

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

Кафедра суднових енергетичних установок

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему:

ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Курсанта 2-го року навчання навчально-наукового інституту інженерії

Кроть Микити Максимовича

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

Нормоконтроль

Діакош к. т. н., доц. Паршиков 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

С. Сагін
(підпис) Сергій САГІН

Рецензент (зовнішній)

А. Медв. *А. Губанов*
(ПІБ, підпис, дата) 22.12.25

Рецензент (внутрішній)

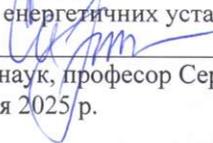
М. *Клиба О.Д., 19.12.25*
(ПІБ, підпис, дата)

Одеса – 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
суднових енергетичних установок


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

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи магістра

Курсант ННІ _____ Кроть Микита Максимович _____

1. Тема дипломної роботи: _____ Підвищення паливної економічності _____
_____ суднових дизелів _____

Затверджена наказом ректора НУОМА № 1444 від 24 листопада 2025 р. _

2. Об'єкт дослідження _ процес паливопідготовки для суднових _____
_____ двигунів внутрішнього згоряння _____

3. Предмет дослідження _ процес використання присадок до палива _____

4. Обсяг пояснювальної записки: _____ 80...90 стор. _____

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи: _____
_ Огляд літературних джерел з проблеми вдосконалення системи _____
_ паливопідготовки суднових дизелів _____

_____ Загальна методика наукового дослідження _____

_____ Технологія використання присадок до палива в суднових двигунах _____
_ внутрішнього згоряння _____

_____ Результати випробувань присадок до палива під час експлуатації _____
_ суднових дизелів _____

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

_____ Огляд літературних джерел з проблеми вдосконалення системи _____
_ паливопідготовки суднових дизелів _____

_____ Загальна методика наукового дослідження _____

_____ Технологія використання присадок до палива в суднових двигунах _____
_ внутрішнього згоряння _____

_____ Результати випробувань присадок до палива під час експлуатації _____
_ суднових дизелів _____

7. Перелік графічного матеріалу:

_____ Методологія наукового дослідження _____

_____ Аналіз способів підвищення паливної економічності суднових дизелів _____

_____ Результати досліджень _____

_____ Висновки _____

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 76 сторінок, 11 рисунків, 5 таблиць, 49 літературних джерел.

Магістерське наукове дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – необхідності пошуку нових шляхів забезпечення екологічних та економічних показників роботи судових дизелів.

Висунута та підтверджена наукова гіпотеза про те, що підвищення економічності та екологічності роботи судових дизелів можливо за рахунок хімічної обробки палива, а саме використання палива з оптимальною концентрацією присадки.

Встановлено, що використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності судового дизеля. Експериментально підтверджено, що під час використанні паливних присадок на різних режимах роботи судового чотиритактного дизеля можливо досягти підвищення його економічності на 3,5...5,8 %.

СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ, СУДНОВЕ МОТОРНЕ ПАЛИВО, ПРИСАДКИ ДО ПАЛИВА, ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДИЗЕЛЯ, ПИТОМА ВИТРАТА ПАЛИВА, КОНЦЕНТРАЦІЯ ПРИСАДКИ

ABSTRACT

Master`s degree thesis: 76 pages, 11 figures, 5 tables, 49 references.

The master's scientific research is aimed at solving the scientific and applied problem – the need to find new ways to ensure ecological and economic performance of marine diesel engines.

A scientific hypothesis has been put forward and confirmed that increasing the efficiency and environmental performance of marine diesel engines is possible due to the chemical processing of fuel, namely the use of fuel with the optimal concentration of the additive.

It has been established that the use of fuel additives leads to an increase in the fuel efficiency of a marine diesel engine. It has been experimentally confirmed that with the use of fuel additives at different operating modes of a four-stroke diesel engine it is possible to achieve a reduction in the specific fuel consumption from 3.5 to 5.8 %.

MARINE DIESEL, MARINE MOTOR FUEL, FUEL ADDITIVES, ECONOMIC PERFORMANCE OF A DIESEL ENGINE, SPECIFIC FUEL CONSUMPTION, CONCENTRATION OF ADDITIVE

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	11
1.1 Дизельні енергетичні установки морських суден і системи, що забезпечують їх роботу.....	12
1.2. Аналіз схем підготовки палива для суднових дизелів.....	15
1.3. Аналіз зміни експлуатаційних властивостей палив при їх підготовці.....	19
1.3.1. Фракційний склад суднових палив.....	21
1.3.2. Елементний склад палива.....	22
1.3.3. Груповий склад палива.	24
1.4. Аналіз впливу експлуатаційних властивостей палива на технічні характеристики суднового дизеля.....	26
1.5. Аналіз методів підготовки палива до його використання.....	28
1.6. Висновки по розділу 1.....	36
2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	38
2.1. Процес наукового пізнання	38
2.2. Методологічні принципи наукових досліджень	39
2.3. Обґрунтування мети і завдань дослідження	40
2.4. Висновки по розділу 2.....	43
3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСАДОК ДО ПАЛИВА В СУДНОВИХ ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	45
3.1. Механізм дії присадок на елементний склад палива.....	45
3.2. Технологія використання присадок до палива	48

3.3. Висновки за розділом 3	50
4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ПРИСАДОК ДО ПАЛИВА ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ	51
4.1. Лабораторні випробування присадок до палива	51
4.2. Випробування присадок до палива в паливних системах суднових дизелів	53
4.3. Висновки за розділом 4.....	58
5. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	60
5.1. Коефіцієнт енергетичної ефективності.....	60
5.2. Розрахунок узагальненого пропульсивного коефіцієнта корисної дії суднової енергетичної установки.....	66
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВОД	–	високо-обертовий дизель
ГД	–	головний двигун
ГТН	–	газотурбонагнетач
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згорання
ДД	–	допоміжний двигун
ДЕУ	–	дизельна енергетична установка
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
ККЕЕ	–	конструктивного коефіцієнту енергетичної ефективності
МКВ	–	машинно-котельне відділення
МОД	–	мало-обертовий дизель
ПНВТ	–	паливний насос високого тиску
ПУЕС	–	план управління енергоефективністю судна
СДВЗ	–	судновий двигун внутрішнього згорання
СОД	–	середньо-обертовий дизель
СЕУ	–	суднова енергетична установка
ЦПГ	–	циліндропоршнева група
ІМО	–	Міжнародна морська організація
ІСО	–	Міжнародна організація зі стандартизації
SEEMP	–	Ship Energy Efficiency Management Plan

ВСТУП

Морський та внутрішній водний транспорт є невід'ємною складовою інфраструктури багатьох країн, пов'язаних між собою водними шляхами. Рух суден, а також функціонування суднової електростанції забезпечується дизелями – найпоширенішими тепловими двигунами, застосовуваними в суднових енергетичних установках. Специфіка роботи морських і річкових суден не дозволяє використовувати на них як джерела енергії акумуляторних або сонячних батарей, а також вітрогенераторів, які в даний час активно розробляються та впроваджуються в автомобільному транспорті, а також в стаціонарній енергетиці. Отримання ефективної потужності суднових дизелів неможливо без використання палива нафтового походження, природні запаси якого щорічно знижуються. Одночасно з цим посилюються вимоги, що висуваються до екологічних показників роботи енергетичних установок суден морського та внутрішнього водного транспорту. Це обумовлює впровадження в суднову енергетику методів та технологій, що забезпечують покращення процесу згоряння палива та сприяють при цьому підвищенню паливної економічності дизелів суден морського транспорту.

Суттєвий вплив на показники надійності, економічності і екологічної безпеки надає також вид палива, споживаного судновою енергетичною установкою, і його якість. Морський транспорт є одним з основних споживачів дизельного палива, яке представляє собою продукт переробки нафти. Якість палива має суттєвий вплив на експлуатаційні показники суднової енергетичної установки (СЕУ): економічність; надійність; екологічну безпеку.

Жорсткість вимог до експлуатаційних показників СЕУ обумовлює необхідність підвищувати якість палива шляхом використання присадок не тільки в процесі виробництва палив, але і в процесі експлуатації дизелів.

Саме тому тривають активні дослідження з розробки сучасних присадок до дизельного палива. Присадки для дизельного палива поділяються на такі групи:

- депресорно-диспергуючі;
- диспергатори парафінів;
- противоізносниє (змащувальні);
- цетаноповишаючіє (промотори запалення);
- активатори горіння;
- агатофункціональні.

Механізм дії присадок полягає в легкому розпаді їх молекул та прискоренні перед полум'яних реакцій, сприянні розгалуження окислювальних ланцюгів і утворення нових реакційних центрів.

Аналіз науково-технічної і патентної літератури показав, що розробці присадок до дизельного палива приділяється велика увага як науково-дослідними, так і виробничими організаціями.

Тому подальше визначення механізму впливу присадок на економічні, енергетичні та екологічні показники роботи суднових дизелів є актуальним завданням, розв'язання якого сприятиме підвищенню ефективності експлуатації та економічності дизелів суден морського транспорту. Саме цим питанням присвячена дипломна робота.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Суднові двигуни внутрішнього згорання (СДВЗ) є найбільшими споживачами рідкого палива. Потужність головних і допоміжних двигунів суднової енергетичної установки (СЕУ) лежить в діапазоні від декількох сотень до десятків тисяч кіловат. При середньому питомій ефективному витраті палива 180...185 г/(кВт·год) добова витрата палива головним двигуном (ГД) може становити 200...250 тонн/добу, а допоміжними двигунами (ДД), кількість яких на сучасних судах до 4-х, а кількість паралельно працюючих до 3-х, – 10...12 тонн/добу.

Дизельна енергетична установка (ДЕУ) сучасних СЕУ комплектується мало-обертovими дизелями (МОД) і середньо-обертovими дизелями (СОД). МОД, що працюють по двотактному циклу, використовуються в якості ГД, що передають потужність на гвинт. Цю ж функцію можуть виконувати СОД, проте найбільше застосування вони отримали в якості ДД для приводу суднових електрогенераторів. Високо-обертovі дизелі (ВОД), як правило, виконують в функції ДД, та як виняток в функції ГД. При цьому як в першому, так і особливо у другому випадку, ВОД встановлюються на судах малої та середньої водотоннажності.

Як паливо для двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) використовуються рідкі нафтопродукти, які традиційно поділяються на важкі і легкі (дизельні). Ця класифікація базується на питомій вазі, а точніше густини палива, яка для дизельних палив при 20°C лежить в межах 840...860 кг/м³, а для важких до 980 кг/м³ [1, 2].

1.1. Дизельні енергетичні установки морських суден і системи, що забезпечують їх роботу

До суднових МОД відносяться двигуни, що забезпечують частоту обертання колінчастого валу у діапазоні 70...250 об/хв. Передача потужності та крутного моменту на гвинт в цих СЕУ виконується лише завдяки валопроводу, при цьому гвинт обертається з тією же потужністю, що і ГД. МОД виконують функції виключно ГД та встановлюються на судах середньої та великої водотоннажності.

До суднових СОД відносяться двигуни, частота обертання колінчастого вала яких на номінальному режимі складає 300...1000 об/хв. У разі використання СОД як ДД колінчастий вал дизеля безпосередньо з'єднаний з ротором електрогенератора і їх частоти обертання збігаються. Якщо СОД виконує функції ГД колінчастий вал дизеля і гребний вал з'єднані редукторною передачею, що забезпечує знижену частоту обертання гребного гвинта в порівнянні з частотою обертання колінчастого вала двигуна. СЕУ з СОД в якості ГД застосовуються в світовому суднобудуванні вже багато років. Однак через високі питомі витрати палива, малу циліндрову і агрегатну потужності і недостатньою надійності і довговічності СОД довгий час не могли конкурувати з МОД [3].

Протягом 70...80-х років минулого століття провідними дизелебудівному компаніями велася інтенсивна дослідницька та проектно-конструкторська робота, спрямована на переклад СОД на дешеві важкі палива, підвищення їх циліндрової і агрегатної потужності, зниження емісії випускних газів, зниження питомої витрати палива. Паралельно вирішувалися завдання щодо підвищення надійності і довговічності двигунів. Результат цих послідовних кроків – поява принципово нових СОД здатних, в першу чергу, працювати на високов'язких сортах палива і характеризуються агрегатної потужністю в

межах 30000 кВт і вище. Найбільшого поширення подібні дизелі отримали на пасажирських судах, контейнеровозах малого і середнього водотоннажності, а також на спеціалізованих судах (морських і океанських буксирах, рефулерних судах, судах забезпечення нафтовидобувних платформ і ін.), де вони використовуються в складі дизель-редукторних агрегатів з відбором потужності для приводів електроагрегатів, гідронасосів та інших суднових механізмів [4, 5].

Суднові СОД випускаються усіма дизелебудівному фірмами: Daihatsu Diesel, Hyundai Heavy Industries, MaK-Caterpillar, MAN-B&W, Metsui Iron Works, Mitsubishi Heavy Industries, SEMT Pielstick, The Hanshin Diesel Works, Wartsila-Sulzer, Yanmar з числом циліндрів від 4 -х до 20-ти (в V-образному виконанні) і циліндровою потужністю від 15-ти до 1400 кВт [6].

Для забезпечення суднових дизелів (як головних, так і допоміжних) паливом, мастилом, водою і повітрям, а також для видалення відпрацьованих газів СЕУ обладнають системами: паливної, мастильної, водяного охолодження, стисненого повітря, газовипуска. Названі системи забезпечують подачу палива до паливних насосів високого тиску (ПНВТ) дизелів і його подальший впорскування в циліндр; подачу мастила на змащення і охолодження вузлів тертя; подачу охолоджуючих рідин для відводу теплоти від нагрітих деталей, подачу стисненого повітря для пуску і реверсу двигуна; подачу свіжого повітря для здійснення робочого циклу і очищення циліндра від продуктів згоряння.

