

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

Кафедра суднових енергетичних установок

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему:

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Курсанта 2-го року навчання навчально-наукового інституту інженерії

Однолько Борис Юрійович

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

Нормоконтроль

Д.Ф.Савчук - к.т.н., доц. Староверко О.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

Савчин Сергій САГІН
(підпис)

Рецензент (зовнішній)

А.М.Савчук - 23.12.25
(ПІБ, підпис, дата)

Рецензент (внутрішній)

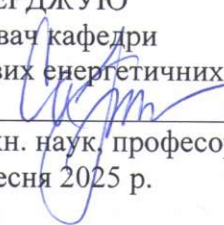
Хуцько О.О. 22.12.25
(ПІБ, підпис, дата)

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 _____ Однолько Борис Юрійович _____

1. Тема дипломної роботи: Забезпечення експлуатаційних
характеристик палива для суднових дизелів

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

2. Об'єкт дослідження процес підготовки суднових важких палив

3. Предмет дослідження процес обробки важкого палива в модульних
системах підготовки

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

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи: _____

Огляд літературних джерел з проблеми забезпечення процесу підготовки палива
для суднових дизелів

Вибір теми, розробка методології, обґрунтування методів рішення завдань
дослідження

Аналіз ультразвукової обробки палива як додаткового способу, що забезпечує
поліпшення якості його підготовки

Використання додаткової ультразвукової обробки палива в системах
паливопідготовки суднових середньооберткових дизелів

Вдосконалення суднових систем паливопідготовки

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

Огляд літературних джерел з проблеми забезпечення процесу підготовки палива
для суднових дизелів

Вибір теми, розробка методології, обґрунтування методів рішення завдань
дослідження

Аналіз ультразвукової обробки палива як додаткового способу, що забезпечує
поліпшення якості його підготовки

Використання додаткової ультразвукової обробки палива в системах
паливопідготовки суднових середньооберткових дизелів

Вдосконалення суднових систем паливопідготовки

7. Перелік графічного матеріалу:

Методологія наукового дослідження

Аналіз способів удосконалення процесу підготовки суднових палив

Результати досліджень

Висновки

РЕФЕРАТ

Магістерська дипломна робота: 83 сторінки, 13 рисунків, 5 таблиць, 54 літературних джерела.

Розглянуте призначення і склад системи підготовки палива, наведені основні методи очищення палива.

Запропоновано використання додаткових методів підготовки палива, що забезпечують його десульфурізацію.

Наведені основні пристрої для ультразвукової обробки палива. Запропоновано метод перекомплектації суднової системи підготовки палива, що забезпечує додаткове очищення палива від сірчистих домішок за допомогою ультразвукового опромінювання, який доцільно використовувати у системах підготовки палива суднових дизелів.

Запропоновано використання ультразвукової обробки палива у складі модульної схеми системи підготовки палива.

СУДНОВИЙ ДИЗЕЛЬ, ПАЛИВО ДЛЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ, ВМІСТ СІРКИ В ПАЛИВІ, ПІДГОТОВКА ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ, ВІДСТОЮВАННЯ, ФІЛЬТРАЦІЯ, СЕПАРАЦІЯ, ДЕСУЛЬФУРІЗАЦІЯ ПАЛИВА, УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА ПАЛИВА, МОДУЛЬНІ СХЕМИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ПІДГОТОВКИ ПАЛИВА

ABSTRACT

The master's degree thesis: 83 s., 13 fig., 5 tabl., 54 ref.

The purpose and composition of the fuel preparation system are discussed, the main methods of fuel purification are given.

It is suggested to use additional methods of fuel preparation to ensure its desulfurization.

The basic devices for ultrasonic treatment of fuel are given. A method of recompiling the ship's fuel preparation system is proposed, which provides additional purification of fuel from sulfur impurities by means of ultrasonic irradiation, which is advisable to use in ship diesel fuel preparation systems.

The use of ultrasonic fuel treatment in the modular scheme of the fuel preparation system is proposed.

SHIP DIESEL, FUEL FOR SHIP DIESELS, SULFUR CONTENT IN FUEL, FUEL PREPARATION FOR SHIP DIESELS, SEDIMENTATION, FILTRATION, SEPARATION, FUEL DESULFURIZATION, ULTRASONIC FUEL TREATMENT, MODULAR SCHEMES FOR THE CONSTRUCTION OF FUEL PREPARATION SYSTEMS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	12
1.1 Середньо-обертові дизелі енергетичних установок морських суден і системи, що забезпечують їх роботу.....	12
1.2. Аналіз схем підготовки палива для суднових середньо-обертових дизелів.....	13
1.3 Аналіз зміни експлуатаційних властивостей палив при їх підготовці.....	15
1.3.1 Фракційний склад суднових палив.....	15
1.3.2 Елементний склад палива.....	16
1.4 Аналіз впливу експлуатаційних властивостей палива на технічні характеристики суднового дизеля.....	19
1.5 Аналіз методів підготовки палива до його використання.....	20
1.6. Висновки за розділом 1.....	28
2. ВИБІР ТЕМИ, РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ, ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ РІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	29
2.1. Вибір теми наукового дослідження	29
2.2. Мета та завдання дослідження	31
2.3. Системний підхід до формування технологічної карти наукового дослідження	32
2.4. Висновки за розділом 2.....	34

3. АНАЛІЗ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА ЯК ДОДАТКОВОГО СПОСОБУ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЙОГО ПІДГОТОВКИ.....	35
3.1. Загальна характеристика способів захисту деталей дизеля під час його експлуатації на сірчистих паливах	35
3.2. Методи десульфуризації палива в суднових умовах.....	36
3.3. Особливості ультразвукової кавітаційної обробки суднового палива.....	39
3.4. Пристрій для ультразвукової обробки палива.....	41
3.5. Висновки за розділом 3.....	45
4. ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА В СИСТЕМАХ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ СУДНОВИХ СЕРЕДНЬООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ	46
4.1. Технологічне забезпечення досліджень з ультразвукової кавітаційної обробки палива в суднових умовах.....	46
4.2. Дослідження впливу ультразвукової обробки палива на сірчистий знос деталей циліндрової групи.....	49
4.3. Висновки за розділом 4.....	54
5. ВДОСКОНАЛЕННЯ СУДНОВИХ СИСТЕМ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ.....	59
5.1. Розробка модульних схем побудови суднових систем підготовки палива.....	59
5.2. Забезпечення вимог енергетичної ефективності при використанні модульних схем підготовці важких палив для суднових двигунів внутрішнього згоряння	63
5.3. Висновки за розділом 5.....	68

6. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	69
ВИСНОВКИ.....	76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ВСТУП

Суднова енергетична установка (СЕУ) складається з комплексу устаткування (теплових двигунів, механізмів, апаратів, магістралей, систем), призначеного для перетворення енергії палива в механічну, електричну і теплову енергію та транспортування її до споживачів.

У останніх 10...15 років суднове світове дизелебудування енергійно розвивалося, при цьому були повністю переглянуті тенденції його реформування і розвитку. Знайдені нові принципові ідеї підвищення економічності суднової енергетичної установки:

- збільшення відношення ходу поршня до діаметру циліндра;
- підвищення тиску уприскування палива більш ніж до 100 МПа;
- підвищення ступеня стиснення;
- підвищення максимального тиску згорання до 15 МПа і вище;
- поява нового покоління турбокомпресорів з коефіцієнтом корисної дії (ККД) 70 % і більш із ступенем підвищення тиску повітря $\pi_k=5,0 \dots 6,0$;
- використання силових турбін – турбокомпаундних систем;
- застосування мікропроцесорної техніки для управління початком уприскування палива і фазами газорозподілу;
- нові методи розрахунків робочого процесу і теплового балансу і ін.

Без перебільшення можна стверджувати, що по всьому спектру дизельних проблем зроблений значний крок вперед, що диктує і принципово нові підходи до конструювання двигунів по:

- системам наддуву;
- системам топливоподачі;
- охолодженню деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ);

- вибору конструкції деталей (поршні, кришки, остов, колінчастий вал, підшипники і ін.);

- вибору матеріалів, методам їх зміцнення, новим технологіям і ін.

Для створення нормальних умов експлуатації двигунів на важких сортах палива при проектуванні сучасних дизельних установок передбачається використання:

- систем паливо-підготовки, що забезпечують необхідний підігрів і очистку важких палив;

- спеціальних систем подачі палива, що забезпечують якісне розпилування, сумішоутворення і згоряння важких палив;

- циліндрових і циркуляційних масел, що забезпечують тривалу надійну роботу двигуна.

Впровадження перелічених конструктивних і експлуатаційних удосконалень вимагає додаткових витрат. Аналізуючи основні статті цих витрат, можна встановити економічну доцільність використання важкого палива.

Досвід експлуатації багатьох суднових двигунів підтверджує економічну доцільність і технічну можливість широкого використання високов'язких палив в мало-обертових дизелях (МОД) і середньо-в'язких палив в середньо-обертових дизелях (СОД). Однак при цьому судовому екіпажу завжди доводиться вирішувати завдання з експлуатацією додаткових вузлів, що забезпечують більш якісну підготовку палива до спалювання в дизелях. Одним із шляхів його розв'язання є використання додаткової ультразвукової обробки палива та застосування модульних схем побудови паливних систем.

Саме цьому актуальному питанню присвячена дипломна робота.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

1.1. Середньообертові дизелі енергетичних установок морських суден і системи, що забезпечують їх роботу

До суднових СОД відносяться двигуни, частота обертання колінчастого вала яких на номінальному режимі складає 300...1000 об/хв. У разі використання СОД як допоміжних дизелів (ДД) колінчастий вал дизеля безпосередньо з'єднаний з ротором електрогенератора і їх частоти обертання збігаються. Якщо СОД виконує функції головного двигуна (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 [1, 2].

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].

Основна риса сучасних СОД – спроможність працювати на високов'язких сортах палива. СОД сучасних морських суден характеризуються агрегатної потужністю в межах 30000 кВт і вище. Найбільшого поширення подібні дизелі отримали на пасажирських суднах, контейнеровозах малого і середнього водотоннажності, а також на спеціалізованих суднах (морських і океанських буксирах, рефулерних суднах, суднах забезпечення нафтовидобувних платформ і ін.), де вони використовуються в складі дизель-редукторних агрегатів з відбором потужності для приводів електроагрегатів, гідронасосів та інших суднових механізмів [4-6].

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, газовипускнуну [7].

Найбільш розгалуженішою 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 згоряння двигуна і включає паливний насос високого тиску (ПНВТ) або загальний паливопровід високого тиску (common rail) і форсунку.

1.2. Аналіз схем підготовки палива для суднових середньооберткових дизелів

В останні роки на транспортних суднах для СОД все ширше застосовуються важкі сорти палива високої в'язкості, що мають більш низьку вартість [8, 9]. Згідно з вимогами таких провідних фірм, що будують дизелі, як Wartsila-Sulzer, MAN Diesel & Turbo суднові СОД повинні надійно експлуатуватися на всіх режимах (в тому числі на пускових і перехідних) при використанні палив з в'язкістю до $500 \text{ мм}^2/\text{с}$. 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].

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 суднових МОД становить 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 суттєво 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]. Крім того, з 01.01.2020 р. експлуатація суднових двигунів повинна виконуватися із використанням палива зі вмістом сірки менш ніж 0,5 %. При цьому слід враховувати, що нафтопереробна промисловість в даний час ще не готова до виробництва необхідних обсягів палив з подібним вмістом сірки [16].

Використання важких палив в суднових СОД вимагає створення систем паливопідготовки і забезпечення таких режимів їх експлуатації, які здатні нейтралізувати впливи фізико-хімічних властивостей палива на надійність, довговічність і економічність дизеля [17, 18].

1.3. Аналіз зміни експлуатаційних властивостей палив при їх підготовці

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 згоряння [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 судових СОД, в яких згоряння відбувається за менший проміжок часу.

У дистилатів 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 [20].

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 згоряння палива і, як наслідок, збільшується його питома витрата [21, 22].

1.3.2. Елементний склад палива

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 малосірчистих сірка становить 0,01...0,5 % по масі, в високосірчистих до 3,5 % [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.

Структурний склад палива визначає одну з основних його характеристик – нижчу теплоту згорання Q_H , 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

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

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 [23, 24].

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-B&W і Wärtsilä-Sulzer.

Таблиця 1.2. Розподіл відмов по основних вузлах дизелів

Найменування вузла чи деталі	Відношення відмови кожного вузла до усіх відказів	
	MAN Diesel & 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. 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.

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 кожну 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/с^2 ;

$\rho_{\text{ч}}$ – густина механічних домішок або води, кг/м^3 ;

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

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

де $\rho_{\text{т}}$ – густина палива, кг/м^3 ;

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

$$F_{\text{Н}} = \frac{\zeta \pi d^2 \rho_{\text{т}} \omega_{\text{о}}^2}{8},$$

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

ω_0 – 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

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4(\rho_c - \rho_r)gd}{3\rho_r\zeta}},$$

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

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.

