ, кВт	751
Швидкість судна при літній осадці і 75% потужності ГД на глибокій воді, вузли	18,76

Потужність допоміжних двигунів необхідна для підтримки тривалого максимального ходового навантаження

$$P_{AE} = \begin{cases} 0,025 \sum_{i=1}^{n(ME)} MCR_{ME(i)} + 250 & \text{при } MCR_{ME} > 10000 \text{ кВт} \\ 0,05 \sum_{i=1}^{n(ME)} MCR_{ME(i)} & \text{при } MCR_{ME} < 10000 \text{ кВт} \end{cases} .$$

$$P_{AE} = 0,025 \cdot 16660 + 250 = 667 \text{ кВт}.$$

Значення максимального $K_{KE(MAX)}$

$$K_{KE(MAX)} = 174,2 \cdot 18836^{-0,201} = 24,09 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}} .$$

Розрахункове значення ККЕЕ визначимо за формулою

$$K_{KE(PO3)} = \frac{(\sum_{i=1}^{nE} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} ,$$

$$K_{KE(PO3)} = \frac{1 \cdot 12495 \cdot 3,114 \cdot 172 + 667 \cdot 3,114 \cdot 188}{1 \cdot 18836 \cdot 1 \cdot 18,76} = 20,04 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}} .$$

З наведеного розрахунку видно що значення $K_{KE(PO3)}$ при заданих параметрах нижче $K_{KE(MAX)}$, що забезпечує вимоги до енергетичної ефективності судна.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота магістра присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми – зниженню емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів.

Як основні науково-практичні результати дослідження визначимо наступне.

1. Питанням екологічної безпеки мореплавання у комплексі проблем сучасного морського транспорту приділяється особлива увага. Найбільших збитків довкіллю завдається з боку суднової енергетичної установки, у результаті експлуатації якої утворюються такі шкідливі компоненти, як незгорілі вуглеводні, тверді частинки, оксиди азоту, парникові гази і, окремих випадках, сполуки сірки. У той час як на утворення ряду небезпечних компонентів, що містяться у випускних газах, можна впливати за рахунок спеціальної організації процесів в циліндрі двигуна, емісія сірковмісних компонентів цілком і повністю визначається вмістом сірки у паливі, що використовується. Як наслідок, вирішення проблем скорочення викидів SO_x потребує специфічних рішень. З 2020 р. набули чинності нові правила щодо обмеження до 0,5 % вмісту сірки у паливі, що використовується на судах. Принциповим питанням є те, що досягнення нормативних показників викидів SO_x може бути отримано в результаті використання спеціальних видів низькосірчистого палива або шляхом очищення випускних газів в спеціальних периферійних пристроях (у випадку, коли дизель експлуатується на традиційних високосірчистих сортах палива).

2. Вибір технології, що сприяє зменшенню викидів сірки з випускними газами, повинен проводитися на основі всебічного аналізу наступних факторів впливу:

- тип та розмір судна, його експлуатаційні характеристики;

- доступні види палива у різні терміни, а також складність енергетичної установки;

- інтенсивність та ефективність експлуатації та термін служби судна, що залишився, та ін.

3. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання замкнених контурів як методу, що сприяє вдосконаленню процесу очищення випускних газів судових дизелів від оксидів сірки.

4. Очищення випускних газів у скруберах SO_x за замкненим контуром майже не впливає на емісію діоксиду вуглецю CO_2 , при цьому суттєво діє на з'єднання, що містять сірку. Це відображається в зменшенні емісії діоксидів сірки SO_2 та відношення SO_2/CO_2 – показнику, що є основним під час оцінки ефективності системи скрубєрного очищення випускних газів.