До складу систем входить велика кількість допоміжного обладнання, що виконують транспортування палива, мастила і води від прийомних танків до відповідних контурів дизеля із забезпеченням і підтримкою їх якісних характеристик. Тривалий відрив судна від берегового постачання вимагає створення спеціальних сховищ палива, мастила, прісної води. Крім того, для забезпечення живучості та непотоплюваності судна, а також життєдіяльності обслуговуючого персоналу і для виконання властивих судну операцій в

машинно-котельному відділенні (МКВ) встановлюються механізми і пристрої загальносуднових систем, які в тій чи іншій мірі можуть бути пов'язані з системами, що обслуговують головний і допоміжні дизелі. Порушення функціонування елементів систем СЕУ або вихід їх з ладу може привести до зниження ефективності її роботи або до аварії двигунів, що, в свою чергу, може спричинити за собою зниження ходових характеристик судна аж до його зупинки. Подібні ситуації особливо небезпечні в місцях активного судноплавства (морських протоках, каналах, акваторіях портів), а також в несприятливих погодних умовах [7].

Найбільш розгалуженою і насиченою за своїм складом є паливна система, яка складається з систем високого і низького тисків. Паливна система низького тиску призначена для підготовки і подачі палива до паливної системи високого тиску і включає цистерни, фільтри, насоси, змішувачі, сепаратори, підігрівачі, різні спеціальні пристрої і паливопроводи. Паливна система високого тиску забезпечує впорскування палива в камеру згорання двигуна і включає ПНВТ і форсунку, зазвичай з'єднані паливопроводом високого тиску. При застосуванні насос-форсунок паливопровід високого тиску відсутній, а в разі установки на дизелі сучасних систем common-rail нагнітання палива до форсунок відбувається із загальної магістралі.

Мастильна система служить для подачі мастила до вузлів і деталей дизеля, що працює в умовах тертя. Мастильна система забезпечує: прийом і зберігання мастила, очищення його від води і механічних домішок в фільтрах і сепараторах, охолодження в охолоджувачі мастило. Суднові СОД комплектуються циркуляційними системами змащування, що забезпечують подачу мастильного матеріалу як до підшипників колінчастого вала, так і безпосередньо на дзеркало циліндрової втулки.

Системи водяного охолодження призначені для підтримки необхідного теплового режиму роботи дизеля шляхом відведення теплоти від таких його

вузлів як кришка циліндра, випускний клапан, циліндрична втулка (при цьому використовується прісна вода), а також для охолодження наддувочного повітря в повітроохолоджувачі (за допомогою забортної води). Системи охолодження прісною водою для сучасних дизелів виконуються тільки в замкнутому вигляді, в яких вода циркулює по замкнутому контуру, а її охолодження відбувається за допомогою забортної води, що циркулює по відкритому контуру.

З огляду на, що переважна більшість суднових СОД виконуються нереверсивними, система стисненого повітря використовується тільки для їх пуску (що, тим не менш також важливо і актуально, оскільки саме ДД забезпечують електроенергією всі допоміжні механізми обслуговують введення в дію і роботу ГД).

1.2. Аналіз схем підготовки палива для суднових дизелів

Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) в 1987 році були розроблені і затверджені стандарти на паливо DP-8216 і DP-8217. Дані стандарти ISO кожні 5 років піддаються перегляду і в них вносяться необхідні корективи. У 2010 році на вимогу Міжнародної морської організація (IMO) ISO підготувала специфікацію морських сортів палива, що відповідає переробленому Додатку VI Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (МАРПОЛ). В даний час дані стандарти позначаються як ISO 8216-1: 2010 і ISO 8217: 2010 і визначають 4 марки дистилатів і 6 марок залишкових суднових палив. Дистилатні палива: газойль DMA, чисте дизельне паливо DMB і DMZ (з великим значенням мінімальної в'язкості), паливо DMX, призначене для використання в зовнішньому аварійному обладнанні. В'язкість цієї групи палив при 40°C становить

1,4...2,5 мм²/с (сСт). Залишкові палива: RMA, RMB, RME, RMG, RMH, RMKG, в'язкість яких при 50°C лежить в межах 180...700 мм²/с (сСт) [8].

В останні роки на транспортних суднах для СОД все ширше застосовуються важкі сорти палива високої в'язкості, що мають більш низьку вартість [3, 9]. Згідно з вимогами таких провідних фірм, що будують дизелі, як Wartsila-Sulzer, MAN-B&W суднові СОД повинні надійно експлуатуватися на всіх режимах (в тому числі на пускових і перехідних) при використанні палив з в'язкістю до 380 мм²/с. Перспективи розвитку транспортного суднобудування із застосуванням СОД в світовій практиці тісно пов'язані з використанням подібних видів палива. При цьому слід зазначити, що важкі сорти палива використовуються для роботи як головних СОД, що передають свою потужність на рушій, так і допоміжних, які є приводом електричних генераторів двигунів. Крім того, в суднову практику чітко простежується тенденція використання важких сортів палива не тільки для сучасних моделей СОД, а й перекладу СОД попередніх моделей (спроектованих з умовою роботи на легких сортах палива) на експлуатацію на паливі з підвищеною в'язкістю [10].

При роботі СОД на високов'язких залишкових паливах спостерігається відхилення від нормального процесу згорання в циліндрі, викликане зміною параметрів подачі палива. Істотно збільшується тиск уприскування і змінюються фази подачі палива, причому ці відхилення тим значніше, чим вище в'язкість палива. Важкі сорти палива в порівнянні з дизельними характеризуються більш низьким цетановим числом, що призводить до збільшення періоду затримки запалення при їх згоранні. Внаслідок цього до початку займання в циліндр дизеля подається кілька більшу кількість палива, що обумовлює збільшення питомої витрати палива і більш жорстку роботу дизеля. Важке паливо згорає повільніше ніж дистилатне, має більший процес догорання, що сприяють збільшенню температури відпрацьованих газів.

Зміна процесу згоряння викликає і більш високу, ніж при роботі на дизельному паливі, теплову напруженість циліндра [2].

Традиційно експлуатація суднових МОД на сталих режимах роботи проводиться на важких сортах палива. Температура повітряного заряду в циліндрі дизеля в момент впорскування палива, а також тривалий період часу, який припадає на його займання, дозволяє надійно використовувати в цих типах дизелів паливо погіршеної структурного і фракційного складу. Час експлуатації МОД на легкому паливі, а також на суміші легкого і важкого палива визначається їх роботою на пускових режимах і залежить від призначення судна. Природно, що в разі роботи в прибережних районах і частих портах заходу, коли експлуатація ГД відбувається на режимах пуску і реверсу, час роботи дизеля на легкому паливі підвищується, як підвищується і його витрата. При тривалих переходах експлуатація ГД відбувається тільки на важких сортах палива, причому час такої роботи може досягати кілька десятків діб, що істотно знижує загальні витрати легкого палива.

Експлуатаційні режими роботи суднових СОД забезпечуються як важкими, так і легкими сортами палива [11]. Використання мало-в'язкого палива обумовлено необхідністю забезпечення його надійного самозаймання протягом коротшого (в порівнянні з МОД) періоду впорскування, тривалість якого оцінюється за виразом

$$\tau = \frac{\varphi_d}{6n}, \text{сек,}$$

де n – частота обертання колінчастого вала дизеля, об/хв;

$\varphi_d = 15 \dots 35^\circ$ пкв – дійсна тривалість подачі палива в циліндр.

Частота обертання колінчастого вала сучасних суднових МОД може становити 80...100 об/хв, а мінімальне значення цього ж параметра для СОД – 450...500 об/хв. Це призводить до того, що навіть при підвищеній для СОД в

порівнянні з МОД тривалістю подачі палива в циліндр час впорскування палива і, відповідно, час його окислення, запалення і згоряння скорочується в 3...4 рази. Ще однією причиною використання в СОД легких сортів палива є їх часта робота на режимах пуску і часткового навантаження [12, 13]. При цьому частина теплової енергії, підведеної в процесі стиснення, втрачається через погано прогрітих поверхонь деталей ЦПГ, що істотно знижує температуру в циліндрі в момент впорскування палива і змушує використовувати палива з меншою температурою самозаймання.

Екологічні вимоги, що пред'являються до СЕУ в цілому і до суднових дизелів зокрема, змушують проводити їх експлуатацію на паливах з пониженим вмістом сірки. Згідно з вимогами Міжнародної конвенції MARPOL, в деяких особливих районах вміст сірки у використовуваному паливі не повинно перевищувати 0,1% [14, 15]. При цьому слід враховувати, що нафтопереробна промисловість в даний час ще не готова до виробництва необхідних обсягів палив з подібним змістом сірки, а на ринок надходить палива, фракційний склад яких містить до 3% сірки [16].

Застосування палива подібного фракційного складу погіршує якість процесу згоряння, що, в тому числі, призводить до підвищеного зносу деталей ЦПГ, циліндрових кришок, випускних клапанів, а також прогорання лопаток газотурбонагнетачів (ГТН) і елементів газовипускного тракту. Аналіз даних по експлуатації суднових СОД, показує, що знос їх ЦПГ при роботі на залишкових сортах палива приблизно в 2,5 рази більше в порівнянні з використанням дистилатів дизельних палив. У тій же пропорції скорочується період між моточісками дизелів. Перш за все, високий знос і надмірне нагароутворення обумовлюється значним погіршенням групового і хімічного складу подібного палива.

Використання важких палив в суднових СОД вимагає створення систем паливопідготовки і забезпечення таких режимів їх експлуатації, які здатні

нейтралізувати шкідливі впливи фізико-хімічних властивостей і домішок палива на надійність, довговічність і економічність дизеля.

Збільшення в'язкості палива в процесі експлуатації СОД не робить помітного впливу на його розпилювання, сумішоутворення і згоряння в циліндрі дизеля, тому що відповідним підігрівом можна домогтися оптимальної в'язкості палива (5...12 сСт) перед його надходженням в циліндр дизеля. Дизелебудівному фірми рекомендують верхня межа в'язкості палива для судових СОД 20... 25 сСт при 50°C [6, 10].

Практично в СОД можуть бути використані палива з в'язкістю до 380 сСт. Однак, в'язкість палива побічно характеризує його груповий і хімічний склад. Палива з підвищеною в'язкістю, як правило, характеризуються підвищеним вмістом ароматичних вуглеводнів, асфальто-смолистих речовин і золи. Крім того, з підвищенням в'язкості потрібно більший підігрів палива, що ускладнює паливопідготовки і збільшує витрати не тільки на підігрів, а й транспортування і бункерування [17, 18].

1.3. Аналіз зміни експлуатаційних властивостей палив при їх підготовці

Експлуатаційні властивості палив оцінюються показниками, що характеризують процеси подачі, сумішоутворення, згоряння, а також здатність викликати утворення нагарів і зношування в деталях дизеля. Різні джерела визначають різні експлуатаційні властивості палива, при цьому всі вони до основних показників відносяться наступні: фракційний склад, температури спалаху, займання і самозаймання, цетанове число, густина, в'язкість, температури помутніння і застигання, вміст механічних домішок,

алюмосилікатів, води, коксу і асфальтенів, солей натрію і оксидів ванадію, зольність, вміст сірки; кислотність, теплота згорання [19].

1.3.1. Фракційний склад суднових палив

Фракційний склад палива визначається кількістю тих чи інших нафтових фракцій у відсотках за обсягом, що википають при певних температурних межах. Фракційний склад визначають шляхом перегонки палива. Фракційний склад палив є одним з найважливіших показників його якості, який дає можливість оцінювати випаровуваність його парів і висловлює залежність між температурою і кількістю переганяють при цій температурі палива. Фракційний склад (від якого залежить займистість палива на пускових режимах і особливо в умовах екстреного пуску) важливий при використанні палива в суднових СОД, в яких згорання відбувається за менший проміжок часу.

Товарні сорти палив зазвичай отримують змішування продуктів прямої перегонки нафти з продуктами її вторинної переробки. Прямогонні дистиляти нафти (бензини, легроїни, газ, газойлі) отримують шляхом нагрівання і випаровування нафти при атмосферному тиску. Нафтовий залишок – прямогонний мазут, що містить фракції нафти, скипає при температурі понад 300...350°C – використовується для отримання масляних погонів і є компонентом товарних сортів мазуту, а також, поряд з іншими прямогонними дистилятами нафти, служить сировиною для вторинної переробки нафтопродуктів. Вторинна переробка нафти, метою якої є отримання з нафти додаткової кількості світлих нафтопродуктів і поліпшення окремих показників прямогонних дистилятів, здійснюється при високих температурах 500...700°C і тиском 5...7 МПа методами термічного або каталітичного крекінгу,

гідрокрекінгу і ін. Отримані в результаті цих процесів нафтопродукти відрізняються від прямогонних значною зміною групового і хімічного складу в слідстві деструкції (розпаду) вуглеводнів [9, 20].

У дистилятів продуктах крекінгу, особливо в залишкових крекінг-мазутах, міститься велика кількість ненасичених і ароматичних вуглеводнів і не вуглеводневого з'єднань, а в частці залишкових палив, (як прямогонних, так і отриманих вторинної переробкою) крім того, підвищена кількість мінеральних домішок.

Високов'язкі паливо має і більш складний фракційний склад. Важкі палива, які використовуються для МОД і СОД, отримують, як правило, компаундуванням залишкових палив, що містять фракції, киплячі при температурі 400...500°C з дизельними паливами, температура кипіння яких 200...300°C. Останні додають в паливо для отримання необхідної в'язкості і зниження температури застигання, що і визначає фракційний склад високов'язкого палива.