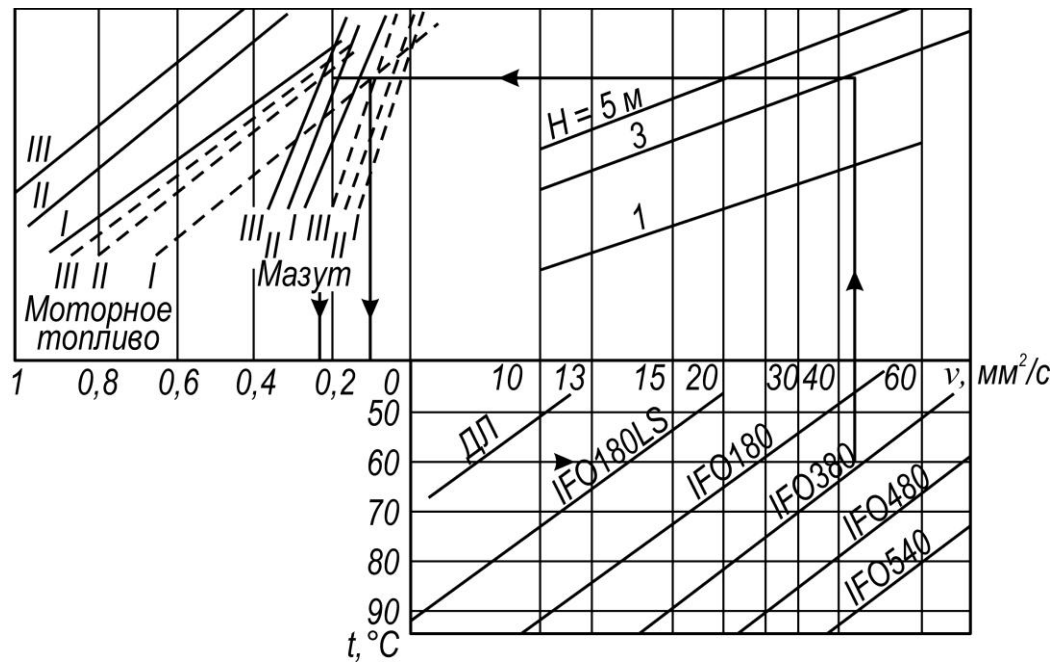


Рис. 1.1. Номограма відстоювання палива:

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

--- вода; - механічні домішки

Одним з основних методів очищення палива на суднах є сепарація, в процесі якої зменшується вміст механічних домішок, води і золютворюючих 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 СОД може служити схема, рекомендована корпорацією MAN Diesel & Turbo (рис. 1.2) [31].

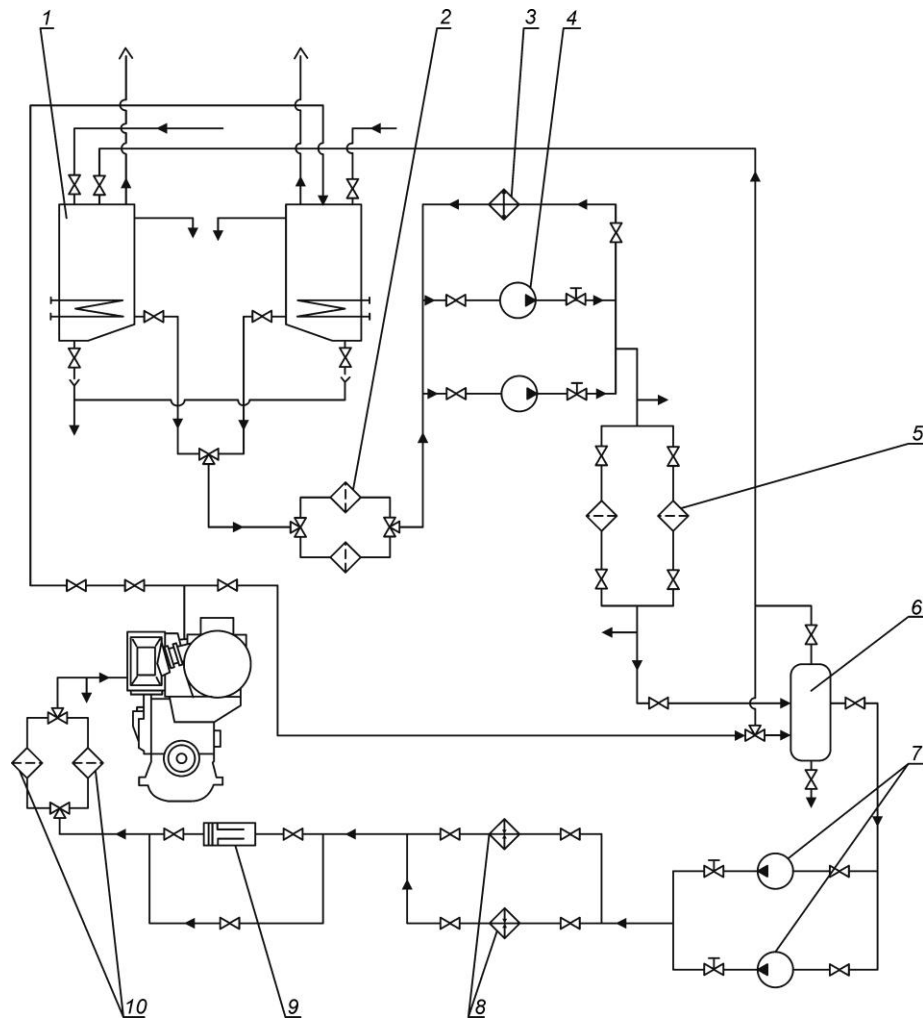


Рис.1.2. Расходная топливная система судового СОД:

- 1 – расходная цистерна тяжелого топлива; 2, 10 – сдвоенный фильтр;
 3 – охладитель топлива; 4, 7 – топливоподкачивающие насосы;
 5 – автоматический фильтр; 6 – смешительная цистерна; 8 – топливный подогреватель; 9 – регулятор вязкости

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.

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» впорскнутих 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 впорскування 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 судовій практиці 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 згорання 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 обробка 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 паливопідготовки, не виконуючи глибокого аналізу альтернативних способів вдосконалення систем паливопідготовки суднових СОД.

1.6. Висновки за розділом 1

В результаті проведеного огляду літературних джерел встановлено наступне:

- в світовому дизелебудуванні (в тому числі і судновому) триває тенденція збільшення агрегатних потужностей 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 та 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 очищення від домішок і підготовки до спалювання в циліндрі дизеля.

Наведені факти свідчать про необхідність досліджень, спрямованих на розробку алгоритмів і способів підвищення якості підготовки палив, що використовуються в суднових СОД, шляхом вдосконалення систем їх підготовки.

2. ВИБІР ТЕМИ, РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ, ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ РІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Вибір теми наукового дослідження

Згідно основам наукових досліджень «Вибір є дією, що надає науковому дослідженню цілеспрямованість, а тому він представляє центральний етап для прийняття шуканого рішення» [32].

Тема дослідження виходить зі спостережень подій і фактів з їх фіксацією висловлюваннями. В інформаційному пошуку знайшли своє відображення як практичні так і наукові факти, пов'язані з отриманням на борт судна, транспортуванням, попередньої обробкою, технічним вдосконаленням процесу підготовки, подачею до дизеля та впорскуванням палива.

Після здобуття фактичного матеріалу слід переходити в іншу фазу роботи: угруповання фактів по їх важливості, актуальності, передбачуваної науковою новизною, економічної ефективності, можливості бути реалізованим і т.і.

Вибір найбільш важливого і актуального факту вимагає його подальшого пояснення. З методологічних основ наукових досліджень відомо, що намір пояснити факт формує проблему, яка представляє питання або комплекс питань [33]. Тому правильно поставити завдання означає частково розв'язати цю проблему. При постановці проблеми відокремлюються відоме від невідомого, факти доведені від вимагають докази, формулюється питання основного змісту проблеми з подальшим визначенням конкретного шляху її вирішення .

Рішення проблеми починається з формулювання гіпотези і подальшим переходом від невідомого до відомого пізнання факту за допомогою відомих або пропонується прийняти теорій, формуванням принципів і законів дослідження.

Методологія наукового дослідження відображає його стратегію і представляє систему методів, форм, засобів і видів пізнання, яка розділена на змістовну (структура) і формальну (пояснення). До складу методології науки входять: сукупність вихідних вимог і принципів дослідження; система методів наукового пізнання; теоретичне обґрунтування використовуваних методів з розробкою конкретних методик і процедур дослідження. Тому визначення передбачуваної новизни дослідження вимагає вивчення ступеня його методологічної забезпеченості.

Вихідні вимоги і принципи підсилюють детермінізм результатів дослідження і підвищують достовірність закономірностей зв'язків і взаємообумовлених в об'єкті досліджень. Використовувані методи пізнання (абсолютні, загальнонаукові, і логічні) в техніці: аналіз, синтез, індукція, дедукція, ідеалізація, аналогія, моделювання, планування експерименту виходять з загально логічних розумових понять про поведінку або оперуванні об'єктами дослідження. Однак слід пам'ятати, що критерієм істини є експеримент. Методика відображає тактику наукового пізнання і містить сукупність, послідовність, а також порядок використання обраних прийомів і методів дослідження. Всі наведені методологічні визначення та положення, що відображають систему принципів, способів організації та побудови теоретичної і практичної діяльності, є необхідними складовими системного підходу - загальнонаукового методу пізнання, який покладено в основу даного дослідження.

Процедура вибору теми дослідження передбачає перевірку кожного факту, розглянутого в результаті інформаційного пошуку за наступними характерними ознаками: важливість і актуальність формованої проблеми; передбачуваної науковою новизною; економічної ефективності планованого дослідження; відповідності дослідження основними напрямками певної наукової спеціальності і наукової школи; реалізація теоретичних положень, наукових та практичних результатів роботи.

2.2. Цілі завдання дослідження

Фундаментальні підходи класичної теорії пізнання мають на увазі повноцінне опис динаміки науково-пізнавального процесу як логічно завершеною ланцюжка розумових дій, що зв'язують перехід питання - проблема - гіпотеза. Закінчення зв'язку з цим надалі реалізується в теорії і концептуальному підході. На підставі цього методологічна основа цього дослідження є замкнутий цикл: основна мета - сформульована проблема - запропонована гіпотеза - реалізоване дослідження - теорія - наукове положення. Наукове положення дослідження може вважатися адекватним тільки в разі свого підтвердження фактами натурних експериментів [34].

Метою дослідження є підвищення ефективності використання суднових важких палив.

Головне завдання дослідження – розробка варіантів комплектації суднової системи підготовки палива у модульному варіанті.

Робоча гіпотеза досліджень полягає в тому, що підвищення ефективності використання суднових важких палив забезпечується раціональною схемою його підготовки.

З урахуванням сказаного головне завдання досліджень було сформульовано як структурний вдосконалення технологічної схеми суднової системи підготовки палива.

З урахуванням зазначеного, рішення головного завдання повинно передувати рішенням набору допоміжних завдань, пов'язаних з дослідженням згаданих додаткових процесів.

Перша допоміжне завдання має на увазі теоретичний аналіз способів підготовки палива, що сприяють захисту деталей дизеля при роботі на сірчистих паливах.

Друга допоміжне завдання пов'язане з дослідженням впливу

ультразвукової обробки палива на сірчистий знос деталей суднового дизеля.

Рішенням головного завдання досліджень є результат синтезу отриманих рішень допоміжних завдань. Її науковим результатом є варіант складання системи підготовки палива у модульному варіанті, який сприяє покращенню експлуатаційних показників палива.

Практичну цінність роботи складає технологічна схема, що забезпечує процес десульфурізації важкого палива.

2.3. Системний підхід до формування технологічної карти наукового дослідження

В ході наукових досліджень при використанні системного підходу необхідно розглядати процес пізнання як комплексний. В цьому випадку вивчається не тільки система як абстрактний об'єкт пізнання, а й пов'язаний з нею цілісний комплекс основних положень методології наукового пізнання. Такий комплекс завжди повинен ґрунтуватися на:

- об'єктивному і суб'єктивному підході;
- пов'язаності причинності і закономірності, стійкості і нестійкості, індукції і дедукції, аналізу та синтезі;
- скоординованих шляхи досягнення вірного і ефективного знання за рахунок взаємного урахування внутрішніх механізмів, логіки та організації знання [35, 36].

Замкнений цикл наукового дослідження наданий у вигляді технологічної карти (рис. 2.1).