5. Для різних експлуатаційних режимів судової енергетичної установки було встановлено, що відносне зменшення емісії шкідливих речовин під час використання замкненого контуру очищення випускних газів складає під час знаходження всередині SECAs (де відповідно до вимог Annex VI MARPOL відношення SO_2/CO_2 не повинно перевищувати значення 4,3):

- щодо емісії діоксиду сірки SO_2 16,77...24,12 %;

- щодо відношення SO_2/CO_2 16,75...22,54 %;

під час знаходження поза SECAs (де відповідно до вимог Annex VI MARPOL відношення SO_2/CO_2 не повинно перевищувати значення 21,7):

- щодо емісії діоксиду сірки SO_2 12,24...17,35 %;

- щодо відношення SO_2/CO_2 10,56...14,04 %.

6. Додатково підкреслимо більшу ефективність використання замкненого контуру під час знаходження суден всередині SECAs, тобто в прибережних акваторіях. Саме ці морські райони піддають під найбільший негативний впливу з боку засобів транспорту та саме в них діють найбільш суворі екологічні вимоги та норми.

Z. Ristovski, R.J. Brown // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2019. – Vol. 70. – Pp. 123-134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001.

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

9. Sulphur 2020 – cutting sulphur oxide emissions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>.

10. ISO statement on ISO 8217 and IMO 2020 0,50 % Sulphur fuels [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://shipandbunker.com/news/world/482202-iso-statement-on-iso-8217-and-imo-2020-0,50-sulphur-fuels>.

11. Global Sulphur Cap 2020 – extended and updated [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html>.

12. What you need to know: The 2020 IMO fuel sulphur regulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.seatrade-maritime.com/images/PDFs/SOMWME-whitepaper_Sulphur-p2.pdf

13. Global Sulphur Cap 2020 – extended and updated [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html>.

14. Global Sulphur Cap 2020 – extended and updated [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html>

15. Мадей В.В. Забезпечення екологічності роботи суднових дизелів під час використання біопалива // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4–5 листопада 2021 року. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 227-230.

16. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

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

18. Madey V. V. Usage of biodiesel in marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 18-21. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-18-21>.

19. Maryanov D. M. Maintaining the efficiency of drilling fluids when they are transported by platform supply vessels class offshore vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 22-28. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-22-28>.

20. Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 “Global Sulphur Cap” for Ships’ Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI. – London: Marisec Publications, 2019. – 36 p.

21. Варбанец Р.А. Технологические карты научных исследований в задачах мониторинга и параметрической диагностики судовых дизелей / Р.А. Варбанец, Ю.Н. Кучеренко, В.И. Кырнац, Е.И. Жолтиков // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2016. – № 1. – С. 47-59.

22. Кринецкий И.И. Основы научных исследований: учеб. пособие / И.И. Кринецкий. – Киев; Одесса : Вища школа, 1981. – 207 с.

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

24. Varbanets R. Analyse of marine diesel engine performance / R. Varbanets, A. Karianskiy // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects.

Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology. – 2012. – Vol. 7. – № – 1. P. 269-275.

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

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

27. Леонов В.Е. Основы экологии и охрана окружающей среды: монография. / В.Е. Леонов, В.Ф. Ходаковский, Л.Б. Куликова; под ред. В.Е. Леонова. – Херсон: Издательство ХГМИ, 2010. – 352 с.

28. Дмитриев В.И. Обеспечение безопасности плавания судов и предотвращение загрязнения окружающей среды / В.И. Дмитриев, В.Е. Леонов, П.Г. Химич, В.Ф. Ходаковский, Л.Б. Куликова. Под редакцией проф. В.И. Дмитриева, проф. В.Е. Леонова. – Херсон: ХГМА, 2014. – 400 с.

29. Леонов В.Е. Обеспечение экологической безопасности судоходства / В.Е. Леонов, О.В. Соляков, П.Г. Химич, В.Ф. Ходаковский. Под редакцией проф. Леонова В.Е. – Херсон: ХГМА, 2014. – 188 с.

30. Леонов В.Е. Защита окружающей среды при эксплуатации судов / В.Е. Леонов, В.И. Дмитриев. – Херсон: ХГМА, 2017. – 252 с.

31. Добровольский В.В. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных двигателей / В.В. Добровольский, С.А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.46-54.