Широкий фракційний склад для палива, використовуваного в СОД і особливо в ВОД, викликає погіршення якості розпилювання, випаровування і сумішоутворення. Крім того, при цьому зменшується повнота згорання палива і, як наслідок, збільшується його питома витрата [21, 22].

Для палив, які використовуються в СОД з частотою обертання до 500 об/хв, температурні межі кипіння не мають важливого значення, тому вони не регламентовані стандартами. Час, відведений на сумішоутворення і горіння, досить для повного згорання палива найширшого фракційного складу. Однак застосування палива з можливо більш вузьким фракційним складом сприяє рівномірному випаровуванню крапель в період самозаймання та інтенсивному розвитку полум'я в період горіння палива в циліндрі дизеля.

1.3.2. Елементний склад палива

Розшифрувати, тобто ідентифікувати «повний» хімічний склад суднового палива сучасними засобами поки не представляється можливим (оскільки в даний час отримують і вивчають хімічний склад нафти тільки до температур кипіння вузьких фракцій в максимальних межах 500...580°C), тому хімічний склад нафтових палив виражають двома способами – елементним хімічним складом і груповим хімічним складом [10].

Елементний хімічний аналіз палив не розкриває хімічної природи входять в них сполук і тому не може дати досить повного уявлення про їх властивості, але дозволяє розрахувати тепловий і матеріальний баланс горіння палива. Елементний хімічний склад – кількісний склад хімічних елементів, що входять в паливо, виражений в масових частках або масових відсотках. Число хімічних елементів в складі палива дуже велике, але, не дивлячись на це, елементний хімічний склад палива виражається залежністю

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100\%,$$

яка визначає його основні горючі речовини: вуглець С, водень Н, сірку S, а також кисень О і азот N, що знаходяться в складних високомолекулярних з'єднаннях, і негорючі мінеральні домішки, що перетворюються при спалюванні палива в золу А і вологу W.

Основний горючої складової палива є вуглець, горіння якого обумовлює виділення основного кількості тепла. Вуглець міститься в паливах різного складу в кількості 83...88% по масі, причому чим важче нафту по густини і фракційним складом, тим вищий вміст вуглецю. Вуглець входить до складу всіх хімічних сполук палива.

Другим за процентним вмістом в паливі є водень, який становить 10...14% маси палива, в більш важких паливах водню менше. Також як і вуглець водень є складовою частиною всіх хімічних сполук палива. Водень і вуглець є основними горючими елементами палива і носіями теплової енергії.

Сірка входить до складу численної групи сірковмісних гетероатомних з'єднань. Палива сильно відрізняються за змістом сірки: в мало-сірчистих сірка становить 0,01...0,5 % по масі, а в високо-сірчистих до 3,5 % за масою. У висококиплячих фракціях нафти (вище 400°C) сірки зазвичай міститься значно більше, ніж в низькокиплячих. Сірка є одним з небажаних елементів палива [23].

Азот в паливі міститься в значно менших ніж сірка кількостях (0,01...0,6 % по масі і лише в окремих випадках до 1,5 % по масі). Азотовмісні сполуки концентруються в основному у важких фракціях нафти (вище 400°C).

Кисень в паливі представлений у вигляді карбонових і нафтових кислот, зміст його може бути від 0,05 до 0,85 % по масі. Кисень концентрується у важких фракціях нафти і є небажаним елементом.

Кисень і азот в паливі є органічним баластом, так як їх наявність зменшує вміст горючих елементів в паливі. Крім того, кисень, перебуваючи в поєднанні з воднем або вуглецем палива, переводить деяку частину горючих компонентів в окислюється стан і зменшує теплоту згоряння палива. Азот при спалюванні палива в атмосфері повітря не окислюється і переходить в продукти згоряння у вільному вигляді.

Структурний склад палива визначає одну з основних його характеристик – нижчу теплоту згоряння $Q_{\text{н}}$, чисельне значення якої може бути визначено за формулою Д.І. Менделєєва

$$Q_H = 339,15C^P + 1256H^P - 108,86(O^P - S^P) - 25,12(9N^P + W^P)$$

Від нижчої теплоти згорання палива Q_H залежить його питома ефективна витрата b_e

$$b_e = \frac{3600}{\eta_e \cdot Q_H},$$

де η_e – ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) дизеля.

При фіксованому значенні ефективного ККД $\eta_e=0,45$ зміна структурного складу палива призводить до наступних змін нижчої теплоти згорання і питомої ефективної витрати палива (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Вплив структурного складу палива на його нижчу теплоту згорання і питома ефективна витрата

Зміна структурного складу палива					Q_H , кДж/кг	b_e , кг/(кВт·год)
C^P	H^P	S^P	O^P	W^P		
87,0	11,3	1,0	0,4	0,3	41203	0,194
87,5	11,1	1,0	0,4	0,3	41870	0,191
87,2	12,6	0,1	0,05	0,05	42556	0,188

1.3.3. Груповий склад палива

Хімічний склад нафтових палив прийнято характеризувати вмістом основних груп вуглеводнів та інших сполук [23].

Важливим компонентом як сирової нафти, так і продуктів нафтопереробки є сірка і сірковмісні сполуки. Сірка в сирової нафти знаходиться в зв'язаному

вигляді в кількості від 0,02 до 6% за масою. За змістом загальної сірки нафту умовно поділяється на мало-сірчисту (до 0,5%), сірчисту (0,5...1,9%) і високо-сірчисту (1,9...3% і більше) [24].

Використання в дизелях палива з високим вмістом смол вимагає більш досконалої організації паливо-підготовки, процесів розпилювання і сумішоутворення, ніж при роботі на малосмолистих паливах. Смоли служать основним джерелом відкладень у вигляді опадів і шламу в цистернах, трубопроводах і фільтрах; лакових плівок на плунжерних парах ПНВТ і голках форсунок; коксу у соплових отворів форсунок; лаків і нагару на деталях ЦПГ. Смоли значно погіршують деемульгуючі властивості палива, при їх високому вмісті створюються стійкі водопаливної емульсії. Непрямим показником вмісту смол та інших високомолекулярних сполук в паливі служить його коксованість, яка регламентується стандартами на паливо.

Мінеральні домішки, що знаходяться в нафтопродуктах, в залежності від походження можна розбити на дві групи. До першої групи належать забруднення, що потрапляють в паливо в процесі переробки, транспортування, зберігання і застосування. Сюди відносяться продукти корозії і зносу технологічного устаткування нафтопереробних установок, цистерн, трубопроводів, а також ґрунтова пил і мінеральні солі, що потрапляють в паливо з води при промиванні товарних продуктів або при обводнюванні палива в процесі зберігання і використання. Велика частина мінеральних домішок першої групи відділяється при відстоюванні, сепарації і фільтрації палива. Другу, значно меншу групу, складають зольні елементи нафти, що перейшли в товарні сорти палива в процесі її переробки. У золі нафтових палив міститься велика кількість елементів (понад 25), головним чином солей металів, які в сирій нафті знаходяться в розчиненому вигляді або колоїдному стані.

1.4. Аналіз впливу експлуатаційних властивостей палива на технічні характеристики суднового дизеля

В останні роки практично у всіх сучасних суднових СОД використовуються середньо- і високов'язкі палива. У зв'язку з цим змінилися і вимоги до якості палива, стало більшою мірою виявлятися вплив експлуатаційних властивостей палива на ефективність його використання, яка, в свою чергу, знаходиться в прямій залежності від якості його підготовки до спалювання в дизелі.

Дослідження з питань можливості застосування в суднових СОД палив погіршеної фракційного складу розвиваються за наступними напрямками:

- застосування спеціальних присадок (антиокислювальних, для запобігання окислювальних процесів і скорочення освіти опадів при зберіганні палива; диспергируючих, для запобігання утворення асфальто-смолистих агломератів; деемульгуючих, для протидії утворенню стійких водопаливних емульсій);
- застосування багатоступеневої фільтрації з додатковою гідродинамічної обробкою;
- застосування методів магніто-і електродинамічної обробки;
- оснащення дизелів пристроями, що забезпечують застосування більш вузького палива.

Для забезпечення якісної паливо-підготовки і подальшого ефективного паливо використання, новоспоруджувані судна комплектуються спеціальними системами підготовки і подачі палива, а паливні системи дизелів діючих судів переобладнуються з урахуванням можливості застосування середньо- і високов'язкого палива.

Аналіз працездатності основних вузлів і деталей дизелів показує, що від якості палива залежить робота, головним чином, деталей ЦПГ, паливної

апаратури та випускних клапанів [25, 26]. У таблиці 1.2 показано розподіл відмов по основних вузлів дизелів фірм MAN-Diese&Turbo і Wärtsilä-Sulzer.

Таблиця 1.2.

Розподіл відмов по основних вузлах дизелів

Найменування вузла чи деталі	Відношення відмови кожного вузла до усіх відказів	
	MAN-Diese&Turbo	Wartsila-Sulzer
Циліндрові кришки	9,7	10,3
Деталі ЦПГ	16,3	14,3
Випускні клапани	19,7	18,3
Підшипники руху	5,3	6,1
Паливна апаратура	22,4	23,6
ГТН	5,2	5,5
Механізми и системи обслуговування дизелів	14,8	13,7
Інші вузли і деталі	6,6	8,2

Як впливає з таблиці 1.2, найбільшу кількість відмов припадає на деталі ЦПГ, паливну апаратуру і випускні клапани. Неважко припустити, що це, перш за все, пов'язано з якістю підготовки палива та забезпеченням його згоряння. На стан цих деталей основний вплив роблять містяться в паливі механічні домішки (карбони, карбоїди і частки неорганічного походження), меркаптанової сполуки сірки, вода (особливо морська) і різні солі, які при згорянні переходять в золу. При цьому слід враховувати той факт, що існуючі системи паливопідготовки не в змозі здійснити повну і комплексну очистку палива від всіх перерахованих домішок. Досить ефективним можна вважати лише вирішення питання щодо зниження в паливі механічних домішок і води, і в меншій мірі питання видалення золи, а практично невирішеним – видалення сірки [27].

1.5. Аналіз методів підготовки палива до його використання

Аналіз досліджень з підготовки суднового палива до його спалювання в циліндрі дизеля показує, що традиційними методами очищення палива є відстоювання, сепарації і фільтрація, основним завданням яких є видалення з нього води, механічних домішок і золи. Це завдання сформулювалася в результаті аналізу впливу домішок, що знаходяться в паливі, на показники роботи дизеля і тих методів і засобів паливо-підготовки, якими володіє більшість СЕУ [7, 21].

Відстоювання палива, як метод очищення палива від механічних домішок і води, здійснюється під дією сили тяжіння за рахунок більшої густини забруднюючих частинок.

В цьому випадку забруднюючі частки в паливі осідають, не стикаючись між собою, і на кожен з них діють сила тяжіння або власну вагу, підйомна сила середовища і сила опору середовища:

- вага

$$P = \frac{\pi d^3 g \rho_{\text{ч}}}{6},$$

де d – середній діаметр частинки забруднення, прийнятої за сферичний об'єкт, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$\rho_{\text{ч}}$ – густина механічних домішок або води, кг/м³;

- підйомна сила середовища, що визначається згідно із законом Архімеда,

$$F_{\text{А}} = \frac{\pi d^3 g \rho_{\text{т}}}{6},$$

де ρ_T – густина палива, кг/м^3 ;

• сила опору середовища, яку в загальному випадку можна обчислити за законом Ньютона

$$F_H = \frac{\zeta \pi d^2 \rho_T \omega_o^2}{8},$$

де ζ – коефіцієнт опору, що залежить від числа Рейнольдса і визначається дослідним шляхом, залежно від швидкості частинок;

ω_o – швидкість осідання частинок, м/с .

Якщо частинки падають в в'язкої рідини під дією власної ваги, то стала швидкість досягається, коли ця сила тертя спільно з силою Архімеда точно врівноважуються силою гравітації. Хоча в класичній формулюванні закон Архімеда виконується тільки в статичному випадку, а не для рухомих тіл, в даному випадку вираз для сили Архімеда зберігає традиційний вид.

При усталеному русі умова рівноваги може бути записано так:

$$P - F_A = F_H.$$

Тоді швидкість осідання твердих частинок в паливі визначається за виразом

$$\omega_o = \sqrt{\frac{4(\rho_q - \rho_T)gd}{3\rho_T\zeta}},$$

з якого видно, що швидкість осідання забруднень в паливі залежить, перш за все, від різниці густини забруднень і палива і розміру часток.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених осідання частинок в гравітаційному полі, універсальної залежності для обчислення коефіцієнта

опору ζ немає. В окремому випадку, при русі, частинок, що мають форму кулі, в в'язкої нестисливої рідини коефіцієнт опору може бути прийнятий:

для ламінарного режиму

$$\zeta_{\text{л}} = \frac{0,24\mu_{\text{т}}}{\omega_{\text{o}} d \rho_{\text{т}}};$$

для перехідного режиму

$$\zeta_{\text{п}} = 10 \sqrt{\frac{\mu_{\text{т}}}{\omega_{\text{o}} d \rho_{\text{т}}}};$$

для турбулентного режиму

$$\zeta_{\text{т}} = 0,5,$$

де $\mu_{\text{т}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості палива, Па·с.