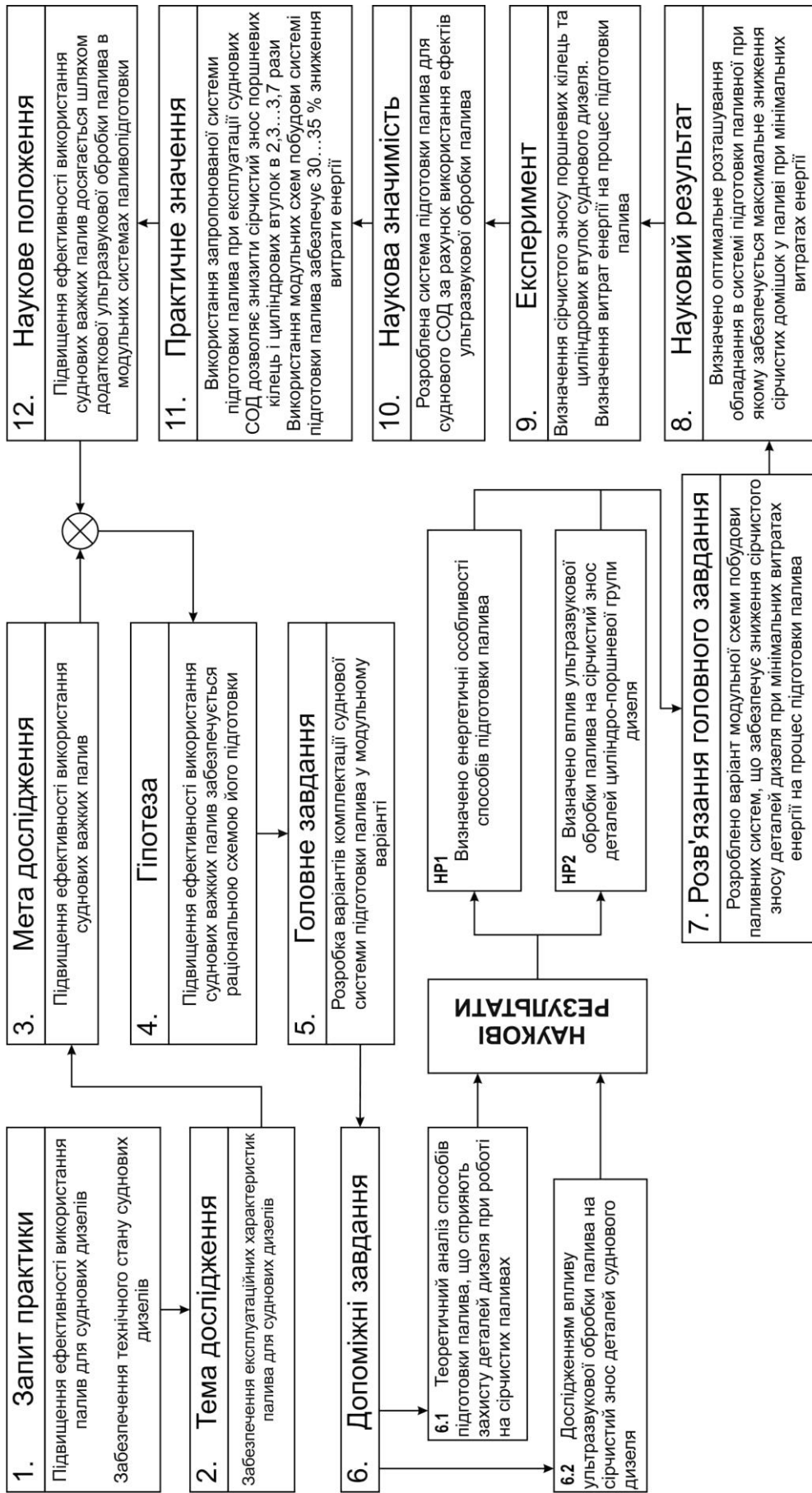


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

2.4. Висновки за розділом 2

1. В результаті вибору теми дослідження за ознаками: важливості, актуальності, наукової новизни, економічності, відповідності профілю наукової школи кафедри СЕУ, результатів досліджень і ряду наукових напрямків, пов'язаних з забезпеченням процесу підготовки палива, сформульована тема, спрямована на вдосконалення технологічної схеми обробки важких палив, що використовуються на морських судах для роботи двигунів внутрішнього згорання.

Об'єкт дослідження – процес підготовки суднових важких палив.

Предметом дослідження – процес обробки важкого палива в модульних системах підготовки.

2. Сформульовано науково методологічний підхід до процесу комплектації систем підготовки палива, що використовуються на судах морського та внутрішнього водного транспорту.

3. Сформульована технологічна карта досліджень, яка повністю охоплює процес підготовки палива з комплектацією паливної системи у модульному варіанті.

3. АНАЛІЗ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА ЯК ДОДАТКОВОГО СПОСОБУ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЙОГО ПІДГОТОВКИ

3.1. Загальна характеристика способів захисту деталей дизеля під час його експлуатації на сірчистих паливах

З урахуванням того, що в горючій масі палива знаходяться різноманітні сірчисті з'єднання (елементарна сірка, сірководень, меркаптани, сульфідиди, дисульфідиди, тіофен, теофан, сульфокислоти і ін.), які взаємодіють з деталями ЦПГ, кришкою циліндра, випускними і продувними клапанами при різному фізико-хімічному стані палива, можна визначити такі основні шляхи захисту цих вузлів дизеля:

- виготовлення деталей дизеля з матеріалів, стійких до впливу сірчистої корозії;
- зміни в конструкції дизелів, призначених для роботи на сірчистих паливах;
- застосування нейтралізують анти-сірчистих присадок до палива;
- виключення режимів роботи дизеля, що викликають найбільш інтенсивну електрохімічну корозію і підвищений знос (тобто режимів з низькою температурою води, що охолоджує стінки циліндра і циліндрову кришку);
- створення систем підготовки палива, що знижують кількість сірчистих сполук, які надходять в циліндр дизеля;
- вибір режиму роботи системи підготовки палива, що забезпечує найбільш якісну обробку палива [37].

3.2. Методи десульфуризації палива в суднових умовах

Виходячи з аналізу складу важких палив для суднових ДВЗ і способів їх очищення в процесі підготовки палива, можна зробити висновок, що основними побічними продуктами, які надають значний вплив на довговічність і економічність роботи суднового дизеля, є механічні домішки, смолисто-асфальтенові речовини, сірка і сірчисті з'єднання, вода, що знаходяться в паливі. Підвищений вміст сірчистих складових в паливі істотно позначається на надійності і економічності дизеля, а їх видалення дозволяє значно підвищити ефективність використання важких сортів палива в ДВЗ.

Рішення задач по десульфуризації палива, як правило, відноситься до стаціонарної енергетиці і виконується на берегових нафтопереробних комбінатах. Це тільки підкреслює актуальність пошуку оптимальних варіантів видалення сірки з палива в умовах експлуатації морського судна.

Як способи десульфуризації палива в суднових умовах можуть бути використані:

- тонка фільтрація;
- гідроочищення;
- змішування палива з єднальними реагентами з подальшим відстоюванням, фільтрацією або сепарацією осаду;
- окислювальне відновлення;
- ультразвукова кавітаційна обробка [38].

Труднощі тонкої фільтрації, як способу прямого видалення сірки з палива, пов'язані з малими розмірами сірковмісних компонентів в порівнянні з іншими домішками (зокрема з усіма металевими складовими і органічними сполуками). Використання тонкої фільтрації в даному випадку сприяє збільшенню гідравлічного опору в паливній системі і, як наслідок, підвищенню енергетичних втрат на процес підготовки палива. Одним з

рішень задачі в такому варіанті є додаткове підвищення температури палива. Однак, даний варіант може бути рекомендований лише для дистилатів сортів палива. Додатковий нагрів важких сортів палива сприяє «парафінізації» вуглеводнів, а крім того, підвищує енергоємність процесу.

Процес гідроочищення вимагає попереднього додавання в паливо спеціально підготовленої води, після чого отримана водопаливної суміш пропускається через гідродинамічний апарат з м'яким режимом обробки. Отримана суміш або відстоюється, або направляється в центрифугу, де частина сірки, пов'язаної з водою осідає і зливається. Центрифуги, як будь-які роторні апарати відрізняються високим ступенем обробки палива, але через високу і енергоємності і підвищеного зносу рухомих частин приводів і електромоторів, можуть бути рекомендовані в якості додаткового способу підготовки на суднах з великою потужністю допоміжної енергетичної установки, що характеризуються частими заходами в морські порти (наприклад, вантажопасажирські). Крім того, отримання необхідного вмісту сірки в високов'язких паливах цим методом часто економічно не вигідно. Це пов'язано з високою вартістю активних і селективних каталізаторів, газу, що містить водень, обладнання. Причому вартість технології зростає зі збільшенням ступеня видалення сірки з палива.

Більш простим методом в апаратному виконанні є адсорбційна видалення сірко органічних з'єднань. У транспортних енергетичних установках десульфуризація, як правило, проводиться адсорбційним або каталітичного-адсорбційним методами. В останньому, сполуки сірки перетворюються в H_2S каталітичним відновленням водню або ж в елементарну сірку і/або SO_x селективним (виборчим) каталітичним окисленням, з подальшою їх адсорбцією.

Десульфуризація палива також можлива за допомогою водню, проте необхідність зберігання стисненого водню і витрати енергії на його стиснення обмежують застосування даного способу і можлива лише для

судів, що використовують водневе паливо (наприклад, для деяких типів газозовів).

Окислювальне видалення сірки дозволяє знизити вміст сірки в дизельному паливі з 3...3,5 % до 0,1...0,5 %, проте для судових умов також має свої обмежувальні особливості [39].

Значного поширення для видалення сірчистих сполучень з моторних палив отримали гетерогенні системи, що складаються з різноманітних твердих носіїв (солі, оксиди, активоване вугілля, цеоліти) і пероксидних окислювачів (пероксид водню або алкілгідропероксиди).

Ефективність окисного видалення сірки з вуглеводневого палива істотно підвищується, коли за процесом окислення слід адсорбція продуктів окислення на твердому адсорбенті, наприклад компонентах, що містять молібден, активованому вугіллі, алюмосилікатах. Однак, використання подібних способів може бути рекомендовано лише для паливних систем невеликого обсягу.

В останні роки для видалення сірки з різних видів моторних палив був запропонований метод екстракції сірчистих сполук іонними рідинами. Особливо ефективні іонні рідини, які містять іони Cu(I) і Ag(I) , а також безводні порошкоподібні CuCl , що містять в якості аніонів частки CuCl_2 , Cu_2Cl_3 і Cu_3Cl_4 . Однак, ці системи забезпечують високій рівень видалення сірки лише для мало в'язких палив.

Серед інших методів окисного видалення сірки з палива слід зазначити його озонування. Цей метод дозволяє не тільки зруйнувати конденсовані сірчисті з'єднання, а й отримувати на їх основі високоефективні емульгатори. Попереднє озонування може інтенсифікувати процес гідроочищення палива. При цьому застосування даного способу вимагає додаткового генератора озону, який використовуються тільки на нафтоналивних судах.

Методом десульфуризації палива, які можуть застосовуватися на всіх типах морських суден і СЕУ є ультразвукова кавітаційна обробка палива [40].

3.3. Особливості ультразвукової кавітаційної обробки суднового палива

Суднове моторне паливо – високомолекулярна, гетерогенна рідина, молекули якої при атмосферному тиску і нормальній температурі складно орієнтовані. При додатку до нафти зовнішнього тиску в кілька сот атмосфер молекули поляризуються, протидіючи зовнішнім силам і зберігаючи рівновагу системи. Якщо зовнішній тиск різко зняти, то внутрішні сили почнуть розривати макромолекули на більш дрібні складові, причому, щільність продукту зменшується. Цей принцип покладено в основу обробки нафти і її похідних з метою зміни її структури [41].

Ідея дробити довгі органічні ланцюжка палива на більш короткі для отримання вільних радикалів, що утворюють нові сполуки, не нова. При цьому, дослідження в цьому напрямку виконувалися, в основному, для стаціонарної енергетики та нафтопереробних комплексів, а їх завданням був розрив С-С зв'язків в молекулах парафіну, в слідстві чого відбувалася зміна фізико-хімічного складу палива (зменшення молекулярного ваги, температури кристалізації і ін.). Одним з варіантів здійснення завдання розриву міжмолекулярних зв'язків в паливі є використання кавітації – утворення розривів палива в результаті місцевого спаду тиску. Якщо зниження тиску відбувається внаслідок великих локальних швидкостей в потоці рухомого палива, то кавітація вважається гідродинамічної, а якщо внаслідок проходження в паливі акустичних хвиль, – акустичної або ультразвукової.

Ефект кавітації супроводжується мікрровибухами, ультразвуком, а також механічними зрізами і зіткненнями при впливі сотень ріжучих пар, що рухаються назустріч один одному з високою лінійною швидкістю. Величина

цієї швидкості становить кілька десятків метрів в секунду, що дає можливість розрізати диспергіруєми речовини на найдрібніші мікрочастинки.

При поширенні ультразвукової хвилі навіть порівняно невеликої інтенсивності (всього кілька ват на квадратний сантиметр) в паливі, як і в будь-якої рідини, виникає змінне звукове тиск, амплітуда якого не перевищує 1 МПа. Під дією цього тиску паливо поперемінно відчуває стиснення і розтягнення. Паливо, будучи нестисливою рідиною, практично не змінює своїх властивостей при збільшенні тиску. Однак, в разі створення розрядження всередині палива або навіть на його поверхні, його агрегатний стан змінюється, зокрема можлива поява газоутворення в його обсязі. При поширенні ультразвукової хвилі в паливі розтягують зусилля в області розрідження хвилі приводять до утворення в ньому розривів, тобто найдрібніших кавітаційних бульбашок, заповнених газом і паром. Дане явище сприяє виникненню ультразвукової кавітації палива.

Бульбашки кавітацій в деякій області палива виникають в той момент, коли до цієї області доходить фаза розрідження ультразвукової хвилі. Як правило, кавітаційні бульбашки не стійки в часі: вже наступна за розрідженням фаза стиснення призводить до закриттю більшої їх частини. Тому кавітаційні бульбашки зникають практично відразу слідом за припиненням опромінення рідини ультразвуком.