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

33. Ханмамедов С.А. Минимизация энергетических затрат на топливоподготовку высоковязких топлив малооборотных ДВС системы СИМАС / С.А. Ханмамедов, В.В. Добровольский, Н.Л. Добровольская // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С.111-119.

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

35. Солодовников В.Г. Использование топлив с повышенным содержанием серы при эксплуатации судовых среднеоборотных дизелей / В.Г. Солодовников // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. – № 2. – С. 65-71.

36. Добровольский В.В. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных дизелей / В.В. Добровольский, С.А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.46-54.

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

38. Калугин В. Н. Нормативные требования, направленные на сокращение выбросов в атмосферу загрязняющих веществ / В. Н. Калугин // В збірки мат. наук.-техн. конф. «Суднові енергетичні установки : експлуатація та ремонт», 21.03.2012-23.03.2012. Частина 1. – Одеса : ОНМА, 2012. – С.90-93.

39. Emission Limits and Requirements for Auxiliary Diesel Engines and Diesel-Electric Engines Operated on Ocean-Going Vessels Within California Waters and 24 Nautical Miles of the California Baseline. Final Regulation Order. New section 2299.1, title 13, California Code of Regulation (CCR). 2006.

40. Directive 2005/33/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 amending Directive 1999/32/EC. – Official Journal of the European Union, 22.7.2005. EN L 191/59-69.

41. For use of and switching to low sulfur marine gas oil in auxiliary boilers and associated equipment on board tankers to meet requirements of the EU Sulfur Directive 2005/33/EC : Guidance for hazard identification. INTERTANKO and OCIMF Guidelines, December 2009. – 9 p.

42. Калугин В.Н. Рекомендации по переводу работы судовых дизельных установок на низкосортные морские сорта топлив / В.Н. Калугин // В збірки мат. наук.-техн. конф. «Суднові енергетичні установки : експлуатація та ремонт», 21.03.2012-23.03.2012. Частина 1. – Одеса : ОНМА, 2012. – С.94-101.

43. Калугин В.Н. Особенности использования низкосернистых топлив в судовых дизельных установках / В.Н. Калугин // В збірки мат. наук.-техн. конф. «Енергетика суден : експлуатація та ремонт», 05.04.2011-07.04.2011. – Одеса : ОНМА, 2011. – С.103-107.

44. Солодовников В.Г. Использование в судовых дизелях топлив различного фракционного и структурного состава / В.Г. Солодовников // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 33. – Одесса: ОНМА. – С. 110-117.

45. Мадей В. В. Використання альтернативного палива в судових середньооберткових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 45 - 53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.

46. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11(1), 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

47. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні

установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

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

49. Hombrevella A. Study of Gas Cleaning Systems for vessels to fulfill IMO-III in 2016 / A. Hombrevella, A. Kilicaslan, J. Perales // European Project Semester, 2011. – 220 p.

50. Солодовников В.Г. Использование сернистых топлив в судовых вспомогательных двигателях / В.Г. Солодовников // Зб. ст. VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2014» (27-29 травня 2014 р., м. Херсон). – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 304-306.

51. Diesel Directory // Marine Propulsion Perspective in association with MER. – 2013. – № 1. – P. 10-23.

52. Солодовников В.Г. Совершенствование процесса топливо подготовки судовых дизелей / В.Г. Солодовников // Збірка матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2015» (26-28 травня 2015 р., м. Херсон). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2015. – С. 316-319.

53. Tightening emissions regime drives new initiatives // MER. – 2010. – № 6. – P. 16-20.

54. Nadkarni K. Determination of Sulfur in Petroleum Products and Lubricants: A Critical Review of Test Performance / K. Nadkarni // American Laboratory, 2000. – № 11. – P.16-25.

55. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific

journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35.
<https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

56. Турбін В.О. Використання скрубєрних систем очищення випускних газів суднових дизелів / В.О. Турбін, М.В. Міюсов // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУОМА. –С. 82-86.

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

58. 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.