З урахуванням виразу для $\zeta_{\text{л}}$ отримаємо розрахункову залежність для швидкості осідання частинок в ламінарному потоці (при $Re < 1$), тобто

$$\omega_{\text{o}} = \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{т}})gd^2}{18\mu_{\text{т}}}.$$

Для визначення швидкості осідання емульгованої води в паливі з урахуванням в'язкості води можна використовувати формулу

$$\omega_{\text{o}} = \left(\frac{(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{т}})d^2}{18\mu_{\text{т}}} \right) \left(\frac{3(\mu_{\text{т}} - \mu_{\text{в}})g}{(3\mu_{\text{т}} + 2\mu_{\text{в}})} \right),$$

де $\mu_{\text{в}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості води, Па·с.

Дійсна швидкість осідання частинок в паливі відрізняється від розрахункової, так як важко точно визначити густину забруднення і коефіцієнт опору який багато в чому залежить від режиму осідання.

Причиною розбіжності розрахункових і дійсних швидкостей осідання частинок при очищенні палива відстоюванням так само є і конвективні струми, що виникають в ємностях, призначених для відстоювання палива, внаслідок зміни температури зовнішнього повітря.

Основні недоліки очищення палива відстоюванням – це тривалість процесу і неможливість видалити дрібнодисперсні забруднення. Відстоювання є найпростішим методом очищення палива. В даний час він втрачає своє значення і застосовується в якості самостійного методу - лише для палива з в'язкістю до 20 сСт і в якості допоміжного для більш сучасних способів. Якість відстоювання залежить від часу процесу, температури, висоти стовпа і густини палива, стану моря. Інтенсивність процесу відстоювання може бути проілюстрована діаграмою, що показана на рис. 1.1.

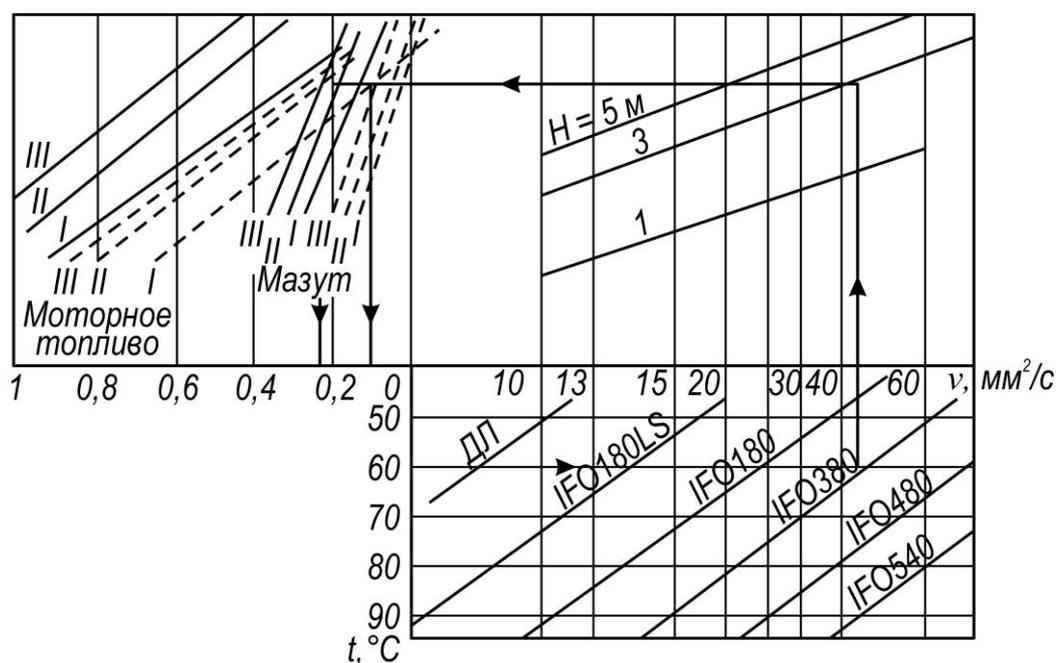


Рис. 1.1. Номограма відстоювання палива:

I – 8 год; II – 16 год; III – 24 год – час відстоювання;

--- вода; - механічні домішки

Ефективність відстоювання характеризується величиною коефіцієнта σ , що показує ступінь видалення з палива домішок.

Одним з основних методів очищення палива на суднах є сепарація, в процесі якої зменшується вміст механічних домішок, води і золаутворюючих солей. Ефективність очищення (повнота звільнення від домішок) методом сепарації різна для різних видів палива. Відрізняється вона і для різних партій палива одного і того ж виду. Основний вплив на ефективність очищення палива методом сепарації надає груповий склад, співвідношення дистилатів і залишкових компонентів, прийняте при його компаундування, і, нарешті, обраний режим сепарації.

При сепарації відділення домішок здійснюється за рахунок відцентрової сили, яка визначається за формулою:

$$F_{ц} = \frac{\pi d^3 \omega^2 r (\rho_{ч} - \rho_{т})}{6},$$

де ω – кутова швидкість; рад⁻¹;

r – радіус дії кутової швидкості, м.

На тяжіння частинок в паливі діє сила опору (сила тертя), так само звана силою Стокса F_c , яка підкоряється закону Стокса:

$$F_c = 3\pi d\eta v,$$

де η – динамічна в'язкість палива, Па·с;

v – швидкість частинки, м/с.

Максимальна тонкість відсіву за допомогою сепараторів $\approx 0,2...0,6$ мкм; при $Re \leq 200...300$. Результати досліджень [28] показують, що мало-в'язке паливо очищається з більшою ефективністю ніж високов'язкі. Так, вміст механічних домішок при сепарації палив з в'язкістю 50...100 сСт зменшується на 70...80%, з в'язкістю 180... 80 сСт – на 50...60 %, з в'язкістю понад 380 сСт

– на 20...40 %. Вміст води після процесу сепарації в мало-в'язких паливах зменшується практично на 100 %, в середньо-в'язких – на 95...100 %, в високов'язких – на 75...85 %. Зазначені рівні зниження механічних домішок і води супроводжуються втратами горючої частини палива, в основному важких її компонентів (асфальтенів і смол). Ці втрати можуть досягати 2...3 %, знижуючи пропорційно теплотворну здатність палива, що є істотним недоліком сепарації [29].

Внаслідок того, що сепарація середньо- і високов'язких палив проводиться при підігріві палива до 80...90°C, цей метод підготовки супроводжується посиленням окислювальних процесів, що підвищують вміст смолистих речовин. Крім втрат теплотворної здатності палива і посилення окислювальних процесів, істотним недоліком сепарації є його мала ефективність зі зміни дисперсності механічних домішок (карбенів, карбоїдів і частинок неорганічного походження) які містяться в паливі [30]. При зменшенні загальної кількості частинок механічних домішок відносна густина розподілу решти в паливі частинок менших розмірів практично не змінюється. Таким чином, сепарація тільки знижує ймовірність відмов у роботі вузлів двигуна, але не виключає їх повністю.

Очищення палива шляхом фільтрації здійснюється на всьому шляху його проходження з танків до дизелю. Засоби фільтрації палива при цьому діляться на дві основні групи: самоочищаються фільтраційні установки і паливні фільтри. Прикладом використання додаткових фільтруючих елементів в системі паливопідготовки суднових дизелів може служити схема, рекомендована корпорацією MAN-B&W (рис. 1.2) [31].

У суднових системах паливо-підготовки також використовувалися альтернативні способи, що забезпечують поліпшення якості високо-сірчистих палив. До таких способів насамперед належать використання гомогенізації, застосування водо-паливних емульсій, використання присадок до палива.

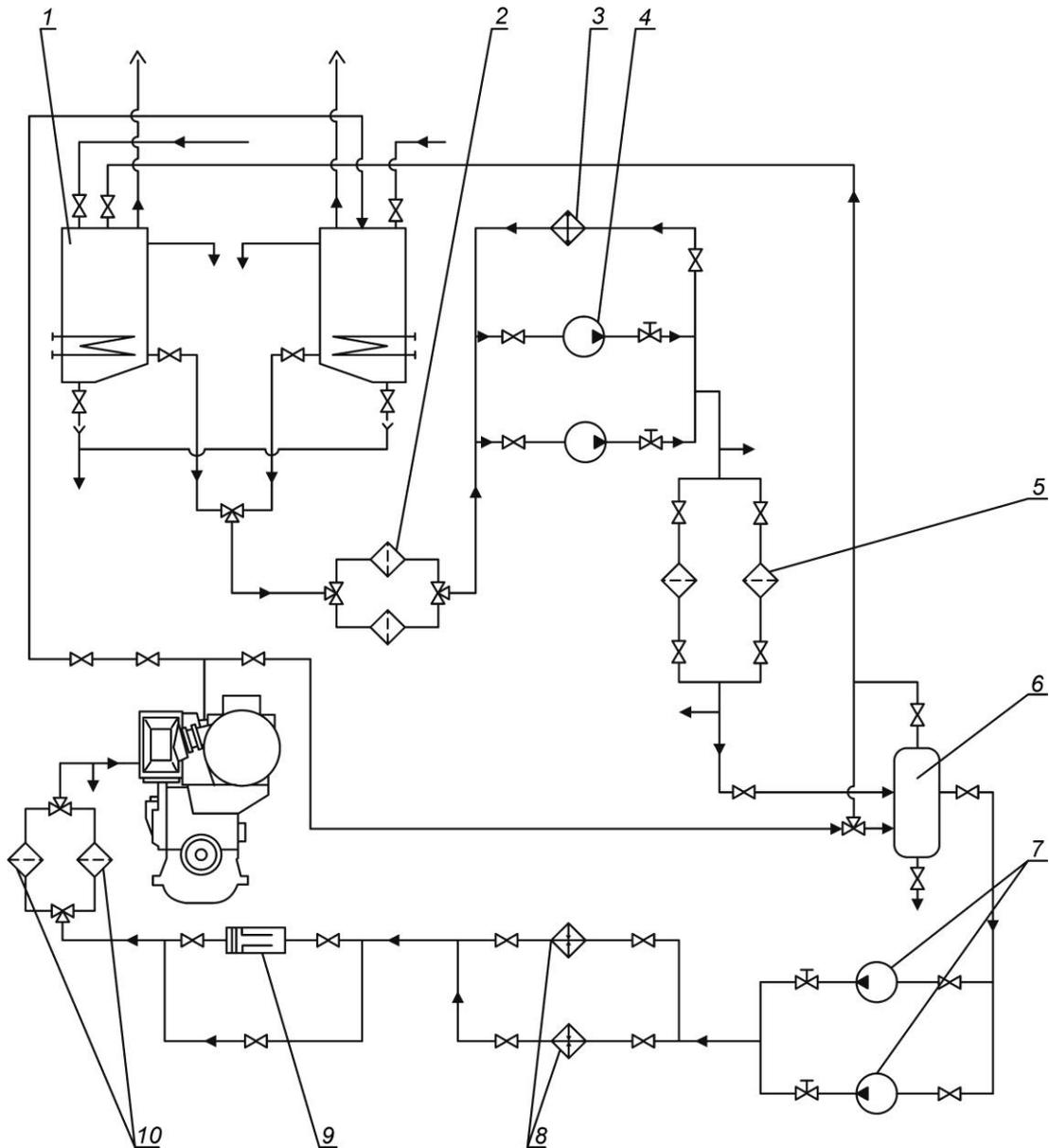


Рис.1.2. Витратна паливна система суднового дизеля:

- 1 - витратна цистерна важкого палива; 2, 10 - здвоєний фільтр;
 3 - охолоджувач палива; 4, 7 - насоси, що підкачують паливо;
 5 - автоматичний фільтр; 6 - змішувальна цистерна; 8 - паливний підігрівач;
 9 - регулятор в'язкості

Гомогенізація, як явище, що забезпечує підвищення однорідності палива, застосовувалася для додаткової підготовки високов'язких палив в поєднанні зі стандартними методами паливо-підготовки. Основною метою, рішення якої забезпечувалося при гомогенізації палива, була збереження

теплотворної здатності палива за рахунок зменшення утворення шламів і видалення з ним горючих складових палива. Однак широкого поширення на флоті гомогенізатори не отримали, хоча і випускалися як вітчизняними, так і зарубіжними виробниками. Перш за все це було викликано додатковими витратами енергії на її проведення, додатковими вібраційними навантаженнями, створюваними при гомогенізації на конструкції машинного відділення і суднові системи, а також необхідністю виконання регламентних робіт з обслуговування таких систем [10, 23].

Поліпшення якості палива і подальше вдосконалення процесу згоряння палива за рахунок застосування водо-паливних емульсій досягало свій ефект для дизелів середньої форсировки, з максимальним тиском циклу p_{max} не перевищує 8...9 МПа. Це було пов'язано з тим, що використання водо-паливних емульсій ґрунтувалося на «ефекті мікробибухів» впрорскуваних в циліндр разом з паливом частинок води. Ці частинки утворювали пару до моменту самозаймання палива, сприяючи збагаченню паливного факела додатковим киснем і підвищуючи тим самим інтенсивність згоряння палива [8]. Однак розвиток суднового дизелебудування і пов'язане з ним зростання p_{max} до 14...16 МПа і вище призвело до нівелювання ефекту «мікробибухів» і зараз використання водо-паливних емульсій, як і прямий впрорскування води в повітряну і газову магістралі, а також безпосередньо в циліндр дизеля, застосовується тільки з метою забезпечення екологічних параметрів роботи дизеля.

Застосування присадок до суднових палив також не має широкого поширення в судової практики і використовується лише в одиничних випадках фірмами, що самостійно виробляють такі присадки і мають в своєму підпорядкуванні морські судна [22]. При цьому слід визнати, що паливні присадки сприяють поліпшенню інтенсивності процесу згоряння палива, проте їх вплив на корозійний знос ЦПГ і екологічні показники роботи дизеля неоднозначно. Крім того, велика частина присадок до палива

не відрізняється високою стабільністю. Тому застосування присадок до палива малоефективне в разі їх розчинення як у відстійних, так і витратних цистернах, а вимагає додаткових дозуючих пристроїв, які забезпечують порційну подачу присадок в паливо безпосередньо перед потраплянням в циліндр дизеля, що ускладнює і без цього розгалужену систему паливопідготовки.