Поруч досліджень встановлено, що ультразвукові коливання здатні змінювати агрегатний стан палива, диспергировать, емульгувати його, змінювати швидкість дифузії, кристалізації і розчинення речовин, активізувати реакції, інтенсифікувати технологічні процеси.

Поширення хвиль великої інтенсивності (ультразвуку) супроводжується нелінійними ефектами. Хвилі великої амплітуди, проходячи через паливо, створюють області істотного стиснення і розрядження. При істотному розрядженні виникають «негативні тиску», що призводять до розриву палива. Порожнечі при цьому, як правило, заповнюються газами, які

проникають в них в слідстві дифузії з навколишнього палива, а також з парами палива. Оскільки в хвилі за розрядженням настає стиснення, тиск на пляшечку з боку палива різко зростає, що призводить до «хляпанню» бульбашок. При цьому виникають хвилі великої інтенсивності.

Ультразвукова кавітація є ефективним способом концентрації енергії звукових хвиль низької щільності в високу щільність енергії, пов'язану з пульсаціями кавітаційних бульбашок і зменшенням їх радіусу R до мінімально можливого R_{\min} (схлопування). Утворення кавітаційних зон (кавітаційних бульбашок) в паливній середовищі відбувається в наступній послідовності. У фазі розрідження акустичної хвилі в паливі утворюється розриви у вигляді порожнин, які заповнюються насиченими парами палива. У фазі стиснення під дією підвищеного тиску і сил поверхневого натягу порожнину закривається, а пари палива конденсуються на кордоні розділу фаз. Через стінки порожнини в неї дифундує розчинений в паливі газ, який потім піддається сильному адіабатичному стиску. У момент схлопування, тиск і температура газу досягають значних величин (за деякими даними до 100 МПа і 10000°C). Після схлопування порожнини в навколишньому їй обсязі палива поширюється сферична ударна звукова хвиля, швидко загасаюча в просторі.

3.4. Пристрій для ультразвукової обробки палива

Як пристрої для ультразвукової обробки палива використовуються різноманітні змішувачі, кавітатори, подрібнювачі, гомогенізатори [35].

Дія динамічного змішувача заснована на турбулізації потоків і використанні кавітаційних явищ, що виникають унаслідок створюваної

змішувачем високочастотної пульсації струменів змішуваних палив. Динамічні змішувачі забезпечують вищу гомогенність.

Для динамічного змішування палив застосовують гідродинамічні сирени. Остання складається з розміщених в корпусі рухомого і нерухомого дисків з прорізами. При обертанні ротора з частотою 3000 об/хв струмені палива продавлюються через вузькі прорізи статора. Частота коливань, що виникають при цьому, складає 3,6...7,2 кГц. Але в сирену потрібно подавати заздалегідь змішане паливо.

Конструкція змішувача з резонатором приведена на рис. 3.1.

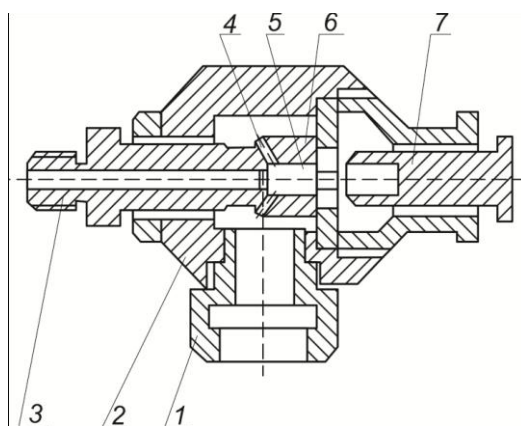


Рис. 3.1. Схема пристрою гідродинамічного змішувача з резонатором:

1, 3 – штуцери; 2 – корпус; 4 – гомогенізуюча головка; 5 – резонатор;
6 – порожнина; 7 – фіксатор

Апарат складається з корпусу 2, в який укручені штуцери 1 і 3. Усередині корпусу розміщена гомогенізуюча головка з тангенціальними каналами *a*. Рідина під тиском 0,3...0,5 МПа поступає через штуцер 1 до тангенціальних каналів *a*, звідки закінчується в порожнину 6 гомогенізуючої головки 4, де із-за зіткнення струменів і їх завихрення, ежектує рідину, що поступає скрізь штуцер 3, і інтенсивно перемішується з нею. У порожнині 6, унаслідок закінчення палива і його завихрення генеруються пружні коливання, сприяючі диспергуванню палива. Для посилення ефекту

гомогенізації на виході з гомогенізуючої головки встановлений резонатор 5, який підсилює виникаючі пружні коливання в потоці палива. У розглянутому апараті з одного боку відбувається хороше змішення палив, а з іншою їх гомогенізація.

Крім того, в даний час розроблені різного типу акустичні апарати для інтенсифікації процесів змішення і розчинення. Наприклад, випускаються ультразвукові гідродинамічні змішувачі, акустичні апарати для надтонкого подрібнення і очищення, ультразвукові прохідні хімічні апарати типу для обробки систем типу рідина – тверде тіло, ультразвукові ванни для очищення.

На рис. 3.2 представлена конструкція ультразвукового подрібнювача механічних домішок. Ультразвукові коливання виникають при вібрації консольних металевих дисків під дією рідини, яка витікає з сопла під тиском 2 МПа.

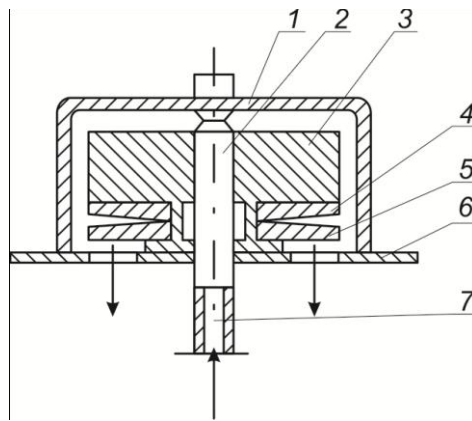


Рис. 3.2. Ультразвуковий подрібнювач механічних домішок:

- 1– плати; 2 – нижній диск; 3 – верхній диск; 4 – пригруз; 5 – корпус; 6 – вісь;
7 – патрубок, що підводить

Для змішення дизельного і важкого палив на морському флоті застосовується ультразвуковий гідродинамічний змішувач типу УЗГС-5000. Пристрій змішує різні нафтопродукти в будь-яких заданих пропорціях. В

результаті ультразвукової обробки кавітації утворюються гомогенні стабільні паливні суміші.

Змішувач (рис. 3.3) складається із збірного сталевого корпусу 1, діаметром 120 мм і заввишки 250 мм з двома вхідними патрубками 3 і 7 і одним вихідним 4. У корпус вмонтовано три резонатори ультразвуку: резонатори першого і другого ступеня 2 і 5 і проміжний резонатор 6.

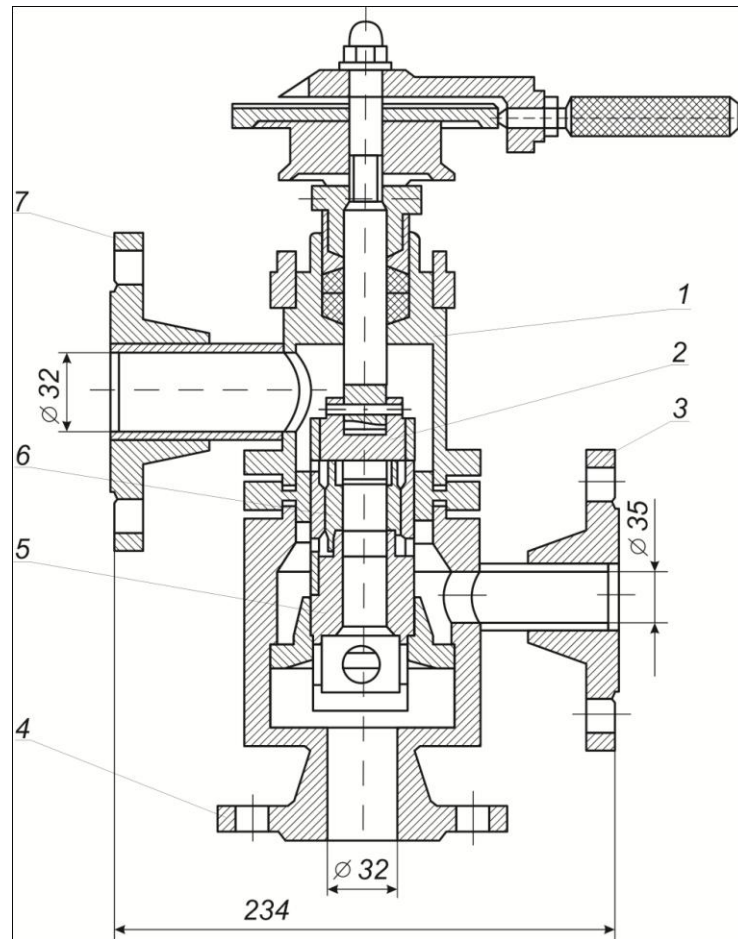


Рис. 3.3. Загальний вид ультразвукового змішувача:

1 – збірний сталевий корпус; 2, 5 – резонатори першого і другого ступеня;
3, 7 – вхідні патрубки; 4 – вихідний патрубок; 6 – проміжний резонатор

Принцип дії змішувача заснований на інтенсивному високодисперсному перемішуванні рухомих під тиском потоків змішуваних палив в резонаторах, де енергія перепаду тиску потоків перетворюється в енергію ультразвукових коливань завдяки знакозмінному гальмуванню тих, що набігають один на

одного під гострим кутом струменів палив у вихровій камері резонаторів. Із-за пульсації потоків палива з ультразвуковою частотою виникають зони кавітацій, що приводить до високодисперсного дроблення і перемішування палив. Канали резонаторів, де виникає кавітація, виконані у вигляді спіралей Архімеда. Швидкість розповсюдження звуку в рідинах коливається в межах 1100...4700 м/с, а швидкість перебігу рідини набагато менше і складає всього 1...1,5 м/с. Таким чином, в ультразвукових агрегатах виникає стояча ультразвукова хвиля, а паливо, що піддається обробці постійно знаходиться під впливом ультразвукових коливань.

3.5. Висновки за розділом 3

Як результат виконаного аналізу визначимо наступне.

1. Використання важких, високо сірчистих палив в СДВЗ призводить до корозійного зносу деталей ЦПГ та газовипускної системи
2. Покращення якості процесу згоряння та технічного стану деталей ЦПГ СДВЗ досягається шляхом десульфурізації палива.
3. Як метод, що сприяє покращенню процесу підготовки палива доцільно використовувати його ультразвукову обробку.
4. Процес ультразвукової дії на паливо здійснюється у спеціальних пристроях – ультразвукових гомогенізаторах, подрібнювачах та змішувачах.

4. ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА В СИСТЕМАХ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ СУДНОВИХ СЕРЕДНЬООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

4.1 Технологічне забезпечення досліджень з ультразвукової кавітаційної обробки палива в суднових умовах

Як було встановлено в попередніх розділах, одним з додаткових методів підготовки палива, що сприяє зменшенню шкідливого впливу сірки на деталі циліндричної групи дизеля, є кавітаційна обробка палива ультразвуком. У суднових умовах це завдання технологічно може бути здійснена шляхом дообладнання штатних систем підготовки палива додатковими модулями, які здійснюють даний процес. Подібні питання розглядалися, вивчалися і виконувалися для двигунів відносно невисокою потужності, що використовуються в автомобільному і залізничному транспорті, а також для палив з масовим вмістом сірки до 1 %. Аналогічні дослідження для суднової енергетики, яка характеризується високою агрегатної потужністю, широким спектром використовуються палив і автономністю роботи СЕУ практично відсутні. Крім того, при визначенні актуальності подібних розробок для систем підготовки палива ДВЗ морських суден необхідно враховувати рівень ризиків можливих відмов і складність виконання технологічних робіт у разі порушення працездатного стану вузла або елемента двигуна. Якщо доставка запасних частин і їх заміна при аварії стаціонарних двигунів може бути виконана протягом декількох годин, то для двигунів, що використовуються на морських судах, подібні заходи з урахуванням дальності і автономності плавання судна можуть досягати декількох десятків днів. Статистика позаштатних ситуацій, пов'язаних з аваріями паливних систем і їх елементів, в своєму розпорядженні дані про використання морських буксирів для транспортування аварійного судна в найближчий порт. Таким чином,

впровадження позитивного досвіду експлуатації систем додаткової ультразвукової обробки палива може сприяти не тільки підвищенню економічності роботи суднових дизелів, а й надійності роботи всього судового пропульсивного комплексу [37].

Паливо для суднових дизелів з точки зору дисперсної системи має в'язкість, що не підкоряється законам Ньютона, Пуазейля, Стокса, тому що входять до її складу довгі безладно розташовані молекули парафіну і смол утворюють гнучку решітку. Тому система надає значний опір силам зсуву. Кавітація руйнує безперервний ланцюжок, розриваючи зв'язку між окремими частинами молекул. Таким чином, кавітація впливає на зміну структурної в'язкості, тобто на розрив Ван-дер-Ваальсових зв'язків всередині палива. Додаткова ультразвукова обробка палива, перш за все, сприяє поліпшенню дисперсних якостей палива, а явище кавітації, що супроводжує цей процес, призводить до додаткової активації його вуглеводневих складових і розщепленню C-C і C-S зв'язків.