Одним з перспективних з точки зору використання у системах паливопідготовки суднових СОД (обсяги витратних цистерн та витратної паливної магістралі значно менш ніж у МОД) є ультразвукова обробки палива [10].

Питання ультразвукової обробки палива також розглядалися при проектуванні і модернізації систем паливопідготовки [26]. Однак цей вид паливопідготовки вивчався з точки зору створення стійких сумішей палива різної щільності і структурного складу, а його використання з метою зниження концентрації сірковмісних компонентів з паралельним впливом на корозійний знос і екологічні параметри роботи дизеля, взагалі не вивчалось.

Таким чином, незважаючи на велику кількість досліджень, виконаних як окремими вченими, так і науковими організаціями, переважна більшість з них стосується оптимізації стандартних способів підготовки палива, не виконуючи глибокого аналізу альтернативних способів вдосконалення систем обробки суднового палива.

1.6. Висновки по розділу 1

В результаті проведеного огляду літературних джерел встановлено наступне:

- в світовому дизелебудуванні (в тому числі і судновому) триває тенденція збільшення агрегатних потужностей суднових дизелів (МОД і

СОД), одночасно з підвищенням ефективних показників суднових дизелів ростуть енергетичні витрати, пов'язані із забезпеченням функціонування системи паливопідготовки і підтримки заданих експлуатаційних характеристик палива;

- суднова система паливопідготовки є системою, експлуатація якої прямо впливає на економічність роботи суднових СОД і енергетичну ефективність всієї СЕУ;

- управління процесами, що відбуваються в системі паливопідготовки, призводить до зміни структурних складових палива і сприяють поліпшенню енергетичних і економічних характеристик ДВЗ;

- широке застосування високов'язких палив в сучасних суднових СОД, а також переклад СОД попередніх моделей на подібні сорти палива вимагають створення спеціальних систем і технологій його обробки і підготовки до спалювання в циліндрі дизеля.

Наведені факти свідчать про необхідність досліджень, спрямованих на розробку алгоритмів і способів підвищення якості обробки палив, що використовуються в суднових дизелях.

2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Процес наукового пізнання

Наукове пізнання починається із спостереження навколишньої дійсності - природи, техніки, технологій і т.п. Процес наукового пізнання включає, щонайменше, п'ять етапів: спостереження, вивчення, дослідження, апробацію й підтвердження [32].

На етапі спостереження дослідник накопичує інформацію про явища й процеси навколишньої дійсності, не впливаючи на неї. Спочатку формується загальне враження про пізнаванність явищ або процесів, потім здійснюється угруповання фактів дійсності за певними важливими ознаками з наступним виділенням із цих груп проблемних (не зрозумілих або не очевидних) фактів дійсності [33].

Етап вивчення необхідний для вибору найбільш актуальної, принципової й вчасно розв'язуваної в результаті наступних досліджень, наукової проблеми або завдання.

При цьому необхідно спочатку спланувати й систематизувати дослідження в цьому напрямку.

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

Для посилення цілеспрямованості дослідження уточнюються його мета й завдання.

Головне завдання дослідження спрямоване на встановлення умов досягнення мети після одержання нових наукових результатів, що є наслідком рішення ряду допоміжних наукових завдань.

При постановці головного завдання дослідження виходять із необхідності доказу реальності передбачуваної наукової новизни [34].

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

Процес рішення головного завдання традиційно розділяється на ряд самостійних допоміжних завдань, результати рішення яких мають елементи наукової новизни. Наукові результати надалі використовуються при доказі передбачуваної наукової новизни дослідження [35].

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

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

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

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

2.2. Методологічні принципи наукових досліджень

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

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

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

2.3. Обґрунтування мети і завдань дослідження

Важливість проведення досліджень, пов'язаних з питаннями забезпечення якості підготовки палива для СДВЗ, підтверджується програмою економічних реформ, що проводяться в Україні, а також Транспортною стратегією України на період до 2030 р. Однією з цілей цього документа в області розвитку транспортного сектора економіки України на період до 2030 року, є модернізація транспортної інфраструктури і рухомого складу для забезпечення зростаючої мобільності населення та товаропотоків, забезпечення конкурентоспроможних та якісних транспортних послуг, підвищення екологічної і енергетичної ефективності транспортних процесів та безпеки перевезень пасажирів і вантажів.

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

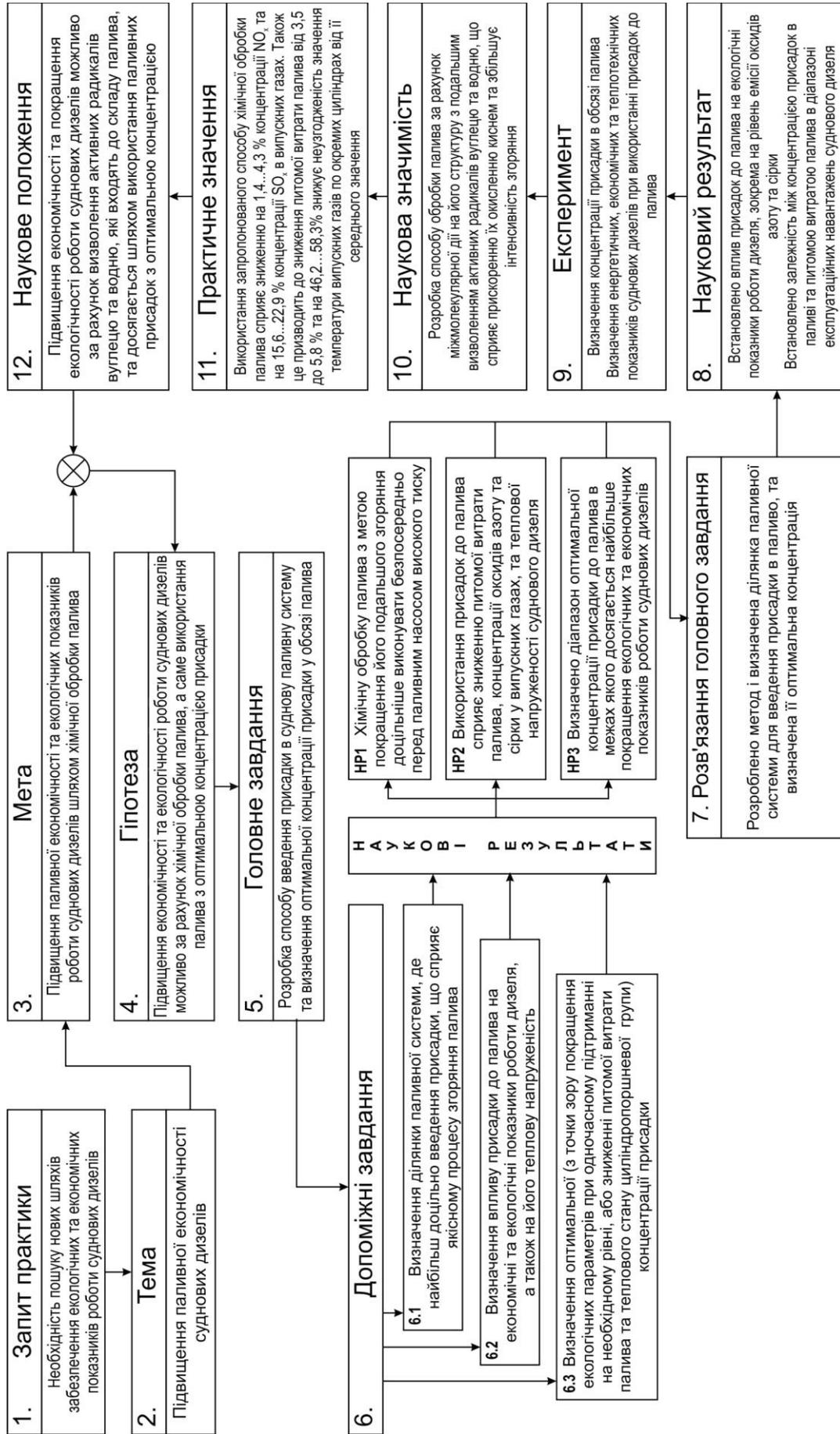


Рис. 2.1 – Технологічна карта наукового дослідження

Як **об'єкт дослідження** обрано процес паливопідготовки для суднових двигунів внутрішнього згорання.

Предметом дослідження є процес використання присадок до палива.

Актуальність теми дослідження базується на запиті практики про необхідність пошуку нових шляхів забезпечення екологічних та економічних показників роботи суднових дизелів.

З огляду на тему дипломної роботи, була сформульована **мета** магістерського дослідження – підвищення паливної економічності та екологічних показників роботи суднових дизелів шляхом хімічної обробки палива.

Гіпотеза наукового дослідження полягає в тому, що підвищення економічності та екологічності роботи суднових дизелів можливо за рахунок хімічної обробки палива, а саме використання палива з оптимальною концентрацією присадки.

Головне завдання магістерського дослідження полягає у розробці способу введення присадки в суднову паливну систему та визначення оптимальної концентрації присадки у обсязі палива.

Для вирішення головного завдання необхідне рішення ряду **допоміжних завдань**, а саме:

1) визначення ділянки паливної системи, де найбільш доцільно введення присадки, що сприяє якісному процесу згорання палива;

2) визначення впливу присадки до палива на економічні та екологічні показники роботи дизеля, а також на його теплову напруженість;

3) визначення оптимальної (з точки зору покращення екологічних параметрів при одночасному підтриманні на необхідному рівні, або зниженні питомої витрати палива та теплового стану циліндропоршневої групи) концентрації присадки.

При вирішенні кожної допоміжної завдання отримані відповідні **наукові результати**, а саме:

1) хімічну обробку палива з метою покращення його подальшого згоряння доцільніше виконувати безпосередньо перед паливним насосом високого тиску;

2) використання присадок до палива сприяє зниженню питомої витрати палива, концентрації оксидів азоту та сірки у випускних газах, та теплової напруженості суднового дизеля;

3) визначено діапазон оптимальної концентрації присадки до палива в межах якого досягається найбільше покращення екологічних та економічних показників роботи суднових дизелів.

Рішення головного завдання дисертаційного дослідження виконано шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань.

2.4. Висновки по розділу 2

1. В результаті вибору теми магістерського наукового дослідження за ознаками актуальності, наукової новизни, практичної значущості сформульована тема, спрямована на підвищення паливної економічності та екологічних показників роботи суднових дизелів шляхом хімічної обробки палива.

Об'єктом дослідження обрано процес паливopідготовки для суднових двигунів внутрішнього згоряння.

Предметом дослідження є процес використання присадок до палива.

2. Метою дослідження є підвищення паливної економічності та екологічних показників роботи суднових дизелів шляхом хімічної обробки палива.

3. Головне завдання магістерського наукового дослідження полягає у розробці способу введення присадки в суднову паливну систему та визначення оптимальної концентрації присадки у обсязі палива.

4. Рішення головного завдання магістерського наукового дослідження виконано на основі синтезу результатів допоміжних завдань. На базі системного підходу замкнутий цикл наукового дослідження представлений у вигляді технологічної карти дослідження.

3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСАДОК ДО ПАЛИВА В СУДНОВИХ ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

3.1. Механізм дії присадок на елементний склад палива

В даний час якість суднового моторного палива регламентує стандарт на палива DIS DP-8217, що був розроблений та затверджений міжнародною організацією зі стандартизації ISO у 1987 році та переглядається кожні 5 років. Він призначений як керівництво для постачальників палива, суднового обладнання та судновласників. Цей стандарт встановлює значення фізико-хімічних показників, що визначають якість палива, таких як фракційний склад, кінематична в'язкість, температура застигання, помутніння, спалахи, масова частка сірки, вміст водорозчинних кислот і лугів, концентрація смол, кислотність, зольність та інші [36]. Для забезпечення необхідних значень окремих фізико-хімічних показників на завершальній стадії виробництва палива у суміш дистилятної газойлевої фракції та продуктів, отриманих в результаті каталітичного крекінгу та гідрокрекінгу, вводяться присадки, що покращують одне або декілька властивостей палива [37].

Вивченню впливу паливних присадок на характеристики теплових двигунів присвячена велика кількість робіт, при цьому питання використання присадок розглядаються навіть в таких енергоємних і відповідальних областях енергетики, як ядерна [38].

Посилення вимог до експлуатаційних показників суднових енергетичних установок при одночасному збереженні вимог стандарту DIS DP-8217 обумовлює необхідність підвищувати якість палива шляхом використання присадок не тільки в процесі виробництва палива, а й у процесі експлуатації дизелів. Саме тому продовжуються активні дослідження з розробки сучасних присадок до палива. Присадки для палива поділяються на такі групи:

депресорно-диспергуючі; депресорні; диспергатори парафінів; протизносні (змашувальні); активатори займання; активатори горіння; багатофункціональні [39].

Механізм дії присадок «активаторів займання» полягає у легкому гомолітичному розпаді їх молекул по зв'язках O-O або O-N, у прискоренні передполум'яних реакцій, здатних до розгалуження окисних ланцюгів та утворення нових реакційних центрів. Присадки діють лише на початкових стадіях процесу горіння. В результаті збільшується здатність вуглеводнів до більш повного окислення (згорання), та реакція протікає в умовах, близьких до ідеальних.