Для кавітаційного впливу на рідину використовуються гідродинамічні, електродинамічні, п'єзоелектричні, магнітострикційні і механічні генератори кавітації. В ультразвуковому діапазоні найбільш поширені п'єзоелектричні і магнітострикційні генератори кавітації. У цих електроакустичних перетворювачах використовується прямий магнітострикційний і п'єзоелектричний ефект в змінних магнітних і електричних полях. Діапазон частот збудження перетворювачів є дуже широким (від 8 до 44 кГц і вище). Ультразвукові коливання від перетворювача передаються до оброблюваних речовин через спеціальні пристрої (концентратори, пластини та ін.), що закінчуються поверхнею, яка випромінює [43]. На практиці класифікують три діапазону ультразвукового поля: високі частоти (2...10 МГц); середні частоти або сонохімія (300...100 кГц) і традиційний низькочастотний діапазон (<300 кГц). Високочастотні діапазони викликають кавітацію, нагрівання, створюють

турбулентність, стискають-розряджають рідину, руйнують молекули, змінюють структуру рідини. Високочастотна ультразвукова обробка палива застосовується для обробки великих обсягів палива, вміст сірчистих домішок в яких перевищує 4 %. Її використання характерно для початкової переробки нафтопродуктів. Низькочастотний діапазон також викликає кавітацію в рідині, створює напруження розтягу, при цьому ставиться до слабо енергетичного впливу, що викликає в основному зміну властивостей структурної рідини. Саме цей діапазон ультразвукових хвиль найбільш повно підходить для обробки палива в суднових умовах.

Дослідження впливу ультразвукової кавітаційної обробки палива на сірчистий знос ЦПГ і параметри роботи суднового двигуна проводилося для ряду суднових СОД, одним з яких був дизель S6A2 фірми «Mitsubishi» з наступними характеристиками:

діаметр циліндра – 0,15 м;

хід поршня – 0,19 м;

номінальна потужність – 360 кВт;

частота обертання колінчастого вала – 1000 об/хв.

Названі дизелі в кількості трьох штук входили до складу суднової допоміжної енергетичної установки. Дизелі мали кожен свою автономну систему подачі палива, що давало можливість проводити дослідження для окремого дизеля з паливом, які пройшли різні етапи підготовки. Паливна система одного з двигунів не піддавалася перекомплектації і експлуатувалася в «штатному» стані, при цьому даний дизель приймався за «контрольний». Паливо до двох інших дизелів подавалося після додаткової кавітаційної обробки, для чого паливна система цих дизелів була доукомплектована модулем ультразвукової кавітаційної обробки.

4.2. Дослідження впливу ультразвукової обробки палива на сірчистий знос деталей циліндрової групи

При згорянні палива в циліндрі дизеля все що містяться в ньому сірчисті з'єднання утворюють двоокис SO_2 і трехокись SO_3 сірки. Одночасно в циліндрі утворюється велика кількість водяної пари і, таким чином, в продуктах згорання з'являється система з двох конденсуються компонентів $\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{SO}_4$, яка обумовить можливість інтенсивної сірчистої корозії, яка може бути газової або рідинної. Чутливість дизелів до сірчистої корозії залежить від теплової напруженості ЦПГ і питомої потужності. При надлишку кисню і високої температури підвищується теплова напруженість, а разом з нею інтенсивність газової корозії. Це призводить до газової корозії тарілок випускних клапанів, верхній частині циліндричної втулки, першого поршневого кільця, а також газовипускного тракту. При зменшенні температури в циліндрі дизеля даний вид корозії і пов'язаного з нею зносу знижується. При різкому зниженні теплового режиму переважає рідинна корозія, підвищена інтенсивність якої спостерігається під час пуску двигуна. Як газова, так і рідинна сірчиста корозія є причиною наявності сірки в складі палива.

У разі кавітаційної обробки палива відбувається розрив його молекулярних ланцюжків під дією напруг, що розтягують, епіцентром яких є так звана «кавітаційна каверна». У момент розриву кавітаційної каверни, тиск і температура газу локально можуть досягти значних величин (за розрахунковими даними до 100 МПа і до 10000 К відповідно). Після розриву каверни в навколишньому рідині поширюється сферична ударна хвиля, швидко загасаюча в просторі. При генеруванні імпульсних напруг, що розтягують в рідині, присутні в ній зародки кавітації (стійкі парові і газові бульбашки малих розмірів) починають рости, утворюючи кавітаційний

кластер, форма і розміри якого визначаються початковим спектром розмірів кавітаційних зародків, характером прикладається напруги і граничними умовами. У кавітаційну каверну можуть проникати пари рідини, розчинені гази, а також речовини з високою пружністю пара і не можуть проникати іони або молекули нелетких розчинених речовин [43]. Виділяється в процесі схлопування каверни енергії досить для порушення, іонізації і дисоціації молекул сірки, що, згодом, призводить до розриву C-S зв'язків.

Вплив кавітаційної обробки палива на сірчисту корозію ЦПГ може бути проаналізовано на прикладі визначення зносу циліндричної втулки і верхнього поршневого кільця суднового СОД 6NSD-M Nigita Power Systems. Результати вимірювання лінійного зносу циліндрових втулок I_h і масового зносу поршневих кілець I_m наведені на рис. 4.1 і 4.2 [44].

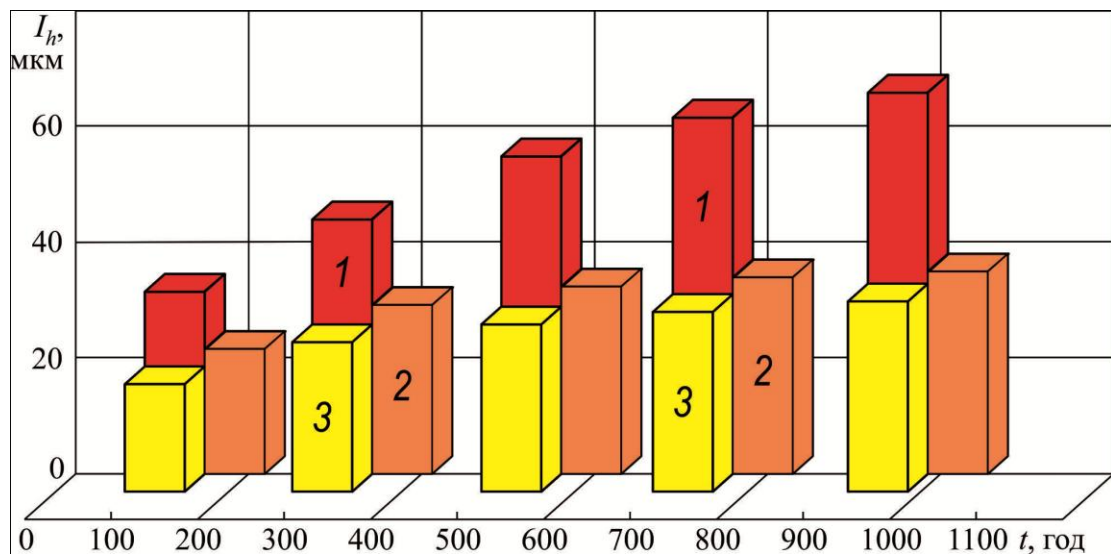


Рис. 4.1. Корозійний знос циліндрових втулок суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умов проведення експерименту:

1 – паливо без додаткової обробки; 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку; 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку з подачею повітря в зону кавітації

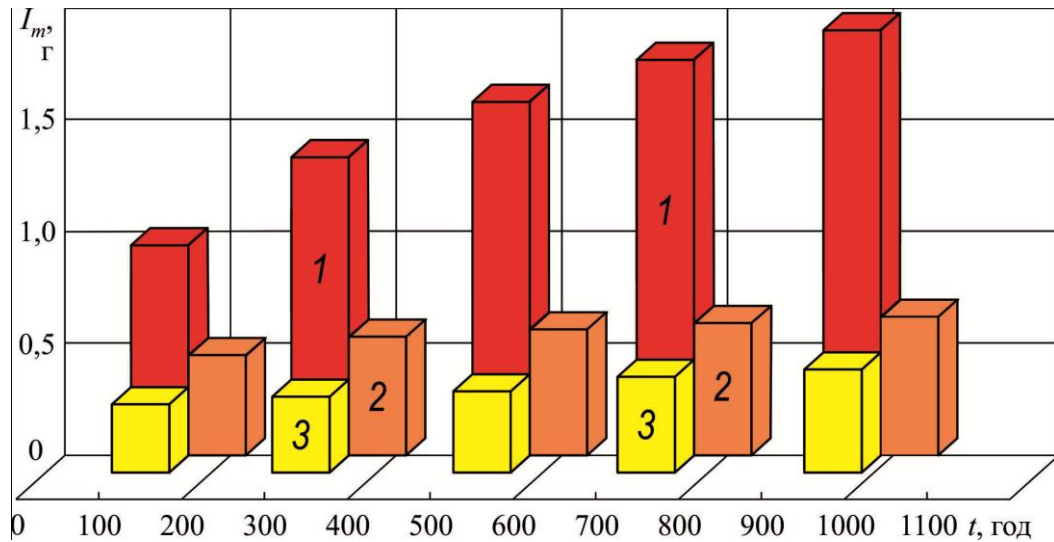


Рис. 4.2. Корозійний знос поршневих кілець суднового дизеля 6NSD-M Nigita

Power Systems за різних умов проведення експерименту:

1 – паливо без додаткової обробки; 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку; 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку з подачею повітря в зону кавітації

Результати вимірювання зносу циліндрових втулок і поршневих кілець наведені в таблиці 4.1.

Зниження зносу циліндрових втулок ΔI_h та поршневих кілець ΔI_m у випадку додаткової обробки палива (під час додаткового використання в системі паливопідготовки тільки ультразвукового кавітатора або під час використання ультразвукового кавітатора і додаткової подачі повітря в зону кавітації) в порівнянні з випадком, коли підготовка здійснюється без зазначених способів визначається за виразами:

$$\Delta I_h = I_h^0 - I_h^{УК}, \quad \Delta I_h = I_h^0 - I_h^{УК+П};$$

$$\Delta I_m = I_m^0 - I_m^{УК}, \quad \Delta I_m = I_m^0 - I_m^{УК+П};$$

де I_h^0, I_m^0 – знос циліндрових втулок та поршневих кілець під час експлуатації системи паливопідготовки у звичайному варіанті;

$I_h^{УК}, I_m^{УК}$ – знос циліндрових втулок та поршневих кілець під час використання в системі паливопідготовки тільки ультразвукового кавітатора;

$I_h^{УК+П}, I_m^{УК+П}$ – знос циліндрових втулок та поршневих кілець під час використання в системі паливопідготовки ультразвукового кавітатора і подачі повітря в зону кавітації

За отримані даними побудовані графічні залежності (рис.4.3 і 4.4), що характеризують зниження зносу розглянутих деталей при застосуванні додаткової кавітаційної обробки палива.

Таблиця 4.1. Результати експериментальних досліджень по визначенню зносу деталей дизеля при різних умовах експлуатації

	Умови експлуатації	Час експлуатації, год				
		180	390	590	810	1030
Знос циліндрової втулки, I_h , мкм	1	32	46	56	62	65
	2	22	31	35	36	37
	3	18	24	26	31	33
Знос верхнього поршневого кільця, I_m , Г	1	0,95	1,37	1,56	1,71	1,92
	2	0,48	0,57	0,62	0,64	0,67
	3	0,32	0,38	0,41	0,43	0,45

У таблиці 4.1 під умовами експлуатації 1, 2, 3 розуміється:

1 – паливо без додаткової обробки (під час експлуатації системи паливопідготовки дизеля в «штатному» режимі);

2 – паливо, що пройшло додаткову кавітаційну обробку (під час додаткового використання в системі паливопідготовки тільки ультразвукового кавітатора);

3 – паливо, що пройшло додаткову кавітаційну обробку (під час використання ультразвукового кавітатора і додаткової подачі повітря в зону кавітації)

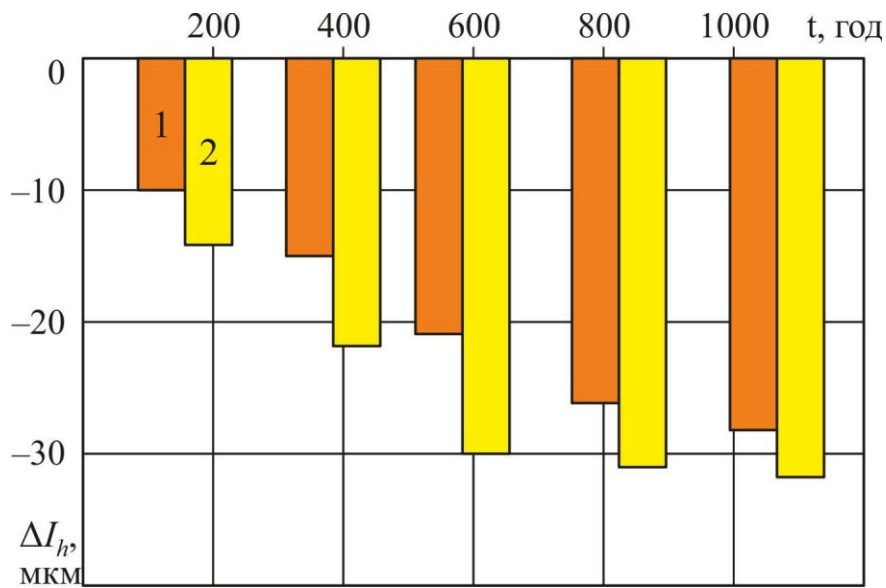


Рис. 4.3. Зниження корозійного зносу циліндрових втулок суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умовах експлуатації:

1 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при використанні тільки ультразвукового кавітатора); 2 – паливо, що пройшло додаткову кавітаційну обробку (при використанні ультразвукового кавітатора і подачі повітря в зону кавітації)

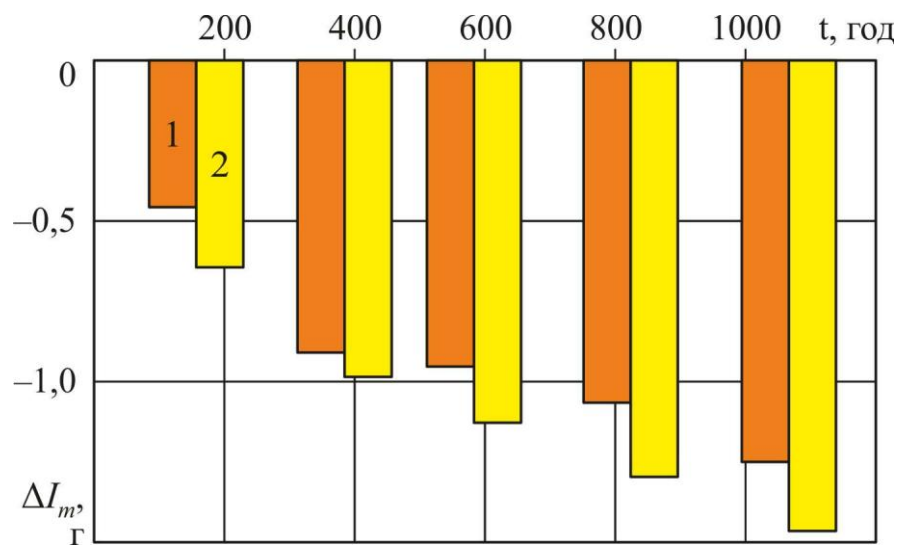


Рис. 4.4. Зниження корозійного зносу поршневих кілець суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умовах експлуатації:

1 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при використанні тільки ультразвукового кавітатора); 2 – паливо, що пройшло додаткову кавітаційну обробку (при використанні ультразвукового кавітатора і подачі повітря в зону кавітації)

4.3. Висновки за розділом 4

Як основні висновки по представленим в розділі 4 результатами зазначимо таке.

1. Як додатковий метод, що сприяє покращенню підготовки суднових важких сірчистих палив до подальшого згоряння у дизелі доцільно використовувати ультразвукову обробку.

2. Ультразвукова кавітаційна обробка палива призводить до зниження сірчистого зносу деталей циліндропоршневої групи.

3. Найбільшу ефективність процес ультразвукової обробки палива оказує на стан поршневих кілець, що особливо актуально, враховуючи важливість даного вузла в забезпеченні як якісних процесів стиснення, згоряння і розширення, і надійності роботи сполучення поршень – втулка циліндра.

5. ВДОСКОНАЛЕННЯ СУДНОВИХ СИСТЕМ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ

5.1. Розробка модульних схем побудови суднових систем підготовки палива

В даний час існує тенденція виготовлення суднового обладнання у вигляді модулів. Прикладом такого модуля підготовки палива служить система Fuel Completed System (FCS) фірми «Alfa Laval» (Швеція), наведена на рис. 5.1.

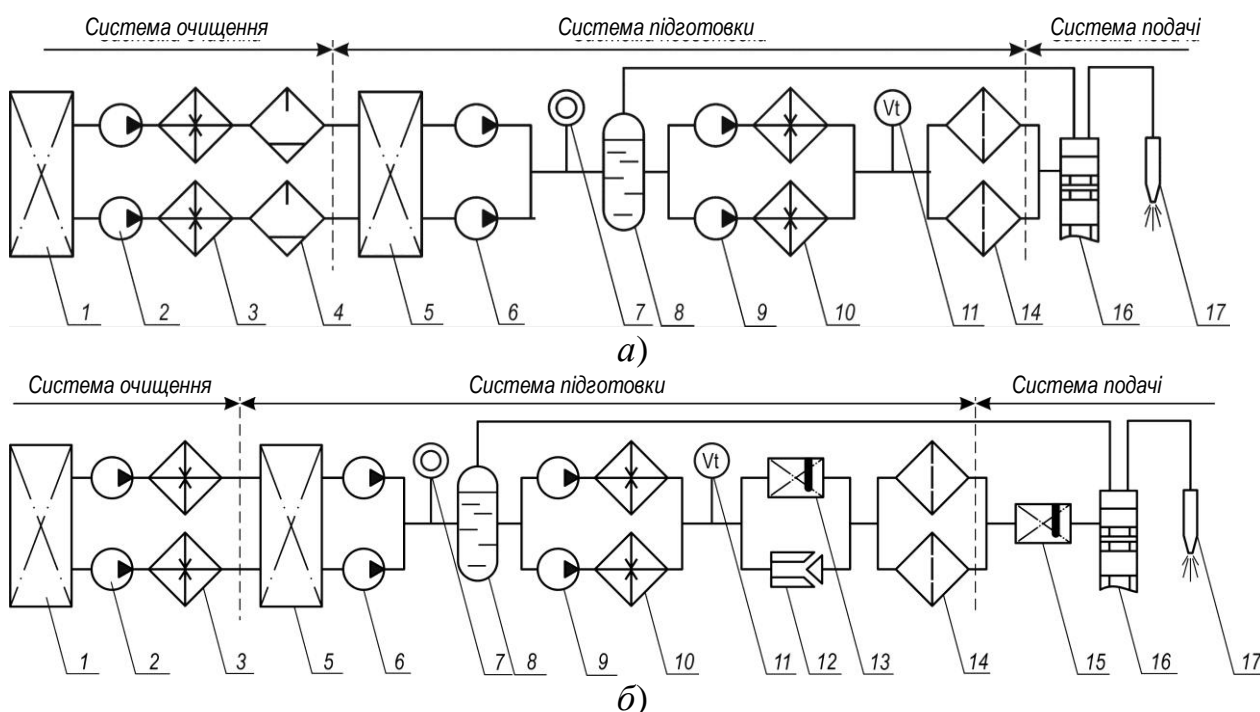


Рис. 5.1. Модульна схема побудови паливної системи підготовки палива:

а) стандартна; б) у разі використанні ультразвукової обробки палива:

- 1 – відстійно-витратні цистерни; 2 – насоси, що перекачують паливо;
- 3 – підігрівачі палива 1-ої ступені; 4 – сепаратори палива; 5 – витратна цистерна; 6 – паливо підкачувальні насоси; 7 – витратомір; 8 – деаератор;
- 9 – циркуляційні насоси; 10 – підігрівачі палива 2-го ступеня; 11 – датчик в'язкості; 12 – гідродинамічний активатор палива; 13 – ультразвукова установка 1-ої ступені; 14 – автоматичний фільтр; 15 – ультразвукова установка 2-го ступеня; 16 – ПНВТ; 17 – форсунка

Система створена з урахуванням багаторічного досвіду в галузі виготовлення модульних установок попередньої обробки і змішування палива. Основною функцією системи є забезпечення надійності підготовки важкого палива від приймального танка і до двигунів. Система забезпечує подачу палива з урахуванням необхідної витрати, тиску і в'язкості. Модулі даної системи відрізняються за своїм цільовим призначенням, а також за способом перетворення енергії [45].

Модуль очищення забезпечує необхідний структурний склад палива і використовується як в комплексі з іншими модулями підготовки системи, так і для автономного режиму роботи. В останньому випадку відбувається «внутрішня» циркуляція палива, в результаті якої досягається необхідна якість його очищення. Даний модуль підготовки палива є самим енергоємним, оскільки включає до свого складу такі елементи, як відстійне-витратні цистерни, насоси, що перекачують паливо, паливні підігрівачі і паливні сепаратори. При цьому саме паливо, перебуваючи в даному модулі, має найгірші у всьому своєму «життєвому» циклі характеристики – високу в'язкість, механічні домішки, шламові включення. Саме в цьому модулі відбувається максимальний підведення теплової енергії від зовнішніх джерел (парових або електричних підігрівачів) до палива і якісна зміна його структури. Температура палива в цьому модулі змінюється від 20...30°C до 90...100°C, в'язкість від 750 сСт (для понад важких палив) до 20...50 сСт, вміст механічних домішок знижується до мінімального значення, з палива практично повністю виводиться вода.

Другий модуль (система підготовки) забезпечує остаточну підготовку палива перед його безпосередньою подачею в циліндр дизеля. Основними складовими даного модуля є паливо підкачувальні і циркуляційні насоси, підігрівачі палива 2-го ступеня, фільтраційні установки, автоматичні пристрої, що забезпечують контроль суцільності потоку і регулювання в'язкості палива. В даний модуль також входить бустерна установка, за

допомогою якої підтримується необхідний тиск в системі, а також Деаераційно і дегазаційні резервуари, які очищають паливо від повітряних і газових домішок. Паливо в цей модуль надходить в попередньо підігрітому стані, що знижує витрати енергії на його підготовку [46].

Дані два модуля складають основу підсистеми низького тиску. Робота даних модулів повинна забезпечити необхідні експлуатаційні параметри палива – відсутність в ньому механічних домішок, розмір яких перевищує зазор в прецизійних парах паливної апаратури високого тиску.

Третій модуль являє собою паливну систему високого тиску і забезпечує подачу палива в циліндр дизеля. Енергія в даному модулі проводиться самим дизелем і передається палива через кінематичну схему колінчастий вал – розподільний вал – штовхач ПНВТ. Енергоємність даного процесу відноситься до механічних втрат дизеля і може досягати 5...7% його потужності. В кінцевому рахунку, в даному модулі за рахунок хімічної реакції окислення палива киснем повітря потенційна енергія палива перетворюється в теплову енергію газів і, в наслідок, в корисну роботу поршня дизеля.

В результаті проведених в досліджень пропонується пере комплектація модулів підготовки палива. При цьому основний акцент спрямовується на використання ультразвукової обробки палива з можливою відмовою від процесу сепарації палива, який не тільки відноситься до одного з найбільш енергоємних, а й знижує теплотворну здатність палива (за рахунок відведення в шлам горючих складових). Змінена система підготовки палива показана на рис. 5.4, б. При цьому в даній схемі відсутній вузол сепарації палива в системі очищення, а система підготовки додатково укомплектована блоками ультразвукової підготовки 1-ої і 2-го ступеня. Крім того, блок ультразвукової підготовки 1-ої ступені передбачає як безпосередньо використання процесу ультразвукової кавітації, що здійснюється за

допомогою генератора 13, так і гідродинамічну активацію, яку виконують в активаторі 12.

У процесі свого «життєвого циклу» від прийомних цистерн до згоряння в циліндрі дизеля, паливо послідовно проходить цілий ряд технологічних процесів, що дозволяють реалізувати всі основні функції паливної системи.

Процес очищення палива забезпечується за рахунок його гравітаційного відстоювання, грубої і тонкої фільтрації, а також сепарації.

Стабілізація в'язкості здійснюється за рахунок підігріву палива, а її контроль і регулювання виконується за допомогою автоматичної системи регулювання спалювання палива. Дані технологічні процеси здійснюються в модулях очищення і підготовки палива (див. рис. 5.1).

Стиснення палива в ПНВТ і уприскування через розпилювач форсунки відбувається за допомогою паливної апаратури високого тиску, при цьому необхідна синхронізація з ходом поршня з урахуванням кута повороту колінчастого вала і кута між послідовними спалахами в циліндрі, а також формування закону подачі палива. Паралельно з подачею палива в циліндр відбуваються триботехнічні процеси в паливній апаратурі високого тиску, які безпосередньо впливають на якість розпилювання і подальшого займання палива. Зниження енергетичних втрат в паливній апаратурі високого тиску (в модулі подачі палива) можливо за рахунок поліпшення якості її виготовлення, а також за рахунок інтенсифікації процесів в модулях очищення і підготовки.

Комплектація і робота сучасних паливних систем суднових ДВЗ відбувається в суворій відповідності технологічних процесів і робочих характеристик всіх складових їх модулів [47].

5.2. Забезпечення вимог енергетичної ефективності при використанні модульних схем підготовки важких палив для суднових двигунів внутрішнього згоряння

У сучасних ринкових умовах морські та річкові судноплавні компанії, основну матеріальну базу яких становить транспортний флот, відчують серйозні економічні і фінансові труднощі в конкурентній боротьбі на світовому ринку транспортних послуг. Більшість транспортних суден експлуатуються судноплавними компаніями 10...20 років.