На відміну від «активаторів займання», «активатори (каталізатори) горіння» сприяють виникненню сил вільного переходу, послабленню міжмолекулярних зв'язків та спрощенню просторової структури вуглеводнів. Структура палива стає більш однорідною, з рівномірним просторовим розташуванням вуглеводнів у всьому займаному обсязі.

Аналіз науково-технічної та патентної літератури свідчить, що розробленню присадок до палива приділяється велика увага як науково-дослідними, так і виробничими організаціями. Як присадки «активатори займання» рекомендовані наступні хімічні речовини та їх композиції: алкіл(C_3-C_{20})нітрат, полімер етилену або його сополімер з альфа-олефіном C_3-C_4 ; ненасичені жирні кислоти (група олеїнової, лінолевої, ліноленової кислот) або їх амід; алкіл(C_1-C_{25})сукцинімід, сополімер вищих ефірів C_6-C_{27} акрилової або метакрилової кислоти з етиленонасиченим мономером; окис пропілену; оксипропілований жирний спирт C_6-C_{16} ; сульфонат лужно-земельного металу, наприклад кальцію, барію, магнію тощо; нітрат аліфатичного спирту C_3-C_{18} ; парафінові вуглеводні нормальної будови із групи C_9-C_{20} .

На відміну від опису присадок у науково-технічній та патентній літературі, інформація про товарні присадки (вітчизняних або імпортованих), не

містить даних щодо їх хімічного складу та фізико-хімічного механізму впливу на процес згоряння палива та інші експлуатаційні показники дизелів. Тому визначення оптимальної концентрації присадки у палива та режимів, та експлуатаційних режимів, на яких більш доцільно їх використання, виконується дослідницьким шляхом.

Структурну схему палива для суднових дизелів можна представити у вигляді моноциклічних нафтоєвих вуглеводнів з довгими мало розгалуженими (рис. 3.1, а) або розгалуженими (рис. 3.1, б) бічними ланцюгами [40].



Рис. 3.1. Структурна схема палива для суднових дизелів:

а – малорозгалужений бічний ланцюг; б – розгалужений бічний ланцюг

Компонентний склад присадок більш ніж різноманітний, причому їх виготівники не означають їх активних елементів. При цьому загальна схема таких присадок може бути проілюстрована за допомогою рис. 3.2, де під символами R, R₁, R₂ маються на увазі речовини (наприклад, метали або їх солі), що спеціально вводяться до складу присадки. Основою таких присадок є бензолове кільце, яке легко розпадається, вивільняючи активні радикали [41].

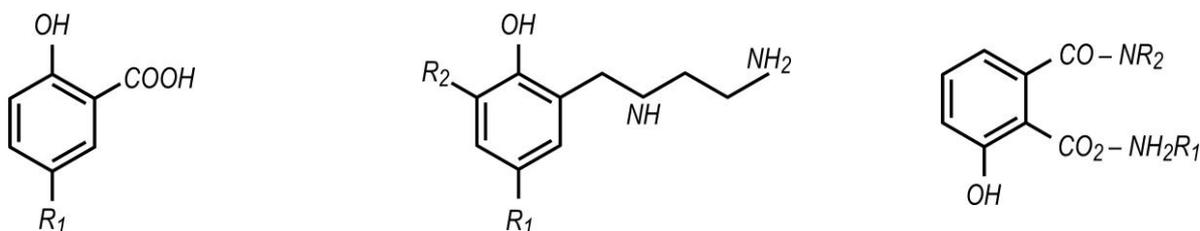


Рис. 3.2. Приклад структурної схеми паливних присадок

3.2. Технологія використання присадок до палива

Паливні присадки спрямовані на поліпшення експлуатаційних якостей палива, починаючи з його прокачиваемости і закінчуючи температурою займання. При цьому основними функціями паливних присадок є диспергування, підвищення мастильної здатності, активація процесу горіння. Місце введення присадок в паливну систему (рис. 3.3) розрізняється залежно від загальної комплектації системи, специфіки дизеля і завдань, на забезпечення яких спрямовано їх використання.

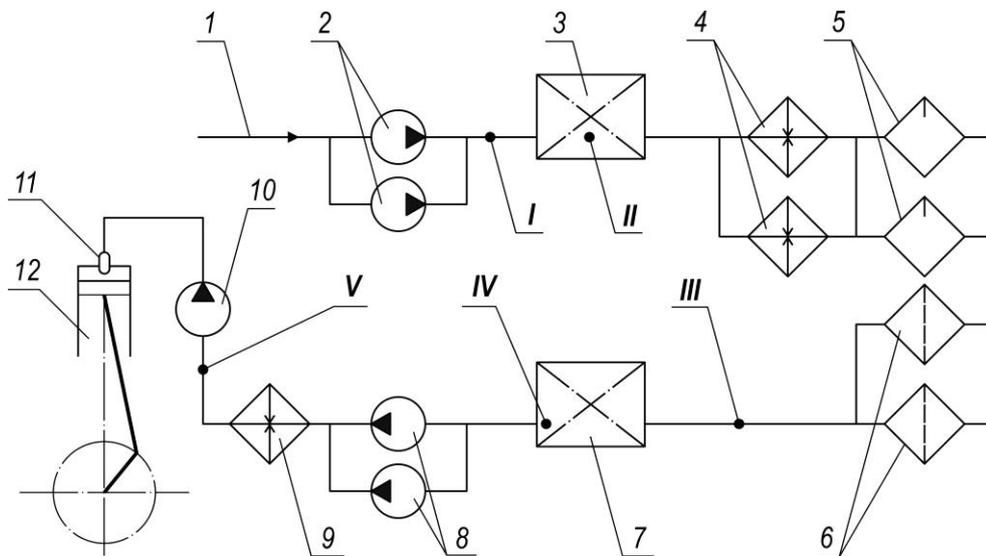


Рис. 3.3. Можливі точки введення присадок в паливну систему суднового дизеля:

- 1 - магістраль подання бункера; 2 - паливо перекачуючі насоси;
 3 - відстійний танк; 4 - паливні підігрівачі; 5 - паливні сепаратори; 6 - паливні фільтри; 7 - витратна цистерна; 8 - бустерні насоси; 9 - паливний підігрівач;
 10 - паливний насос високого тиску; 11 - форсунка; 12 - дизель;
 I, II, III, IV, V - рекомендовані точки введення присадок

Присадки до суднових палив нині отримали досить широке поширення на судах, проте результат їх застосування не завжди отримує однозначну оцінку. Це пов'язано з різними причинами, які, передусім, залежать від характеристик суднового дизеля і елементів його паливної системи, а також від забезпечення правильної технології використання присадок.

У зв'язку з цим постійно проводяться дослідження метою яких є визначення впливу паливних присадок на енергетичні, економічні і екологічні параметри роботи суднового двигуна внутрішнього згорання [42].

Під час використання присадок для відвертання мікробіологічного зараження палива, що містяться в них компоненти повинні забезпечувати знищення організмів, що знаходяться в паливі. При цьому основне місце їх введення до складу паливної системи - відстійний танк (позиція II на рис. 3.3) [43].

У разі використання паливних присадок як модифікаторів тертя, що сприяють зменшенню гідравлічного опору в трубопроводах і елементах паливної апаратури, з присадки вивільняються м'які метали (наприклад мідь, олово або калій) які створюють на поверхнях тертя мікронний прошарок і сприяють появі орієнтованої структури молекул поблизу металевої поверхні. В даному варіанті присадки можуть вводитися по всій протяжності руху палива в системі (позиції I, III, IV на рис. 3.3) [44].

Якщо присадки до палива застосовуються з метою зниження утворення осаду важких фракцій, то вони вводяться в видаткову цистерну (позиція IV на рис. 3.3).

Якщо функціональним призначенням присадки є інтенсифікація процесу згорання палива, механізм їх дії полягає в звільненні О-О зв'язків і подальше використання кисню для забезпечення згорання палива. В якості активних компонентів в таких присадках використовуються органічні сполуки, що мають більш низьку температуру спалаху. Це забезпечує самозаймання

присадки, вприснути в складі палива в циліндр дизеля, до самозаймання основної порції палива і інтенсифікацію його горіння. Масова частка вуглецю і водню в даних присадках становить 99,6...99,8%, що підвищує загальну теплоту згоряння поданої в дизель порції палива [45].

Подібні присадки також сприяють ослабленню внутрішньо молекулярних зв'язків в паливі. При цьому підвищується пористість палива, в результаті чого створюються додаткові умови для проникнення кисню і кисневмісних груп до вуглецевих і водневим складовим палива. Це, в свою чергу, сприяє збільшенню інтенсивності окислення вуглеводневих компонентів, а процес згоряння зміщається на лінію ізохоричного підведення теплоти. Основним місцем введення присадок в паливну систему в цьому випадку є ділянку перед паливною апаратурою високого тиску (паливним насосом високого тиску або насос-форсункою) - позиція V на рис. 3.3.

3.3. Висновки за розділом 3

Як результат досліджень, що виконані у розділі 3 визначимо наступне.

1. Для покращення процесу згоряння палива в суднових дизелях доцільно використовувати присадки, що сприяють розщепленню вуглеводних зв'язках (тобто молекулярного зв'язку C-H).

2. Введення подібних присадок до загального об'єму палива доцільно виконувати безпосередньо у витратної цистерні перед паливними насосами високого тиску.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ПРИСАДОК ДО ПАЛИВА ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

З метою визначення впливу присадок до палива на економічні, енергетичні та екологічні показники суднових дизелів виконувались випробування в дослідницької лабораторії та безпосередньо на суднової енергетичної установки морського транспортного судна.

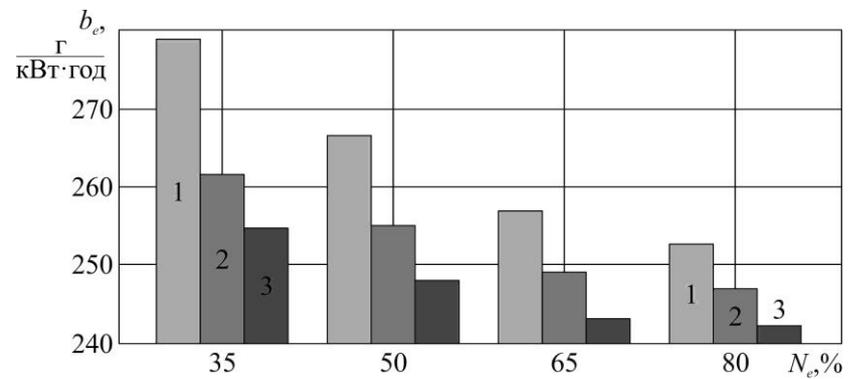
4.1. Лабораторні випробування присадок до палива

На ринку суднових нафтопродуктів отримали розповсюдження наступні присадки Paradyne-668 (фірма Exxon), Castrol TDA (Castrol), Kerobrizol EHN (BASF), Dodycet 5073 (Clariant), HiTec 4103W Ethyl (Ethyl), ADX 743 (Librizol), Difron H372 (Difron), BDC (Bardahl Diesel Combustion) та інші [46].

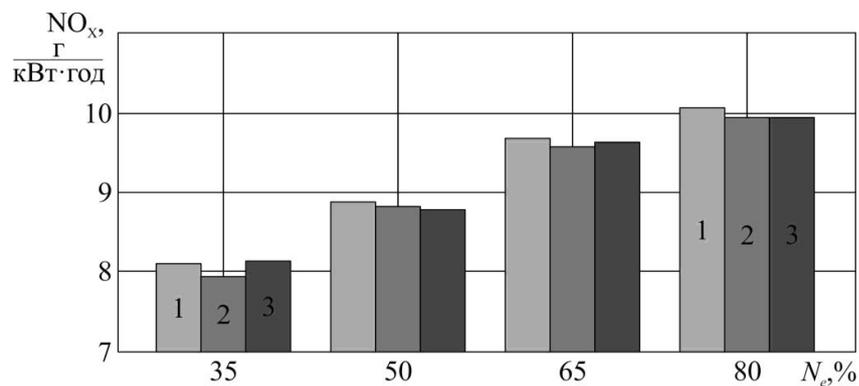
До однієї із сучасних присадок до палива відноситься компонент «NagroBoost», активною складовою якої є 3,5-диметилгептан, що має хімічну формулу $C_9H_{20} - CH_3CH_2CH(CH_3)CH_2CH(CH_3)CH_2CH_3$ та наступні основні характеристики: густина – 721 кг/м^3 ; теплота згоряння – 45560 кДж/кг ; температура спалаху – 53°C ; температура самозаймання – 287°C , які дозволяють її використання в складі суміші з судновим паливом (з дизельним, або важким після його відповідної підготовки).

Випробування присадки «NagroBoost», що були проведені на судновому дизелі 2Ч10,5/13, показали, що її введення в дизельне паливо в концентрації $0,1 \dots 0,3 \%$ за масою призводить до зниження питомої ефективної витрати палива на $2,5 \dots 8,7 \%$ під час роботи двигуна на різних режимах навантажувальної характеристики (рис. 4.1, а). Заміри токсичності випускних

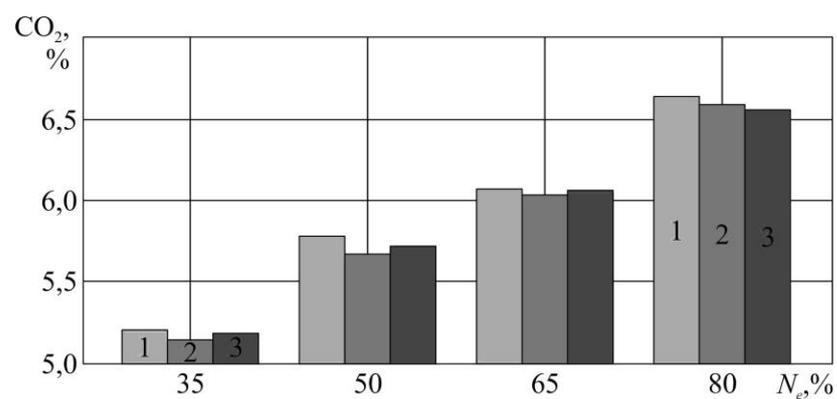
газів (зокрема вмісту оксидів азоту NO_x та вуглецю CO) показали, що використання присадки «NagroBoost» не призводить до збільшення викидів шкідливих речовин з випускними газами дизеля (рис. 4.1, б, в).