Для збереження своєї присутності на ринку судновласники змушені шукати шляхи істотного скорочення власних витрат з тим, щоб не тільки конкурувати з іншими представниками морської індустрії, а й забезпечити рівень доходів, який би створював умови для розширеного відтворення. Судноплавні компанії реалізують скорочення власних фінансових витрат різними шляхами. До одного з таких варіантів відноситься переклад суднових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ), що працюють як по дво-, так і по чотиритактному циклу на експлуатацію з використанням дешевих сортів високов'язких палив, в'язкість яких при 50°C перевищує 380 мм²/с (або 380сСт). Одним з перспективних методів зниження фінансових витрат є перехід на шлях оптимізації енергоспоживання в системі підготовки палива і підвищення енергетичної ефективності суден [47].

З 1 січня 2013 року відповідно до положень Резолюції ІМО МЕРС.203(62) вступили в силу нові правила Конвенції МАРПОЛ, спрямовані на підвищення енергетичної ефективності суден. На все нові судна, побудовані після 1 січня 2013 року, поширюються вимога щодо розрахунку Конструктивного коефіцієнта енергетичної ефективності судна (ККЕЕ) або Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI), а для суден, що знаходяться в експлуатації, з цієї дати вводиться вимога щодо наявності на борту Судового

плану управління енергетичною ефективністю судна (СПУЕС) або Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).

Для визначення енергетичних витрат на забезпечення процесу паливопідготовки виконувалися дослідження з компонентами СЕУ судна, призначеного для перевезення генеральних вантажів дедвейтом 7650 тонн, оснащеним ГД з потужність 3440 кВт. При цьому визначалося кількість безперервно енергії, що витрачається на додаткову підготовку високов'язкого палив RMG 380 в паливній системі суднового СОД, а також визначалися можливості мінімізації цих витрат.

Аналіз функціонування паливної системи показав, що на судні використовується загальноприйнята стандартна система паливо підготовки двигуна, рекомендована міжнародним радою по двигунах внутрішнього згоряння (СІМАС). Дана система складається з послідовно включених активних і пасивних елементів з дворазовим резервуванням, керуючих експлуатаційними характеристиками палив.

Основні процеси, які в ній протікають: відстоювання, фільтрація, сепарація, нагрівання, розпилювання палива, дозування подачі і синхронізація з рухом поршня. В даний час при експлуатації цієї системи немає загальноприйнятої концепції номінування параметрів роботи її елементів. Документи, які регламентують підготовку палива на судні, зазвичай складаються з нормативних документів класифікаційних товариств, інструкцій заводу будівельника двигуна, виробника елементів паливної системи (насосів, фільтрів, підігрівачів і т.п.), аналізів палива, а також рекомендацій з підтримки температури палива в танках запасу, елементах системи і перед ПНВТ.

У науково-технічній літературі міжмолекулярні процеси, що протікають в високов'язких дисперсних паливах при зміні їх функціональних характеристик в системах паливопідготовки СДВЗ, зазвичай для спрощення вважаються мають лінійну залежність, тобто описуються за допомогою

ньютонівської моделі поведінки. При цьому слід враховувати, що в ряді випадків зсувний характер перебігу палива визначається законами граничного тертя, а іноді (при взаємодіях молекул палива з твердою металевою поверхнею паливної апаратури і деталями паливо перекачуючих і паливо підкачуючих насосів) можуть бути представлені як системи вуглецевих нанотрубок в матриці епітропних рідких кристалів [50]. Просторове розміщення молекул в матриці епітропного рідкого кристала важкого палива має слідувати термодинамічному закону, що виражає прагнення системи до мінімуму вільної енергії [3]. Цілеспрямоване регулювання молекулярної структури високов'язких палив, полярності, а також кількості дефектів дисперсної фази шляхом впливу зовнішніми параметрами, такими, як температура, тиск, ультразвукові та електричні поля, дозволяють в ряді випадків добитися таких експлуатаційних властивостей палив, які є найбільш сприятливими для їх спалювання в дизелях .

Для визначення безперервно енергії, що витрачається на додаткову підготовку високов'язкого палива RMG 380 в паливній системі суднового СОД, дана паливна система СІМАС була умовно розділена на шість послідовно включених блоків, пов'язаних короткими трубопроводами (рис. 5.2). Блоки паливо підготовки включали в себе наступні основні компоненти:

I-ий блок - танк запасу важкого палива, паливний підігрівач, паливо перекачувальний насос, відстійна цистерна;

II-ой блок – паливо підкачувальний насос сепаратора палива, паливний підігрівач сепаратора палива; I

III-ий блок - сепаратор палива, видаткова цистерна;

IV-ий блок - бустерний насос, бустерна цистерна;

V-ий блок - паливний підігрівач, регулятор в'язкості, фільтр грубої очистки палива;

VI-блок - паливний фільтр тонкого очищення, ПНВТ, форсунка.

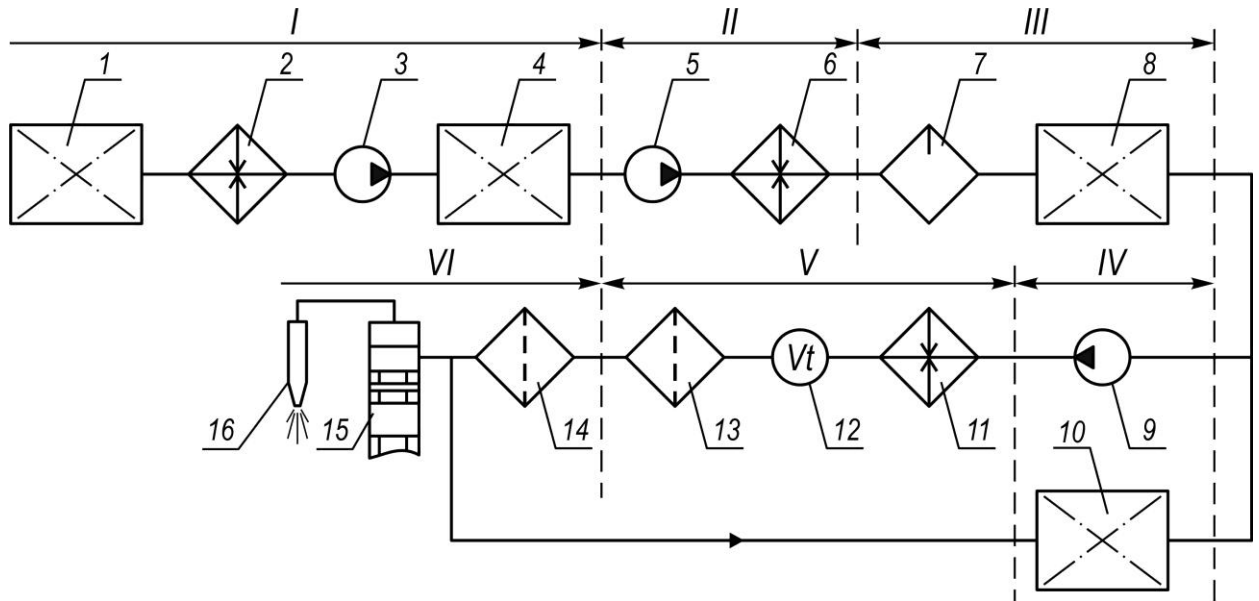


Рис. 5.2. Блоки підготовки палива в паливній системі суднового дизеля:

- 1- танк запасу важкого палива; 2 - паливний підігрівач;
 3 – паливо перекачувальний насос; 4 - відстійна цистерна;
 5- паливо підкачувальний насос сепаратора палива; 6 - паливний підігрівач сепаратора палива; 7- сепаратор палива; 8 - Основні цистерна; 9 - бустерний насос; 10 - бустерна цистерна; 11 - паливний підігрівач; 12 - регулятор в'язкості; 13-фільтр грубої очистки палива; 14 - паливний фільтр тонкого очищення; 15 -ПНВТ; 16 - форсунка

Процеси, які відбуваються в кожному з блоків паливної системи можуть бути описані відомими фізичними рівняннями:

- рівняння нерозривності (суцільності) потоку:

$$Q = V_i S_i = const,$$

- рівняння Бернуллі:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + h_f + \Sigma h_w,$$

- рівняння Дарсі (втрати напору по довжині трубопроводу):

$$h_w = \zeta \frac{V_i^2}{2g},$$

де Q - об'ємна витрата палива, м³/с;

V_i - швидкість руху палива в i -му блоку, м/с;

S_i - перетин трубопроводу в i -му блоці, м²;

γ - питома вага палива, м³/кг;

p_1, p_2 - тиску палива в послідовних перетинах трубопроводу, кПа;

z_1, z_2 - геометрична висота всмоктування в послідовних перетинах трубопроводу, м;

V_1, V_2 - середня швидкість палива в послідовних перетинах трубопроводу, м/с;

α - коефіцієнт кінетичної енергії;

g - прискорення вільного падіння, мм²/с;

h_w - загальні втрати напору в гідравлічній системі, кПа;

ν - кінематична в'язкість палива, мм²/с;

T - температура палива, К;

h_f - коефіцієнт Коріоліса;

ζ - місцеві втрати напору в паливній системі.

Рівняння, що визначають енергетичні витрати на процес паливо підготовки:

- кількість тепла подведеного до палива на i -ом ділянці:

$$W_{ti} = c_i m_i \Delta T_i,$$

- кількість електричної енергії, підведене до елементів ділянки:

$$W_{ei} = U_i I_i \cos \varphi,$$

- сумарні енергетичні витрати на підготовку палива, що складаються з витрат енергії, підведений до електродвигуна насосів або сепараторів важкого палива, і кількості тепла підведеного до палива в i -ом блоці:

$$W_{\Sigma} = W_{Ti} + W_{Si}.$$

У наведених виразах

c - питома теплоємність палива, кДж/(кг·К);

m - маса палива, кг;

ΔT - різниця температури палива до і після обробки, К;

U - напруга, В;

I - сила струму, А;

$\cos\varphi$ - кут зсуву між струмом і напругою.

На наступному етапі для визначення енергетичних витрат на паливо підготовки важкого палива були проведені експериментальні дослідження робочих параметрів паливної системи (температури і тиску важкого палива RMG380 щодо довжини трубопроводу). Для цього система паливо підготовки була обладнана додатковими контрольно-вимірювальними приладами - манометрами і термометрами. Додаткові вимірювальні прилади були встановлені в максимально наближених місцях до досліджуваних перетинах.

Зняті параметри системи паливо підготовки тиску, температури, в'язкості важкого палива в реальному часі при постійному навантаженні СДВЗ використовувалися в розробленій програмі (на базі пакету MATLAB R2011b) з розрахунку енергетичних витрат на процес паливо підготовки для шести блоків паливної системи. Результати розрахунку сумарних енергетичних витрат на підготовку важкого палива RMG 380: I блок – $\Sigma W_I = 21,6$ кВт; II блок – $\Sigma W_{II} = 17,6$ кВт; III блок – $\Sigma W_{III} = 6,85$ кВт; IV блок – $\Sigma W_{IV} = 0,72$ кВт; V блок – $\Sigma W_V = 4,73$ кВт; VI блок – $\Sigma W_{VI} = 6,82$ кВт; $\Sigma W_{I-VI} = 59,32$ кВт (що становить 1,72% від потужності СДВЗ).

Перевірка похибки розробленого методу виконано на підставі порівняння розрахункових і експериментальних даних визначення енерговитрат на паливо підготовки важкого палива в паливній системі двигуна і не перевищує 6% [50].

Наступним етапом досліджень була оптимізація роботи системи паливо підготовки СДВЗ.

В якості цільової функції була обрана величина енергетичних витрат на процес паливо підготовки. Рішення, що дозволяє мінімізувати енергетичні витрати на паливо підготовки, полягало в призначенні відповідних робочих параметрів паливної системи - тиску і температури, які задовольняють мінімальним рішенням цільової функції. Мінімальні витрати на процес паливо підготовки були визначені для дизельного палива DMA, що має в'язкість 5...8 мм²/с (сСт) при 20°C. Дані сорти палива не вимагають додаткових витрат енергії на збільшення температури, а крім того, на процес їх сепарації споживається менша кількість енергії [46].

В результаті розрахунку мінімізації енергетичних витрат на паливопідготовку дизельного палива марки DMA були отримані наступні результати: I блок – $\Sigma W_I = 12,3$ кВт; II блок – $\Sigma W_{II} = 8,6$ кВт; III блок – $\Sigma W_{III} = 3,42$ кВт; IV блок – $\Sigma W_{IV} = 0,65$ кВт; V блок – $\Sigma W_V = 2,18$ кВт; VI блок – $\Sigma W_{VI} = 6,54$ кВт; $\Sigma W_{I-VI} = 33,69$ кВт (що становить 0,98% від потужності СДВЗ).

Мінімізація енергетичних витрат на підготовку важкого палива в VI-му блоці системи паливо підготовки не раціональна. Причиною цього є мізерно мале зміна тиску в перерізі паливного трубопроводу на виході з ПНВТ, а також відсутність штатних манометрів і неможливість установки експериментальних в перетинах перед і після ПНВТ, що не дозволяло визначити параметри зміни тиску при його регулюванні в цих перетинах.