а)



б)



в)

Рис. 4.1. Вплив присадки до палива на характеристики дизеля 2Ч10,5/13:

а – питома витрата палива; б – емісія NO_x ; в – емісія CO_2 ;

1 – концентрація присадки 0,1 %; 2 – 0,2 %; 3 – 0,3 %

4.2. Випробування присадок до палива в паливних системах суднових дизелів

Дослідження були проведені в паливній системі суднового дизеля S6A2 фірми Mitsubishi Heavy Industries, схема якої показана на рис. 4.2 [47].

До складу суднової енергетичної установки входили три названі дизелі, що використовуються як дизель-генератори. Це дозволило два дизелі використовувати для проведення експериментів, а один залишати як "контрольне". Двигуни при дослідженнях працювали в паралельному режимі, що дозволяло підтримувати однакове навантаження як на "експериментальному", так і на "контрольному" дизелі. Її величина складала 150...160 кВт при номінальній потужності дизель-генераторів 230 кВт. З метою забезпечення експерименту паливна система дообладнувалася витратоміром і дозатором присадки. Дизель-генератори мали розділену газовипускную систему, що дозволило в "контрольній" і одній з "експериментальних" вмонтувати газоаналізатор.

Основними параметрами, що підлягають контролю і визначенню, були питома ефективна витрата палива, температура випускних газів, зміст NO_x в випускних газах, а також технічний стан елементів паливної апаратури і ЦПГ. При дослідженнях були отримані наступні результати [45].

На рис. 4.3 показані залежності питомої ефективної витрати палива b_e від відносної потужності дизеля $N_e/N_{\text{енном}}$ для дизеля, що працює на "чистому" паливі, і дизелі, що працює на паливі з присадкою. У обох випадках отримані криві співпадають з теоретичними, проте слід зазначити рівність витрат палива на режимах номінальної і економічної потужності при роботі дизеля на паливі з присадкою. Крім того, використання паливних присадок в цілому істотно знижує питому ефективну витрату палива, особливо на режимах малих навантажень (у діапазоні 50...60-ти %-ої потужності) – найбільш характерних для роботи дизель-генераторів.

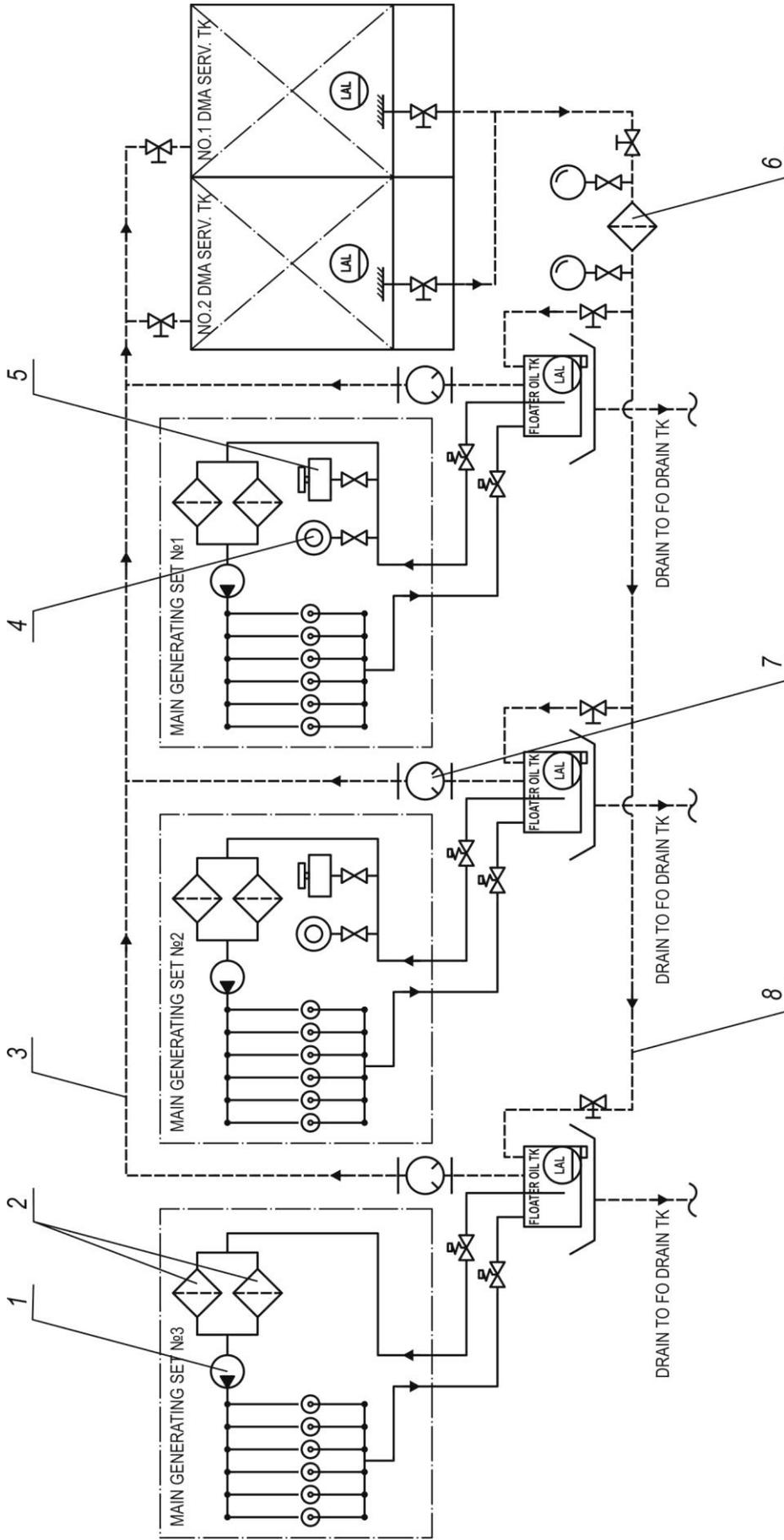


Рис. 4.2. Суднова паливна система (фрагмент) :

1 – паливний насос високого тиску; 2 – паливні фільтри тонкого очищення; 3 – магістраль відведення пари палива і повітря; 4 – витратомір; 5 – дозатор присадки; 6 – паливний фільтр грубого очищення; 7 – відділювач палива; 8 – магістраль підведення палива

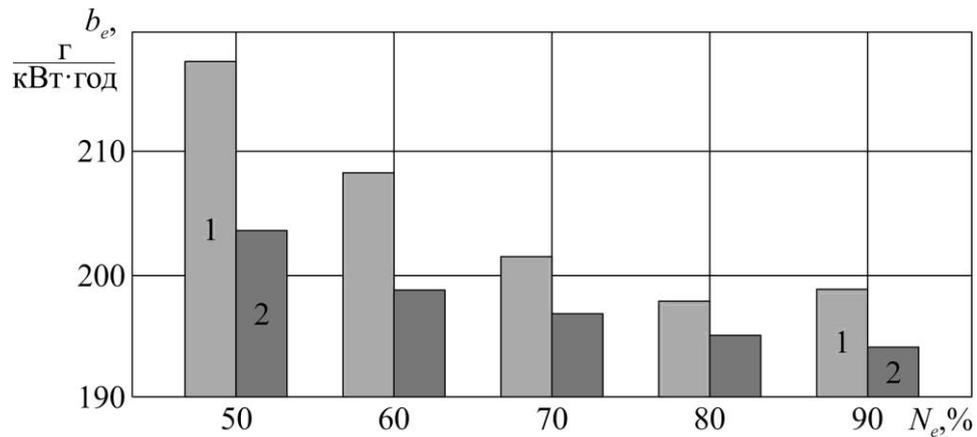


Рис. 4.3. Залежності питомої ефективної витрати палива b_e від відносної потужності $N_e/N_{ном}$ для дизеля, що працює на "чистому" паливі (1), і дизелі, що працює на паливі з присадкою (2)

Приведені результати свідчать про якісніше сумішоутворення і згорання, а також повніше використання теплотворної здатності палива з присадкою [42].

На рис. 4.4 показані залежності усередненої температури газів, що йдуть, по усіх циліндрах дизеля від відносної потужності дизеля для "контрольного" і "експериментального" дизелів.

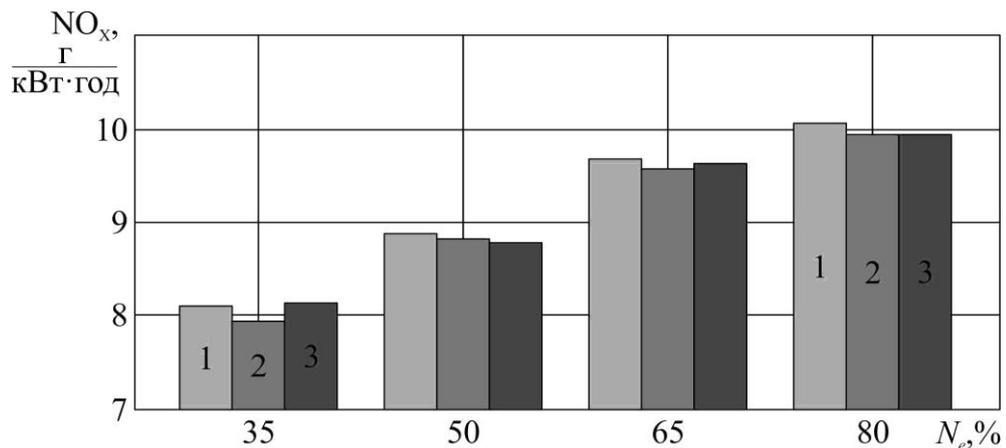


Рис. 4.4. Залежності температури випускних газів $t_{гх}$ від відносної потужності $N_e/N_{ном}$ для дизеля що працює на "чистому" паливі (1) і дизелі, що працює на паливі з присадкою (2)

Як видно з рис. 4.4, застосування присадок до палива сприяє зниженню температури випускних газів, що свідчить про повніше згорання палива. Також слід зазначити менше відхилення температури газів по циліндрах дизеля від його середнього значення. Так, для "контрольного" дизеля цьому параметру склав $\Delta t_{cp}=8^{\circ}\text{C}$, а для "експериментального" $\Delta t_{cp}=4^{\circ}\text{C}$.

На рис. 4.5 приведена графічна залежність відносної концентрації NO_x в газах, що йдуть, отримана при використанні палива з присадкою [44].

Величина ΔC_{NO_x} визначалася по вираженню

$$\Delta C_{\text{NO}_x} = \frac{C_1 - C_2}{C_1},$$

де C_1 і C_2 – концентрації NO_x в випускних газах, для дизеля, що працює на "чистому" паливі, і дизеля, що працює на паливі з присадкою. Приведена залежність свідчить про поліпшення екологічних параметрів роботи дизеля, особливо в діапазоні малих навантажень.

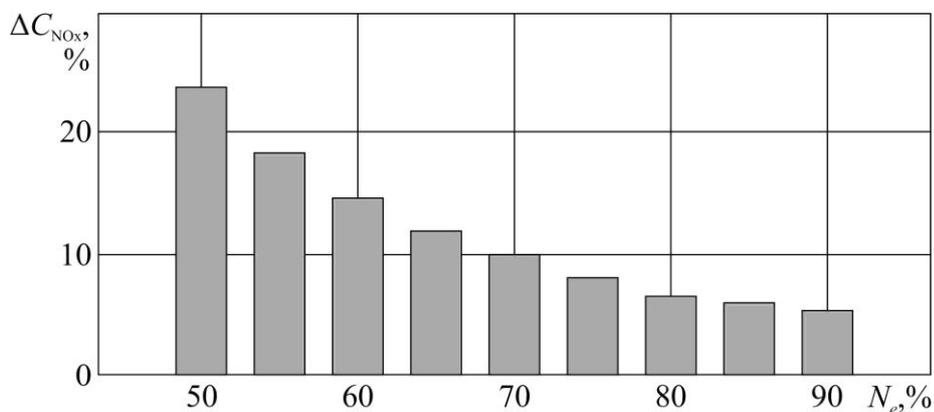


Рис. 4.5. Залежність відносної концентрації NO_x в випускних газах при використанні палива з присадкою

Крім того, слід зазначити поліпшення технічного стану дизеля і його паливної апаратури при використанні паливних присадок. Так, при моточищенні дизелів було визначено, що елементи ЦПГ дизеля, що працює з

паливною присадкою, мають менший нагар на поверхнях нагріву (зокрема на голівці поршня, кришці циліндра і випускному клапані, а також більш рухливі поршневі кільця) чим у дизеля, що працює на "чистому" паливі. Крім того, форсунки дизеля, що використовує паливну присадку, практично не мали нагари навколо соплових отворів, а їх розпилувачі знаходилися в менш зношеному стані. Це ще раз свідчить про інтенсифікацію процесів сумішоутворення і згорання при використанні палива з присадкою [40].