Сумарні мінімальні енергетичні витрати на паливо підготовки всієї паливної системи, при можливості регулювання основних параметрів

паливної системи згідно із заданими меж p і T для дизельного палива марки DMA становить - 33,69 кВт. Зниження потужності, споживаної в даному випадку системою паливopідготовки, становить 25,63 кВт (43,2% від базового значення необхідної потужності).

Удосконалення системи паливopідготовки СДВЗ може бути виконана як за рахунок вибору оптимальних параметрів в системі, так і за рахунок виведення з відповідних блоків системи окремих елементів з наступною їх заміною на альтернативними, що забезпечують підтримку заданих експлуатаційних показників палива і параметрів в паливній системі.

Для здійснення поставленого завдання виконувалося така:

в I-му блоці, була проведена тільки настройка температур підігріву важкого палива по танках запасу;

в II-му блоці, була проведена настройка температур підігріву важкого палива в відстійних танках важкого палива, сепаратор важкого палива був спочатку продубльований, а згодом замінений установкою, що забезпечує ультразвукову підготовку палива;

в III-му блоці, була проведена настройка температур важкого палива у видатковій цистерні згідно з обраними меж мінімізації;

в IV-му блоку була проведена настройка тиску всмоктування і нагнітання бустерного насоса згідно з обраними меж мінімізації;

в V-му блоці, була проведена настройка температур підігріву важкого палива в підігрівачі важкого палива СДВЗ, а також тиску всмоктування і нагнітання циркуляційного насоса важкого палива СДВЗ згідно з обраними меж мінімізації.

Після переналаштування основних параметрів паливної системи p і T відповідно до обраних меж мінімізації, заміни сепаратора палива на ультразвукову установку були зняті параметри системи паливopідготовки в реальному часі на постійному навантаженні ГД і зроблено розрахунок

енергетичних витрат на забезпечення працездатності та функціонування паливної системи.

В результаті розрахунку енергетичних витрат на паливопідготовки важкого палива RMG 380 в системі паливопідготовки, що використовує замість сепарації ультразвукову обробку були отримані наступні результати: I блок – $\Sigma W_I=18,3$ кВт; II блок – $\Sigma W_{II}=6,4$ кВт; III блок – $\Sigma W_{III}=2,86$ кВт; IV блок – $\Sigma W_{IV}=0,68$ кВт; V блок – $\Sigma W_V=3,64$ кВт; VI блок – $\Sigma W_{VI}=6,68$ кВт; $\Sigma W_{I-VI}=38,56$ кВт (що становить 1,12% від потужності СДВЗ) [50].

Сумарне зниження енергетичних витрат на паливопідготовки всієї паливної системи при використанні ультразвукової обробки палива замість процесу його сепарації для важкого палива RMG 380 становить 20,76 кВт (35,0% від базового значення необхідної потужності).

Узагальнені діаграми енергетичних витрат в різних блоках на підготовку важкого палива RMG 380 до регулювання основних параметрів паливної системи, залежність мінімальних енергетичних витрат на підготовку дизельного палива DMA і залежність енергетичних витрат після регулювання основних параметрів паливної системи і використання ультразвукової обробки палива показані на рис. 5.3.

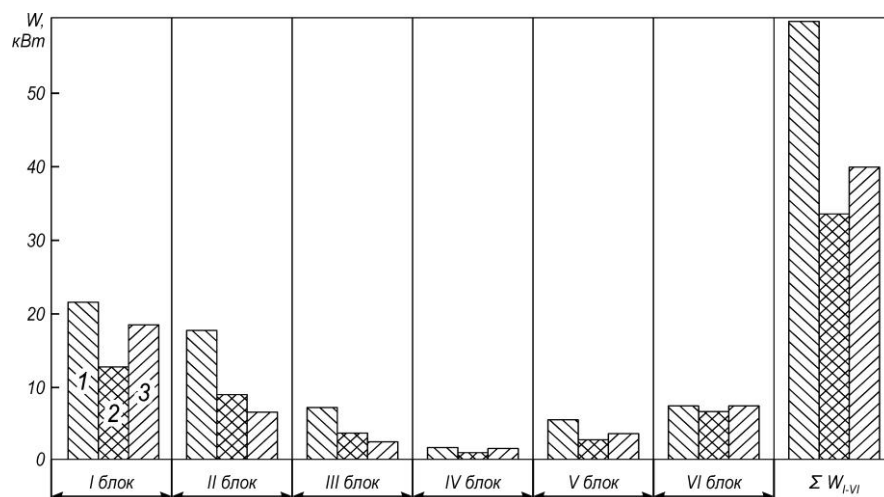


Рис. 5.3. Залежність енергетичних витрат у судновій системі

паливопідготовки: 1 – паливо RMG380; 2 – паливо DMA; 3 – паливо RMG380 за умовою використання ультразвукової підготовки

5.3. Висновки за розділом 5

В результаті досліджень, проведених в розділі 5, можна зробити такі висновки.

1. Розроблена система паливопідготовки суднових СОД, додатково включає до свого складу вузли ультразвукової впливу і гідродинамічної активації палива, може виробляти як одно-, так і двоступеневу обробку палива. При цьому компоновка система можлива з використанням як тільки ультразвукового, так і комплексного (гідродинамічна активація і ультразвукова обробка) модуля паливопідготовки.

2. При використанні ультразвукової обробки важкого палива замість його сепарації сумарні енергетичні витрати стають порівнянними з енергетичними затратами, необхідними на підготовку дизельного палива.

3. Перевага пропонованої системи паливопідготовки в порівнянні зі штатною системи полягає в практичній відсутності втрати горючих складових палива, яке відбувається у відцентровому сепараторі. Крім того, поєднання фільтра тонкого очищення з генераторами кавітації забезпечують роботу системи паливопідготовки не тільки майже без втрат палива, але і з дуже високою ефективністю ультразвукової обробки, при цьому підвищується інтенсифікація процесу горіння палива і тим самим забезпечується зниження його питомої витрати.

6. 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.

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 VI до Конвенції МАРПОЛ наявність на борту судна ПУЕС є однією з підстав для отримання судном міжнародного сертифікату енергоефективності [52].

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:

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

е 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 [53].

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

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

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

Формула для визначення ККЕЕ містить наступні складові:

а) витрати пов'язані з головними двигунами (потужність ГД, витрата палива і викиди 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 $\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}$ – 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, кг/(кВт·г);

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

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

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

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

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

c) енергозберігаючі технології для допоміжних установок

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

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 6.1.

Таблиця 6.1. 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 6.2.

Таблиця 6.2. Вихідні дані для розрахунку ККЕЕ

Тип судна	Універсальне
Загальна довжина, м	116,23
Довжина між перпендикулярами, м	111,0
Ширина, м	18,0
Осадка, м	8,1
Дедвейт, тонн	7650
Головний двигун	8PC-2-5L фірми S.E.M.T. – Pielstick
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і питома ефективна витрата палива, г/(кВт·г)	3442, 195
Потужність, кВт і витрата палива, г/(кВт·г) ГД при 0,75 (MCR)	2582 185
Кількість ГД	1
Використовуване паливо ISO 8217-2010	RMK380
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Допоміжні двигуни	S6A2-MPTA
Максимальна тривала потужність (MCR), кВт і витрата палива (г/кВт·г)	232, 188
Кількість ДГ	3
Використовуване паливо	RMK 380
Вихідна потужність ДГ, кВт	1091
Питома теплотворна здатність палива, кДж/кг	41868
Швидкість судна при літній осаді і 75% потужності ГД на глибокій воді, вузли	13,8

Закінчення таблиці 6.2

Тип використаного гвинта	Гвинт, крок якого регулюється
Діаметр, м і кількість гвинтів	4,2, один
Льодовий клас	1,0
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 $K_{KE(MAX)}$

$$K_{KE(MAX)} = 107,5 \cdot 7650^{-0,216} = 15,58 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}$$

Розрахункове значення ККЕЕ визначимо за формулою

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

$$K_{KE(роз)} = \frac{1 \cdot 2582 \cdot 3,114 \cdot 185 + 226 \cdot 3,114 \cdot 188}{1,0 \cdot 7650 \cdot 1,0 \cdot 13,8} = 15,34 \frac{\text{гCO}_2}{\text{ТОНН} \cdot \text{МИЛЮ}}$$

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

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи зробимо наступні висновки.

1. В залежності від фракційного складу паливо, що використовується в суднових дизелях, володіє різними експлуатаційними показниками, одним із найважливіших з них є вміст сірки в паливі.

2. Підвищений вміст сірки в паливі сприяє погіршенню технічного стану деталей дизеля (насамперед циліндрової групи та газовипускної системи), а також його екологічних показників роботи.

3. Важливість вирішення завдань щодо забезпечення необхідної якості палива визначається вимогами Додатка VI конвенції MARPOL. Одним із способів виконання даних вимог є використання в СЕУ палив з вмістом сірки 0,01...0,1 %. Однак, на сьогоднішній момент нафтопереробні заводи не здатні забезпечити споживачів паливом подібної якості в повному обсязі, а судноплавні компанії не завжди можуть піти на підвищені фінансові витрати, пов'язані з купівлею подібних палив. Це, а також необхідність поповнення запасів палива у різних морських портах (у деяких з них можливо постачання суден лише важким паливом), призводить до того, що для забезпечення роботи СОД застосовуються палива з вмістом сірки до 0,5 %, використання яких призводить до підвищеного корозійного зносу ЦПГ і тому вимагає додаткової підготовки палива в суднових умовах.

4. Як метод, що з одного боку сприяє зниженню вмісту сірки в паливі, а з другого – дозволяє виконувати процес десульфурізації палива в суднових умовах, є обробка палива за допомогою його ультразвукового опромінювання.

5. Ультразвукова обробка палива здійснюється за допомогою ультразвукових генераторів в діапазоні частоти ультразвукового сигналу 20...45 кГц при потужності генератора 1...5 кВт.

6. Найбільшим доцільним містом проведення додаткової ультразвукової обробки палива є витратна паливна цистерна, що розташована безпосередньо біля паливних насосів високого тиску.

7. Для посилення ефекту десульфурізації палива можливо використовувати двохступеневу ультразвукову обробку палива, або комплексну обробку – гідродинамічну активацію (у першій ступені) та безпосередню обробку ультразвуковими хвилями (у другій ступені).

8. Використання додаткової ультразвукової обробки палив сприяє збереженню горючих складових палива, тобто його теплотворної здатності, яка зменшується при відцентровій сепарації палива через видалення горючих компонентів палива (вуглецю, кисню та сірки) з механічними домішками та водою, що видаляються з палива.

9. Найбільш доцільно використання методу ультразвукової обробки палива у модульній схемі побудови паливних систем. В цьому випадку в залежності від характеристик палива можливо використання різних схем підключення обладнання, що забезпечує обробку та очистку палива.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. 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>.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Миусов М.В. Электронные системы управления главными судовыми двигателями : учебное пособие / М.В. Миусов, В.И. Ланчуковский, Е.М. Оженко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 98 с..
7. Карьянский С.А. Двигатели MAN-B&W типа ME с электронным управлением : учебное пособие / С.А. Карьянский, Е.М. Оженко. – Одесса : НУ «ОМА», 2020. – 92 с.

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

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

10. 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.

11. 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.

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

13. Парменова Д.Г. Систематизація факторів опасности для построения профиля риска судовых работ // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – № 1. – С. 30-35.

14. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ), Книга III, пересмотренное издание – International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Book III, revised edition. – Одеса : Фенікс, 2009. – 304 с.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Solodovnikov V.G. Ultrasonic fuel processing as a method of improving the technical condition and economic characteristics of ship diesels // American Scientific Journal, 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 59-62.

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

20. Сагин С. В. Ультразвуковая обработка топлива для судовых среднеоборотных дизелей / С. В. Сагин, В. Г. Солодовников // Austria-science. – 2017. – № 2.– С. 88-93 / publishing «Austria-science»© 2017.

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

22. 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>.

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

24. 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.

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

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

27. 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.

28. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових 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.

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

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

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

32. Кринецкий И. И. Основы научных исследований: учебное пособие для вузов / И. И. Кринецкий. – К. ; Одесса : Вища школа, 1981. – 208 с.
33. Голиков В. А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В. А. Голиков, М. А. Козьмініх, О. А. Онищенко. – Одеса : ОНМА, 2014. – 164 с.
34. Голиков В.В. Системный подход к проблеме безопасного управления судном / Голиков В. В // Судовождение. – Одесса. – 2010. – Вып. 17. – С. 51-58.
35. 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.
36. 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.
37. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
38. Zablotsky Yu.V. Reducing of thermal factor of exit-gas system of marine medium-speed diesel engine due to the usage of fuel additives // 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.
39. 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.

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

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

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

43 Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових 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.

44. 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>.

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

46. 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.

47. 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.

48. 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.

49. Солодовников В.Г. Применение двухступенчатой обработки топлива для улучшения рабочих параметров и эксплуатационных характеристик судового дизеля / В. Г. Солодовников // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 34. – Одесса: ОНМА. – С. 130-137.

50. Однолько Б.Ю. Забезпечення експлуатаційних характеристик палива для судових дизелів / Б.Ю. Однолько // Матеріали Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». – 19.11.2025. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 119-123.

51. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids / S. V. Sagin // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.

52. 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.

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

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