Для експериментів використовувалися різні присадки, рекомендовані для застосування в паливних системах суднових дизелів, при цьому отримані результати були порівнянні між собою, а на рис. 4.3-4.5 приведені їх оптимальні значення. Узагальнені результати досліджень використання присадок до палива приведені в таблиці 4.1 [47].

Таблиця 4.1. Результати дослідження застосування паливних присадок

Контрольований параметр	Робота на "чистому" паливі	Робота на паливі з присадкою
Питома ефективна витрата палива, кг/(кВт(година) :		
50 % потужності	0,217	0,204
80 % потужності	0,198	0,194
Температура випускних газів, °С:		
50 % потужності	417	403
80 % потужності	396	391
Відхилення температури випускних газів, по циліндрах від його середнього значення	8	4
Зниження відносної концентрації NO _x в випускних газах, %		
50 % потужності	—	24
80 % потужності	—	6

4.3. Висновки за розділом 4

Як результат випробувань, викладених в розділі 4 визначимо наступне.

1. Лабораторні дослідження підтверджують, що:

присадка до палива «NagroBoost» є перспективною для можливого використання у суднових дизелях;

для впровадження присадки «NagroBoost» на морському та річковому транспорті доцільно проведення комплексу випробувань, мета яких: вибір оптимальних концентрацій присадки в залежності від ступеня форсування та номінальної частоти обертання колінчастого валу двигуна; визначення впливу присадки на надійність елементів системи паливоподачі; визначення складу випускних газів з точки зору забезпечення екологічних вимог; вибір оптимального налаштування та регулювання паливної апаратури, що забезпечує впорскування суміші присадки та палива до циліндру дизеля; доцільним є також проведення експлуатаційних випробувань присадки на різних типах суднових дизелів.

2. Експерименти, що виконані на морському транспортному судні свідчать що:

під час використання присадок до палива на 46,2...58,3 % знижується неузгодженість значення температури випускних газів по окремих циліндрах від її середнього значення. Це забезпечує вирівнювання теплового навантаження по всіх циліндрах дизеля і також зменшує виникає в ньому теплову напруженість;

використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності суднового дизеля. Встановлено, що при використанні паливних присадок можливо досягти зниження питомої ефективної витрати палива від 2,54 до 6,46 % (в залежності від режиму роботи дизеля). При цьому максимальне підвищення паливної економічності відбувається в

діапазоні 50...60% навантаження дизеля, тобто режимів, що характеризуються найбільшим експлуатаційним періодом роботи, а також підвищеної теплової напруженістю;

у разі застосування присадок до палива суттєво поліпшуються екологічні показники роботи дизеля. Так застосування присадок сприяє зниження на 1,4...4,3 % концентрації NO_x в випускних газах. Крім того, при використанні паливних присадок на 15,6...22,9 % знижується концентрація SO_x в випускних газах.

5. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Близько 90 % транспортних перевезень вантажів у світі припадає на морську галузь, що визначається, в першу чергу, їх високою економічністю. При цьому, однак, згідно дослідження ІМО, рівень забруднення атмосфери продуктами згоряння постійно зростає. Тому при проектуванні нових і модернізації діючих суден ІМО запропоновані заходи щодо зниження шкідливих викидів за рахунок підвищення ефективності СЕУ. Дане завдання може вирішуватися на основі виробництва більш досконалих конструкцій корпусу судна, а так само розробки нових спеціалізованих агрегатів і пристроїв, що сприяють значному зниженню споживання палива СЕУ [48].

З 1 січня 2013 року відповідно до положень Резолюції ІМО МЕРС.203 (62)(9) вступили в силу нові правила Конвенції МАРПОЛ, спрямовані на підвищення енергоефективності суден. На всі нові судна, побудовані після 1 січня 2013 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 22 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.

Вимоги ІМО поширюються на морські судна та судна типу «річка-море», які здійснюють рейси за межі територіальних вод. Однак, на засіданні комітету ІМО в нові правила була внесена обмовка: будь-яка адміністрація прапора може дати своїм судам виключення з даного правила. Але при цьому в тих країнах, де система енергоефективності суден діє беззастережно, такий флот виявиться неконвенційним.

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

У загальному вигляді формулу розрахунку ККЕЕ можна представити таким чином:

$$ККЕЕ = \frac{\text{кількість викидів } CO_2}{\text{виконана транспортна робота}}.$$

Кількість викидів CO_2 визначається за витраченого за рейс паливу певного сорту. У свою чергу, витрата палива СЕУ базується на потужності двигунів пропульсивного комплексу на певному експлуатаційному режимі та інших споживачів палива на судні.

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

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

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

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

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

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

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

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

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 [49].

Формула для визначення ККЕЕ містить наступні складові:

а) витрати пов'язані з головними двигунами (потужність ГД, витрата палива і викиди CO_2)

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

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

$C_{FME(i)}$ – питомий (масовий) вміст CO_2 при повному згорянні вуглецю в паливі, витраченому ГД, $\frac{\text{тонн углероду}}{\text{тонн палива}}$;

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

b) витрати, що пов'язані з дизель-генераторами (потужність ДГ, витрата палива і викиди CO_2)

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

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

C_{FAE} – питомий (масовий) вміст CO_2 при повному згорянні вуглецю в паливі, витрачених ДГ, $\frac{\text{тонн углероду}}{\text{тонн палива}}$;

SFC_{AE} – питома ефективна витрата палива на ДГ, $\text{кг}/(\text{кВт}\cdot\text{г})$;

c) 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.

Таблиця 5.1. Характеристики палив, що використовуються на судах

№	Тип палива	Примітка	Вміст вуглецю, г/л	$C_F, \frac{\text{тонн CO}_2}{\text{тонн палива}}$
1	Diesel/Gas Oil	ISO 8217	0,8744	3,2206
2	Light Fuel Oil (LFQ)	ISO 8217	0,8594	3,151
3	Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217	0,8493	3,114
4	Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane Butane	0,8182... 0,8264	3,00...3,003
5	Liquefied Natural Gas (LNG)	–	0,7500	2,750

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

Дані, необхідні для розрахунку ККЕЕ наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Вихідні дані для розрахунку ККЕЕ

Характеристика	Величина
<i>1</i>	<i>2</i>
Тип судна	контейнеровоз
Загальна довжина, м	336,19
Довжина між перпендикулярами, м	327,64

Закінчення таблиці 5.2

<i>1</i>	<i>2</i>
Ширина, м	42,94
Осадка, м	15,08
Дедвейт, тонн	103690
Головний двигун	10S90ME-C9.2 TierII
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і питома ефективна витрата палива, г/(кВт·г)	52450, 175
Потужність, кВт і витрата палива, г/(кВт·г) ГД при 0,75 (MCR)	39338 174
Кількість ГД	1
Використовуване паливо ISO 8217-2010	RMK380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Допоміжні двигуни	2×6DK27 Daihatsu, 2×9DK27 Daihatsu
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і витрата палива (г/кВт·г)	2×2760, 2×3690, 181
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Вихідна потужність ДГ, кВт	4648
Швидкість судна при літній осаді і 75% потужності ГД на глибокій воді, вузли	20,85
Тип використаного гвинта	ВФШ, один
Діаметр, м і кількість гвинтів	7,35, один
Використовувані технології по зниженню витрат на вироблення електроенергії	1,0
Використовувані технології по зниженню витрат, пов'язаних зі зменшенням витрати палива	1,0

Значення максимального $K_{KE(MAX)}$

$$K_{KE(MAX)} = 174,2 \cdot 103690^{-0,201} = 17,1 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}.$$

Розрахункове значення ККЕЕ визначимо за формулою

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

$$K_{KE(роз)} = \frac{1 \cdot 39338 \cdot 3,114 \cdot 173 + 4648 \cdot 3,114 \cdot 181}{1 \cdot 103690 \cdot 20,85} = 11,01 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}.$$

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

ВИСНОВКИ

Магістерське наукове дослідження спрямоване на вирішення науково-прикладної задачі – необхідність пошуку нових шляхів забезпечення екологічних та економічних показників роботи суднових дизелів.

Суднові МОД та СОД входять до складу всіх СЕУ. Важливу роль у комплексі перетворення потенційної енергії палива в ефективну потужність дизеля виконує система паливопідготовки, ефективність роботи якої визначається зміною структурних характеристик і експлуатаційних властивостей палива до і після процесу його обробки. Одним із способів підвищення якості підготовки палива, якій забезпечує його подальше згорання з максимальним тепловим виділенням, є хімічна обробка, яку доцільно виконувати шляхом використання присадок до палива.

У магістерському дослідженні висунути та підтверджена наукова гіпотеза про те, що підвищення економічності роботи суднових дизелів досягається за рахунок хімічної обробки палива, а саме використання палива з оптимальною концентрацією присадки.

Головним науковим результатом магістерського наукового дослідження є розробка способу введення присадки в суднову паливну систему та визначення оптимальної концентрації присадки у обсязі палива, що подається в циліндр дизеля.

В результаті виконання магістерського наукового дослідження сформульовано наукове положення: підвищення паливної економічності суднових дизельних установок забезпечується додатковою хімічною обробкою палива, яка здійснюється безпосередньо перед паливним насосом високого тиску та забезпечує оптимальну концентрацію присадки в паливі.

Основні наукові та практичні результати магістерського наукового дослідження.

1. Одним із способів обробки палива є зміна його фізико-хімічного складу, яку можна розділити на: очищення від домішок та хімічну обробку. До першої групи відносяться відстоювання, сепарація і фільтрація; а до другої – застосування паливних присадок.

2. Одним з методів покращення експлуатаційних властивостей палива є використання паливних присадок, які можуть вводитися в паливну систему в різних точках: відстійному танку, витратному танку, паливних магістралях, а також перед його безпосередньою подачею в циліндр дизеля (перед ПНВТ).

3. Використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності суднового дизеля. Експериментально підтверджено, що при використанні паливних присадок на різних режимах роботи суднового чотиритактного дизеля можливо досягти зниження питомої витрати палива від 3,5 до 5,8 %. При цьому максимальне підвищення паливної економічності відбувається в діапазоні 50...60 % навантаження дизеля, тобто режимів, що характеризуються найбільшим експлуатаційним періодом роботи, а також підвищеною тепловою напруженістю.

4. Використання паливних присадок не тільки знижує загальні витрати палива, але і сприяє зниженню температури випускних газів на 3,3...7,2 % і зменшує її відхилення по циліндрах дизеля, вирівнюючи таким чином теплове навантаження по окремих циліндрах. При використанні присадок до палива на 46,2...58,3 % знижується неузгодженість значення температури випускних газів по окремих циліндрах від її середнього значення. Це забезпечує вирівнювання теплового навантаження по всіх циліндрах дизеля і також зменшує виникає в ньому теплову напруженість.

5. У разі застосування присадок до палива суттєво поліпшуються екологічні показники роботи дизеля. Застосування присадок сприяє зниженню на 1,4...4,3 % концентрації NO_x в випускних газах. Крім того, при використанні паливних присадок на 15,6...22,9 % знижується концентрація SO_x в випускних газах. Наведені факти особливо важливі в розрізі виконання

вимог Annex IV MARPOL73/78 та актуальні саме для чотиритактних дизелів, що тривалий час працюють у прибережних акваторіях і акваторіях морських портів.

6. Застосування присадок до палива сприяє поліпшенню технічного стану деталей циліндропоршневої групи дизеля і його газо-випускної системи і на 20...25 % знижує трудомісткість робіт на проведення моточистки дизеля.

7. Концентрація присадки має оптимальне значення, визначається експериментально і залежить від характеристик дизеля і використовуваного палива.

Розроблений метод вдосконалення системи підготовки палива суднових дизелів за рахунок його хімічної обробки є прикладом впровадження сучасних технологій в судновій енергетиці.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Заблоцький Ю. В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів / Ю. В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 12-16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

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

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

4. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.

5. 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.

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

7. 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>.

8. 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>.

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

10. 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 // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1), 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

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

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

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

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

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

16. 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.

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

18. 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>.

19. Парменова Д.Г., Кулешов І.М., Калугін В.М. Суднові установки очищення нафтовмісних вод: нормативні вимоги, методи очищення, конструкція та експлуатація: навчальний посібник // Одеса: НУ ОМА. – 2025. – 148 с.

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

21. Сагін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О. Підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 50. – С. 102-115. DOI: 10.31653/50.2025.102-115.

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

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

24. 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>.

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

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

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

28. Мадей В.В., Сагин С.В. Використання біопалива в двигунах внутрішнього згоряння // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 91-92.

29 Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

30. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.

31. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.

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

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

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

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

36. Zabloysky Yu. V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu. V. Zabloysky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol 9(20). – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

37. Сагин С.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей / С.В. Сагин, Ю.В. Заблоцкий,

Р.В. Перунов // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 84-103.

38. Сагін С.В., Руснак Д.Ю. Аналіз способів вдосконалення процесу підготовки палива для морського транспорту // Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021. – Харків-Міргород : УкрДУЗТ. – С. 98-100.

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

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

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

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

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

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

45. Zablotsky Yu. V. Reducing of thermal factor of exit-gas system of marine medium-speed diesel engine due to the usage of fuel additives / Yu. V. Zablotsky // Science and Education : material of the XIII international research and practice conference, Munich, November 2nd – 3rd, 2016. – Munich : Vela Verlag Waldkraiburg. – 2016. – P. 96-103.

46. Кротъ М.М. Підвищення паливної економічності суднових дизелів / М.М. Кротъ, Ю.В. Заблоцкий // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУ «ОМА». –С. 53-57.

47. Заблоцкий Ю.В. Снижение тепловой напряженности судовых дизелей за счет использования присадок к топливу / Ю.В. Заблоцкий // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2018. – № 38. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 78-89.

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

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